

# SISTEMA DE MEDIÇÃO POLAR À BASE DE TEODOLITOS E DEFINIÇÃO DO MÉTODO DAS LINHAS DE GRADE

*Theodolite Polar measurements system and definition of the grid-lines method*

**Andréa de Seixas**  
**Universidade Federal Rural de Pernambuco**  
**Departamento de Tecnologia Rural**  
Rua Dom Manoel de Medeiros s/n  
Dois Irmãos – Recife – PE  
e-mail: [aseixas@gmx.net](mailto:aseixas@gmx.net)

## RESUMO

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 abstrai-se 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). Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de medição deste tipo, baseado em dois robôs de medição ou em um robô taqueométrico, o qual funciona sem o emprego de refletores. O sistema de medição é capaz de determinar pontos de interseção de linhas de grade com a superfície, as quais são definidas em um sistema de coordenadas do aparelho ou do objeto. O objetivo deste trabalho é introduzir os conceitos e a formulação de um novo método de medição, que poderá ser empregado para a reconstrução tridimensional de um objeto desconhecido e não sinalizado. Serão descritos os possíveis e já existentes métodos de medição de deformação baseados em sistemas de medição polar à base de vídeo teodolitos e em sistemas de medição taqueométricos sem o emprego de refletores. O método das linhas de grade oferece uma solução a mais, e permanece como uma nova alternativa para a reconstrução geométrica da superfície de um objeto. Sua definição e preparação em um sistema apropriado de coordenadas serão discutidas em detalhes.

**Palavras chaves:** Reconstrução tridimensional de objetos, sistema de medição polar à base de teodolitos, sinalização ativa, método das linhas de grade, sistemas de coordenadas.

## ABSTRACT

The requirements of construction quality, mainly in the car and airplane industries, accelerate the development of new 3D-Measurement Systems and Measurement Processes that make possible the automatic object recording and its post-processing on the basis, for example, on deformations. The geometrical reconstruction of objects or surface requires a minimal number of points, which abstracts and will be fulfilled through interpolation its exact form and quality of the object in each case. The applications of the laser for the active signalization of a point object in combination with the directional measurement make possible in such way the determination of objects or surfaces, including also, places where the use of artificial targets is dangerous or impossible. This work describes the development of such measurement system based on two measurement robots or a reflector-free measuring tachymeter. The system is capable of reaching the intersections points of a grid-line that is defined in an appropriate coordinate system. The aim of this paper is to present the development of measurement methods that can reconstruct unknown three-dimensional and not signalized objects. The existing deformation-measurement, based on Pointer Theodolite and a Video Theodolite Measurement System and the other reflector-free Tachymeter Measurement System in context with the problematic analysis of deformation will be presented. The grid-lines Methods appear a solution and stand as new alternative for the geometrical reconstruction of the object surfaces. Its definition and preparations in a suitable coordinate system are discussed in detail.

**Key words:** Three-dimensional reconstruction of objects, Theodolite measurements system, active signalization, grid-lines methods, coordinates systems.

## 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 tridimensional de objetos não sinalizados ou sinalizados com marcas artificiais.

Um novo método de medição poderá ser empregado para a reconstrução tridimensional de um objeto qualquer, não sinalizado, sem o contato direto com o mesmo. O princípio de medição é baseado no clássico método geodésico de interseção a vante ou no método polar. Este princípio de medição progrediu, então, para um método denominado de linhas de grade.

Como principais pontos a serem abordados têm-se o desenvolvimento e a combinação de um sistema de medição, devendo o mesmo determinar superfícies e suas deformações, através de alvos não sinalizados artificialmente. Estes alvos são gerados por linhas de grade. Linhas de grade são linhas que se orientam em relação aos eixos coordenados de sistemas de coordenadas do objeto ou sistemas de coordenadas cartesianas do objeto ou sistema de coordenadas do aparelho. Em um sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z, estas linhas estão paralelas aos eixos X, Y e Z. Com os instrumentos geodésicos e um algoritmo apropriado pode então ser deduzido, onde estas linhas de grade, anteriormente pré definidas, interceptam a superfície do objeto. As definições das linhas de grade dependem da forma do objeto.

Como possíveis áreas de aplicação pode-se citar: indústria automobilística, naval e de aviação; varredura de superfícies complexas; construção de túneis; monitoramento de fenômenos naturais; construção civil; monitoramento on-line de mudanças de formas em estruturas complexas; engenharia de produção; controle de qualidade de superfícies e objetos; metrologia; medicina; monitoramento de máquinas e equipamentos; fotogrametria digital; indústria mecânica; obras de grande portes (estradas, pontes, barragens, portos,...); arquitetura.

No presente trabalho será apresentado um histórico da evolução de sistemas de medição polar à base de teodolitos através da triangulação ativa, dando, além disso, uma visão sobre os métodos já existentes para a determinação de deformação e para as medições de superfícies. A definição do método das linhas de grade, assim como a configuração das mesmas de acordo com a forma do objeto a ser investigado e com o sistema de referência escolhido, será aqui sucintamente abordados.

## 2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO POLAR À BASE DE TEODOLITOS

O objetivo da *medição de deformação* (monitoramento) é determinar a mudança de posição e a mudança de nível de um objeto de prova com respeito

ao seu redor e/ou mudança de sua forma, como função do tempo. Para a medição de deformação está disponível, um grande número de métodos, entre outros: métodos óticos de medição tridimensional, métodos de nivelamento, método de ordenamento de medição através de sensores descentralizados (para determinação de variações de comprimento, de nível e de inclinação), e métodos de prumadas e de alinhamento (KAHMEN, 1997). Para a escolha dos métodos não se pode fixar uma regra geral, mas pode-se indicar algumas características básicas para a sua escolha, por exemplo, a precisão, a ordem de medição, o grau da automação e o alcance da medição. O levantamento do objeto apóia-se em técnica de medição de coordenadas, principalmente nas indústrias de automação, onde o objeto é representado através de coordenadas de pontos de medição.

As *medições de superfícies* têm o objetivo de levantar ou de reconstruir a forma do objeto de prova e de monitorar ou de determinar as suas mudanças de forma (DE SEIXAS, 2001). A medição através de métodos, na qual o objeto não vem a ser tocado, teve uma grande evolução nos últimos anos. No contexto deste trabalho interessam principalmente os *métodos de medição polar à base de teodolitos* e os *métodos de medição taqueométricos*. Estes métodos são empregados para medições de superfícies sem a utilização de marcas (alvos) artificiais, quando o sistema de medição polar à base de teodolitos fundamenta-se no *método da triangulação ativa* (com marcas ativas), ou quando o taqueômetro se dispõe de um distanciômetro, o qual opera sem a utilização de refletores (*método de medição polar*).

### 2.1 Evolução do sistema de medição polar à base de teodolitos a partir da triangulação ativa

Em função da evolução da tecnologia e da demanda dos usuários houve um desenvolvimento do teodolito, permitindo o aumento da gama de aplicações. Muitas mudanças aconteceram até que o teodolito óptico-mecânico fosse transformado em um *video-taqueômetro*, ou seja, um *taqueômetro identificador*. Mais de 20 anos foram investidos em pesquisa, período no qual diversos instrumentos e métodos de medição foram desenvolvidos. O emprego destas técnicas pode ser verificado em uma diversidade de projetos tecnológicos de construções de instalação, de construção de máquinas, na ciência da construção civil e outras regiões de alcance industrial (DE SEIXAS, 2001).

Há 40 anos, foi inventado o LASER por Maiman (HUFFLESS, 1992). A partir de 1960 foi realizada uma procura intensiva de novas técnicas de medição em LASER, como também foram desenvolvidas pesquisas com novos conceitos. Um pouco mais tarde, no ano de 1971, procedeu-se a invenção da câmera-CCD por Tompsett (TOMPSETT, 1971). Nesta época ninguém imaginava qual o potencial técnico que se esconderia nestas duas novas invenções.

No final dos anos '70 e início dos anos '80, desenvolveu-se a *triangulação passiva* com um sistema de medição polar à base de teodolitos, concretizando-se a introdução da triangulação passiva na indústria. O LASER abriu novas portas para as medições sobre objetos, nos quais os mesmos não são tocados. Oculares à laser encontravam-se disponíveis para o emprego nas medições sobre objetos com grande densidade de pontos. O LASER tinha primeiramente apenas a função de ajudar nas medições. O ponto a LASER marcava para os dois observadores o alvo correspondente.

O sistema de medição tridimensional era composto anteriormente de teodolitos óptico-mecânico, com leituras em segundo de arco, onde um instrumento era adaptado com uma ocular a LASER, sendo o sistema de medição composto com uma mira de base industrial. A ocular a LASER era construída com um condutor flexível de luz, de modo a permitir a passagem coaxial do feixe a LASER ao eixo óptico da luneta. Neste tipo de sistema eram exigidos pelo menos três operadores. O primeiro tinha a função de projetar o feixe a LASER sobre o objeto, medindo em seguida a sua direção. O segundo operador era responsável por acompanhar e identificar o ponto a LASER projetado e o terceiro tinha a obrigação de efetuar os cálculos, além de controlar o sistema.

A fim de automatizar o procedimento de medição, substituiu-se passo a passo a seqüência da execução da medição manual por novos elementos funcionais mecânicos e eletrônicos. Pontos de vista econômicos e técnicos eram os principais objetivos a atingir com estas mudanças, além da melhoria da qualidade dos valores de medição por causa do reconhecimento automático e da diminuição dos erros sistemáticos e acidentais. Ao lado disso esperava-se que atividades simples e repetitivas fossem resolvidas através da *automação*.

Os dispositivos de leituras foram substituídos por sistemas eletrônicos de medição angular. O movimento em torno dos eixos vertical (principal) e secundário são agora executados através de motores de passo e servo motores. Ao lado da motorização dos eixos foi construída em alguns aparelhos, uma propulsão motorizada para a focalização.

Além disso, foi integrado na luneta do teodolito uma câmera-CCD, o que tornou possível a visualização e o reconhecimento do alvo de modo completamente automático. Em 1983 já existia um sistema de medição (Georobot I), o qual determinava o alvo automaticamente (KAHMEN, SUHRE, 1983). De maneira resumida, o procedimento de sinalização se baseia na comprovação da intensidade do sinal que volta ao medidor de distância. A visualização ocorre, de modo ótimo, quando o eixo central do feixe de radiação, lançado do medidor de distância, atinge uma marca (alvo), sendo a mesma definida através do centro de um sistema de refletores. Um sinal máximo retorna ao instrumento, o qual pode ser detectado. Esta "*medição fina*" exige em geral uma "*medição robusta (grosseira)*". Com isto é movimentado o eixo óptico do

medidor de distância através de motores de passo, de modo que o eixo óptico desenhe uma espiral em forma retangular ao redor do sistema de prismas. O procedimento de procura em forma de espiral será finalizado, tão logo o feixe de radiação atinja o prisma (KAHMEN, STEUDEL, 1988). Este tipo de procura de alvo serviu primeiramente apenas para o direcionamento de medidores de distâncias, ou seja, para a triangulação.

No início dos anos '80 a ciência das medições começou a tirar vantagem da *técnica da automação, do processamento digital de imagens e da técnica de comando-e-controle*. Já eram empregados teodolitos motorizados com programas funcionais automáticos e com câmera-CCD integrada, a qual substituiu a visão humana por um sistema de visão de máquina (GOTTWALD, BERNER, 1987), (ROBERT, MOTIFFIT, 1987), (GOTTWALD, 1987), (GRUEN, 1992).

A *triangulação ativa* foi empregada para a reconstrução tridimensional do objeto a partir do final dos anos 80 (HAAG, 1988), (HUEP, 1988), (SHERER, 1988). Baseada na técnica da triangulação passiva, que utiliza ao contrário desta, fontes de luz ativa ou luzes estruturadas (retas sem deformação), a fim de que sejam definidas marcas (alvos) pontuais, lineares ou quadrangulares sobre o objeto (KAHMEN, 1997).

Até o momento foram desenvolvidos aparelhos de medição altamente precisos e automáticos e métodos de medição adaptados à alta tecnologia industrial. O crescente aumento das exigências na qualidade e confiança sobre o monitoramento e controle em lugares perigosos exigem, enquanto isto, também o desenvolvimento e a integração de métodos de medição "on-line", assim como a determinação de objetos não sinalizados.

## 2.2 Determinação de deformação com sistemas de medição polar à base de um teodolito apontador e de um teodolito identificador

Serão considerados aqui dois métodos de medição: no primeiro sinaliza-se o objeto com marcas (alvos) artificiais e no segundo utiliza-se a projeção de um ponto a LASER para a marcação do ponto alvo.

(a) Determinação de objetos sinalizados com marcas artificiais

Por razões econômicas, durante a determinação de deformação (monitoramento), mede-se uma quantidade limitada de pontos. O objeto é abstraído por um número limitado de pontos-objeto. Normalmente estes pontos-objeto são materializados com marcas (alvos) artificiais. Suas posições são determinadas em uma medição denominada *medição zero*. A vantagem neste método é que durante o monitoramento são percorridos sempre os mesmos alvos. As desvantagens em contrapartida são:

- o custo e o tempo dispendioso, já que o objeto a ser investigado deverá ser manualmente sinalizado,
- os pontos marcados poderão desaparecer, durante as medições de objetos, os quais requerem um longo tempo de monitoramento,
- não é empregável em lugares perigosos e de difícil acesso.

O sistema de medição pode ser automatizado ao utilizar como alvos pequenas fontes de luz (por exemplo diodos iluminadores) e, também se **teodolitos identificadores (Video-teodolitos)** vierem a ser empregados para a colimação automática (Figura 1).

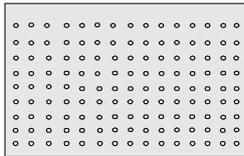


Figura 1 - Objeto sinalizado com marcas artificiais.

Para o emprego deste método de medição no controle de deformação de objetos industriais, não é exigido o conhecimento da geometria do objeto a ser investigado (WIESER, 1995). Serão simplesmente comparadas as mudanças de posição dos pontos nas diferentes épocas de medição (Figura 2).

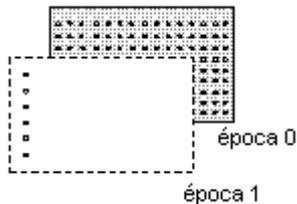


Figura 2 - Mudança de posição de um objeto.

(b) Determinação de objetos não sinalizados

O sistema de medição polar à base de teodolitos é composto, neste caso, por um **teodolito apontador** e um **teodolito identificador**, tornando desnecessário o emprego da sinalização com marcas artificiais.

Estas marcas artificiais, utilizadas como alvos, podem ser criadas através de um teodolito que projeta marcas na direção do seu eixo de colimação. Um teodolito com esta característica é denominado um teodolito apontador. O teodolito identificador, por sua vez, localizará e medirá os alvos projetados. Sistemas de medição tridimensional deste tipo são empregados há alguns anos, principalmente no contexto industrial. Espera-se de um sistema de medição automático polar à base de teodolitos, que o reconhecimento e o acompanhamento de um alvo sejam efetuados de modo mais rápido, porque as marcas de alvo projetadas destacam-se, nitidamente pelo contraste, do fundo visualizado. A determinação de um alvo, com alta precisão, é possível quando o sistema é acoplado com

sensores especiais. Para o reconhecimento automático do alvo, emprega-se a tecnologia de sistema de controle – e – comando.

Um sistema de medição automático à base de teodolitos, tal como o ATMS (Automatic Theodolite Measurement System) é composto de um teodolito identificador e de um teodolito apontador. Este tipo de sistema de medição é predestinado para trabalhos que envolvem a verificação da superfície do objeto.

Quando a forma aproximada do objeto é conhecida, poderão ser definidos sobre a superfície, pontos-objeto, os quais discretizam o mesmo, adequadamente.

Suas coordenadas serão, então, calculadas no sistema de coordenadas do objeto. Para a transformação das coordenadas destes pontos-objeto no sistema de coordenadas do teodolito apontador (sistema de coordenadas do aparelho) serão necessários no mínimo três pontos idênticos nos dois sistemas de coordenadas. Os pontos-objeto poderão ser conduzidos, neste último sistema, através da transformação de Helmert. O teodolito apontador utiliza então estas coordenadas para procurar os pontos-objeto sobre a superfície. O teodolito identificador deverá medir o ponto-objeto projetado. As direções medidas sobre os pontos sinalizados e procurados possibilitam os cálculos dos pontos-objeto.

O processo de medição torna-se mais complicado quando o sistema de medição é empregado para medições de deformação. Primeiramente, é feita uma **medição zero**, sendo repetido o processo de medição anteriormente descrito, para a verificação da superfície do objeto. As coordenadas determinadas na medição zero servirão também como informações de comando para as sucessivas medições.

Caso tenha ocorrido algum tipo de deformação do objeto, entre as **medições sucessivas**, ocorrerá o problema que os pontos projetados a LASER com o teodolito apontador não serão mais os mesmos pontos-objeto iniciais (Figura 3), prejudicando, assim, a interpretação das deformações. Para que os parâmetros de transformação entre os dois sistemas não sejam afetados pelas deformações ocasionadas no objeto, são necessários pontos denominados de controle.

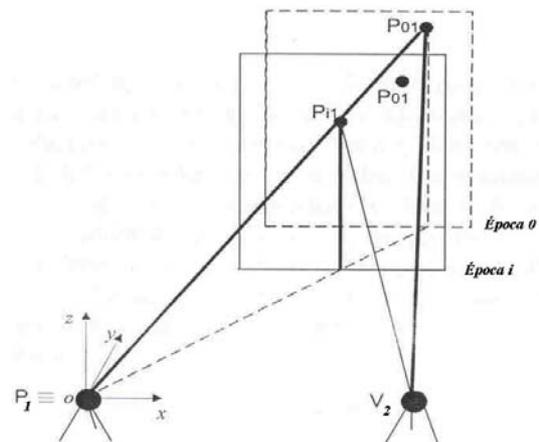


Figura 3 - Visada do ponto - objeto após a medição zero.

Uma solução para o problema pode ser estabelecida quando as deformações são observadas sobre uma linha, definida pela interseção da superfície do objeto com uma superfície conhecida anteriormente (Figura 4). Esta pode, por exemplo, ser um plano, tal como o plano ABCD, em um sistema de coordenadas cartesianas, o qual é paralelo ao plano de coordenadas ZY.

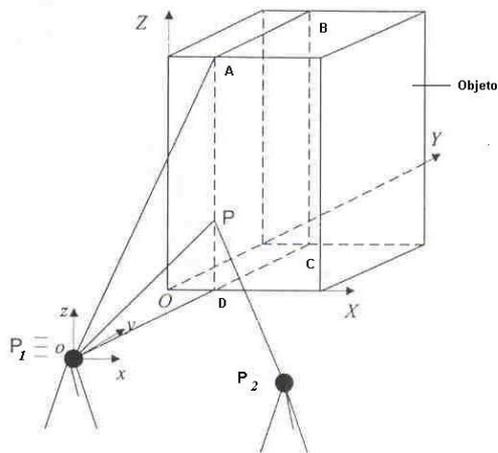


Figura 4 – Deformações ao longo de superfícies anteriormente dadas.

Em todo caso será observada e medida a mudança do objeto ao longo da curva de interseção do plano ABCD (Figura 4) com a superfície do objeto.

Na prática uma superfície conhecida anteriormente poderá ser definida de duas maneiras:

- A superfície em questão já foi levantada. Os pontos-objeto estão armazenados em um sistema de coordenadas do objeto, podendo ser, a qualquer momento, reutilizados.
- A superfície em questão não foi levantada. Os pontos-objeto serão definidos em um sistema de coordenadas do objeto a partir de um sistema CAD.

Tanto no primeiro caso quanto no segundo caso, torna-se imprescindível a determinação dos parâmetros de transformação entre o sistema de coordenadas do objeto e o sistema de coordenadas do aparelho, para que os mesmos pontos-objeto possam ser analisados nas medições sucessivas.

Em objetos simétricos ao eixo de rotação definidos em um sistema de coordenadas cilíndrico, utilizam-se superfícies meridianas (Figura 5 e Figura 6).

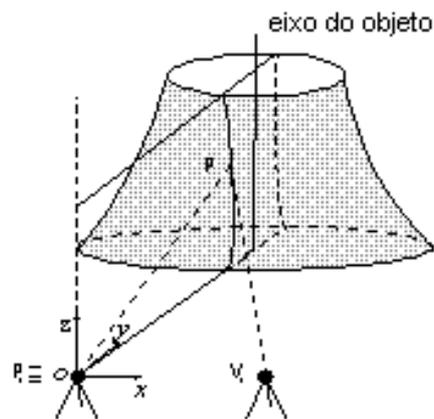


Figura 5 - Medição de deformação ao longo de uma superfície curva.

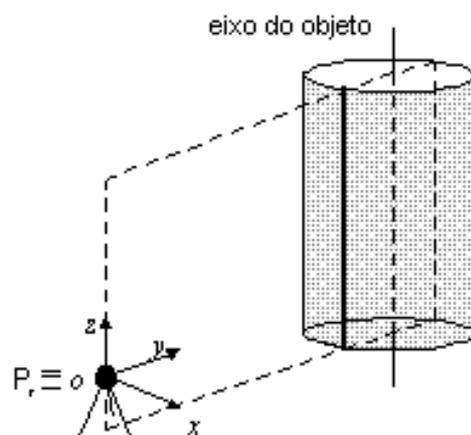


Figura 6 - Medição de deformação ao longo de uma superfície cilíndrica.

As medições realizar-se-ão, quando o teodolito apontador for instalado de modo que o eixo vertical e o eixo de visada (eixo do LASER) se encontrem neste plano de interseção. O ponto alvo a LASER projetado está então neste plano, independentemente da forma do objeto observado. Neste caso existe desvantagem, pois o método é pouco flexível, já que o teodolito apontador deverá ser novamente instalado para cada novo plano escolhido.

Uma outra desvantagem é que as deformações não deverão ser observadas ao longo de uma linha determinada ou livremente escolhida (Figura 7), por exemplo, ao longo da linha de visada do teodolito, o qual foi anteriormente fornecido através da medição zero ou ao longo de um raio previamente conhecido.

Estas últimas desvantagens podem ser eliminadas, quando for possível observar deformações ao longo de *linhas de grade*. A concepção da solução do problema, empregando as linhas de grade será descrita no item 3.

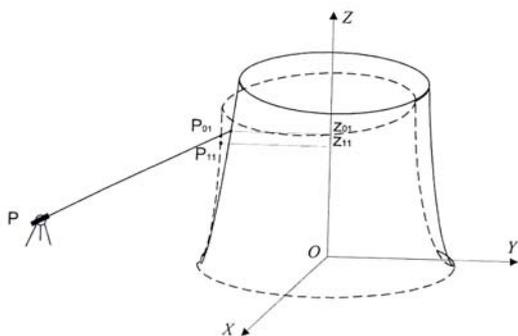


Figura 7 - Visada de um ponto-objeto definido na medição zero depois de uma deformação do objeto.

### 2.3 Determinação de deformação com medidores taqueométricos sem o emprego de refletores

A determinação das coordenadas do objeto realiza-se através do método polar. O sistema de medição taqueométrico é por causa disto, também em muitos casos, denominado sistema de medição polar. Um sistema deste tipo é composto de um teodolito eletrônico acoplado com um medidor de distâncias (distanciômetro) eletrônico, o qual está conectado a um controlador (PC), procedendo-se desta forma uma transmissão de dados "on-line". Distinguem-se dois métodos de medição:

- (a) no primeiro, o objeto está sinalizado com folhas de reflexão ou refletores,
- (b) no segundo, os refletores (prismas) deixam de ser utilizados.

Com o emprego de um sistema taqueométrico ocorre também, no contexto de observações de deformação nas medições sucessivas, o problema, que o ponto projetado a LASER de um taqueômetro, o qual trabalha sem o emprego de refletores, não representa mais o mesmo ponto-objeto da medição zero (Figura 7). Esta desvantagem deixa de existir, do mesmo modo como abordado anteriormente, quando for possível observar deformações ao longo de *linhas de grade*.

### 2.4 Determinação de superfície através da tecnologia de varredura a LASER

Além do sistema de medição polar à base de teodolitos e do sistema de medição polar, abordados acima, 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 ocorrem dentro de três grandes categorias:

- da reconstrução do objeto, propriamente dita;
- 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 (ver definição item 2.) quanto em trabalhos que envolvem medição de superfícies (ver definição item 2.). 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 quatro 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. O mecanismo para o direcionamento do feixe de luz permite as leituras dos ângulos horizontal e vertical. Além disso, as distâncias entre o centro do aparelho e os pontos-objeto são realizadas através de um medidor interferométrico. Um sistema de varredura a LASER realiza, do mesmo modo que um teodolito, um sistema de coordenadas cilíndrico.

A vantagem deste sistema de medição está na possibilidade da determinação de centenas de pontos em um segundo. É fácil de ser transportado, além de ser possível sua aplicação em procedimentos estáticos e cinemáticos.

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). Vale ressaltar que no Brasil esta tecnologia de medição já vem sendo empregada pela PETROBRÁS.

Com o emprego de um sistema a base da tecnologia de varredura a LASER ocorre também, no contexto de observações de épocas sucessivas, o problema, que o ponto projetado a LASER não representa o mesmo ponto-objeto da medição zero.

## 3. O MÉTODO DAS LINHAS DE GRADE - CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO

### 3.1 Conceitos básicos

Um método para a medição de formas e mudanças de formas tem uma elevada flexibilidade, quando a superfície do objeto, durante a medição zero, e durante as sucessivas medições, é interceptada com linhas de grade de um sistema de coordenadas. **Linhas de grade são linhas de direções constantes; podendo ser definidas em diferentes sistemas de coordenadas tridimensionais, se duas coordenadas são mantidas constantes.**

As linhas de grade poderão ser definidas teoricamente (por exemplo em um modelo CAD) ou no contexto de uma medição zero. Na Figura 8 são, por exemplo, definidas linhas de grade  $y$  (reta  $g$ ), se as coordenadas  $x$  e  $z$  forem mantidas constantes.

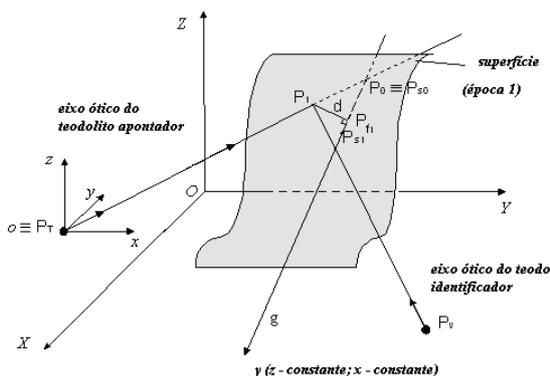


Figura 8 – Geometria do método das linhas de grade a partir da interseção a vante espacial.

A fim de que seja feita a repetição de uma medida, e que, portanto, sejam empregadas as mesmas linhas de grade da medição zero, são necessários pelo menos três pontos fixos no mesmo sistema de coordenadas tridimensionais da medição zero. Deste modo, os teodolitos podem ser posicionados e orientados sempre neste sistema.

A linha de grade intercepta a superfície do objeto durante a medição zero (época 0) na posição  $P_{S0}$  (s representa posição exigida, 0 representa medição zero) e durante a medição de repetição (época 1), depois da ocasionada mudança de forma, a linha de grade passou a interceptar a mesma superfície na posição  $P_{S1}$ . Durante a primeira medição de repetição o ponto  $P_{S0}$  será visualizado com o sistema de medição. Caso o sistema de medição seja constituído por um taqueômetro apontador, serão determinadas, ao contrário deste, as coordenadas de  $P_1$  a partir da estação  $P_T$  através do método polar.

Por causa das mudanças de forma, o sistema de medição encontra agora a superfície do objeto na posição  $P_1$ . O segundo teodolito estacionado em  $P_V$  (Figura 8) procura o ponto-objeto  $P_1$  e através da interseção a vante serão determinadas as suas coordenadas. Então  $d$  é a distância entre  $P_1$  e seu correspondente ponto  $P_{f1}$  definido perpendicularmente sobre a linha de grade.

O método de linhas de grade realizar-se-á, quando as direções  $H_z$  e  $V$  do teodolito em  $P_T$  forem continuamente reposicionadas (semelhante a um sistema de comando - e - controle), até que a distância perpendicular  $d$  do ponto  $P_1$  da linha de grade  $y$  (Figura 8) for zero ou demasiadamente pequena (desprezível), ou seja, menor que um intervalo de precisão dado.

Foram apresentados quatro métodos na tese de doutorado “Objektrekonstruktion mittels Gitterlinien-Verfahren” (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. Os testes experimentais mostraram que: (a)

o método de medição (interseção a vante empregando como teodolito apontador um TCA1800 e como um teodolito identificador um TM3000VD) possui uma precisão melhor que 0,1mm; (b) os pontos de interseção das linhas de grade com a superfície plana de um objeto utilizado como referência poderão ser determinados com uma precisão tridimensional menor e/ou igual a 0,1mm; (c) estes resultados são independentes do algoritmo de medição (métodos acima citados) empregado; e (d) o critério de parada deve ser escolhido maior que a precisão de medição (neste caso melhor que 0,1mm).

O monitoramento e o controle geométrico do objeto de prova só será possível quando os sistemas de referência forem devidamente definidos, de forma que os mesmos pontos observados possam ser estudados em um mesmo sistema de referência, devidamente otimizado, ao longo do tempo (DE SEIXAS et al., 2003). Pode-se citar como exemplo de otimização: a análise da deformação ao longo da direção do deslocamento ou da direção da mudança de forma; e a configuração do sistema de referência de acordo com a geometria do objeto de prova.

A definição de sistemas de referência (sistemas de coordenadas) dependerá da geometria do objeto e do objetivo a ser alcançado. Normalmente são distintos entre si o sistema de coordenadas do aparelho, o sistema de coordenadas superior e o sistema de coordenadas do objeto. O objeto em questão será dividido em partes, as quais estarão definidas em diferentes sistemas de coordenadas (sistemas de coordenadas do aparelho) interligadas entre si, por exemplo, quando todos os pontos discretizadores do objeto não puderem ser medidos de uma mesma estação, e referenciados a um único sistema de referência (sistema de coordenadas superior).

### 3.2 Sistemas de coordenadas do aparelho e sistema de coordenadas superior

Na área de controle de qualidade de medição de superfícies distinguem-se dois objetivos básicos: primeiramente a observação de mudanças de forma e segundo a comparação de formas geométricas de um objeto (análise de formas). Em geral, a determinação espacial de um objeto é realizada de vários pontos de vista, ocupados pelos instrumentos. Suas coordenadas deverão então ser referenciadas a um sistema de coordenadas superior.

Um sistema de coordenadas apropriado do objeto será empregado, caso o objeto tenha uma forma geométrica típica (cubo, esfera, ...). Normalmente são distinguidos entre si os seguintes sistemas de coordenadas:

- $(x,y,z)$  – Sistema de coordenadas do aparelho;
- $(X,Y,Z)$  – Sistema de coordenadas superior;
- Sistemas de coordenadas do objeto

O sistema de referência de medição (sistema de coordenadas do aparelho) é o elemento chave para a interligação entre os diferentes campos de pontos. A compreensão desta questão, torna-se bem representativa e clara a partir de um sistema de medição polar à base de teodolitos, o qual é composto por um ou mais teodolitos como instrumento básico, no qual as coordenadas tridimensionais  $x_i, y_i, z_i$  de um ponto-objeto  $P_i$  podem ser determinadas através do método polar ou através do método da triangulação.

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 como a própria descrição local de um sistema de coordenadas por si só independente. Neste último caso, o sistema de coordenadas do aparelho passará a ser também um sistema de coordenadas superior.

A calibração do sistema de medição (determinação dos parâmetros da orientação absoluta e relativa), por sua vez, é indispensável para o pleno desempenho da medição e, conseqüentemente para a interligação entre os diferentes campos de pontos. As definições e transformações entre os sistemas de coordenadas estão descritas em de Seixas (2001) e de Seixas et al. (2003).

Um sistema de coordenadas superior abrange toda área de levantamento. Dentro desta área poderão existir vários objetos, podendo cada um estar definido em um apropriado sistema de coordenadas do objeto. Representando neste caso um sub-conjunto do sistema de coordenadas superior.

Com o propósito do desenvolvimento de um novo sistema de medição polar à base de teodolitos (KAHMEN, DE SEIXAS, 2000), (KAHMEN, NIESSNER, DE SEIXAS, 2001) para a determinação de deformações em objetos não sinalizados, foi necessário também a concepção de um programa computacional para a definição automática de linhas de grade em um determinado sistema de coordenadas do objeto ou do aparelho, além dos próprios algoritmos desenvolvidos para a procura iterativa do ponto de interseção da linha de grade com a superfície do objeto. A escolha do sistema de coordenadas do objeto ou do aparelho e a configuração das linhas de grade serão abordados em seguida.

### 3.3 Escolha do sistema de coordenadas e a configuração das linhas de grade

As linhas de grade poderão ser definidas tanto em um sistema de coordenadas do aparelho, como também em um sistema de coordenadas do objeto (DE SEIXAS, 2001), como descrito a seguir:

- (a) quando se observa um objeto, o qual não pode ser apresentado em uma forma geométrica simples (cubo, cilindro, ...). Neste caso, as linhas de grade serão configuradas de modo mais adequado, em um sistema de coordenadas cartesiano do aparelho;

- (b) quando se observa um objeto, o qual pode ser apresentado em uma forma simples: então as linhas de grade serão configuradas de modo mais adequado, em um sistema de coordenadas do objeto. Além da forma de um objeto que está sendo monitorado, a direção do movimento principal nas mudanças de formas pode ser ainda, um indicador para a escolha de um sistema de coordenadas apropriado do objeto.

As possíveis configurações das linhas de grade para diferentes sistemas de coordenadas serão descritas nos itens seguintes.

#### 3.3.1 Linhas de grade em um sistema de coordenadas cartesiano

Linhas de grade são linhas de direções constantes; elas estão em um sistema de coordenadas cartesiano, se dois planos coordenados se interceptam. Neste caso elas são ao mesmo tempo linhas de coordenadas. Uma linha de coordenada é a interseção de duas superfícies coordenadas. Em um sistema de coordenadas cartesiano, as linhas de coordenadas são retas. Em um sistema de coordenadas cilíndrico, as linhas de coordenadas são: ou uma reta (meridiano), ou um círculo ou uma semireta. Em um sistema de coordenadas esférico, as linhas de coordenadas são: ou semimeridianos (semicírculos); semireta, as quais se estendem através da origem de coordenadas; ou círculos.

Com a configuração de planos coordenados  $X = X_i = const$ ,  $Y = Y_j = const$  e  $Z = Z_k = const$  podem ser reproduzidas quaisquer quantidades de linhas de grade, sendo estas linhas localizadas na interseção de cada dois destes três planos, sendo paralelas a um dos eixos coordenados. A Figura 9 mostra, por exemplo, os planos coordenados  $Z=0$  e  $Y=1$ , assim como a linha de grade correspondente  $X(1/0)$ .

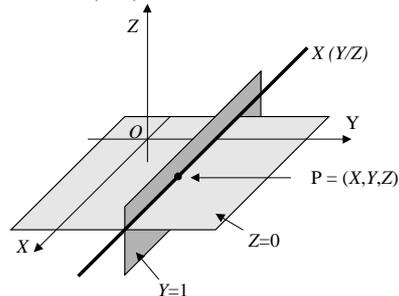


Figura 9 - Representação da linha de grade  $X(1/0)$  em um sistema de coordenadas cartesiano.

#### 3.3.2 Linhas de grade em um sistema de coordenadas cilíndrico

- (1) Linhas de Grade  $r(\theta/Z)$

Em um primeiro caso, definem-se as linhas de grade em um sistema de coordenadas cilíndrico (Figura 10), se as duas coordenadas  $\theta$  e  $Z$  permanecerem constantes, isto é, se um semiplano e um plano se

interceptam. Neste caso a linha de grade é uma das possíveis linhas coordenadas.

Com o semiplano  $\theta = \theta_i = const$  e o plano coordenado  $Z = Z_k = const$  podem ser reproduzidas quaisquer quantidades de linhas de grade  $r(\theta/Z)$ , as quais se estendem em direção radial. As linhas de grade  $r_{ik}(\theta_i/Z_k)$ , por exemplo, interceptam a superfície coordenada (o manto cilíndrico) com o raio  $r = \eta$  no ponto  $P_{ik} = (\eta, \theta_i, Z_k)$ .

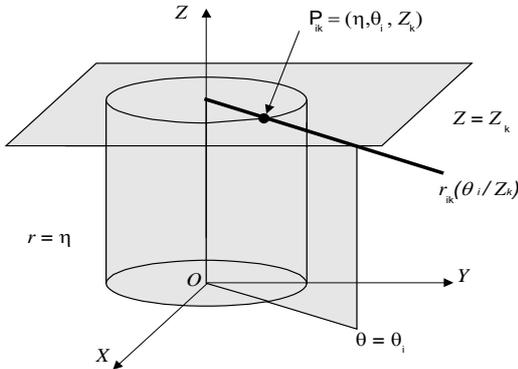


Figura 10 - Definição de um ponto  $P_{ik}$  (ponto de interseção) sobre o manto cilíndrico com a linha de grade  $r_{ik}(\theta_i/Z_k)$ .

(2) Linhas de Grade  $Z(r/\theta)$

Em um segundo caso, definem-se as linhas de grade em um sistema de coordenadas cilíndrico (Figura 11), se as duas coordenadas  $r$  e  $\theta$  permanecerem constantes, isto é, se uma superfície coordenada (manto do semicilindro) e um semiplano, os quais cada um são dados através de uma constante, se interceptam.

Com o manto do semicírculo  $r = r_j = const$  e o semicírculo  $\theta = \theta_i = const$  pode-se reproduzir qualquer quantidade de linhas de grade  $Z(r/\theta)$ , as quais se estendem na direção da coordenada  $Z$  sobre o manto do cilindro. A linha de grade correspondente  $Z_{ji}(r_j/\theta_i)$ , por exemplo, intercepta o plano coordenado  $Z$  em um ponto  $P_{ji} = (r_j, \theta_i, Z)$ . Uma vantagem deste tipo de linha de grade é que as deformações poderão ser determinadas na direção  $Z$ .

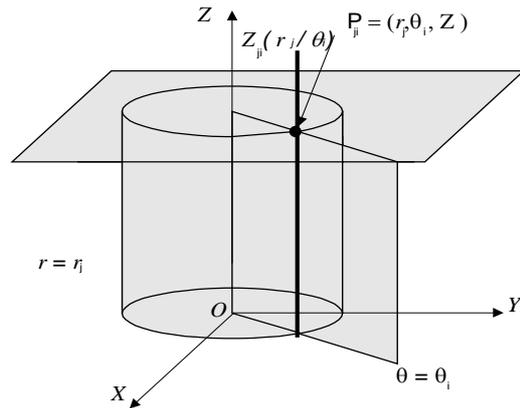


Figura 11 - Definição de um ponto  $P_{ji}$  (ponto de interseção) sobre o plano coordenado  $Z$  com a linha de Grade  $Z_{ji}(r_j/\theta_i)$ .

Análogo ao primeiro caso, pode-se definir ainda duas outras linhas de grade,  $X$  e  $Y$ , com respeito aos eixos do sistema coordenado. Cada uma de acordo com a coincidência do eixo do cilindro com o eixo coordenado.

3.3.3 Linhas de grade em um sistema de coordenadas esférico

Linhas de grade estão em um sistema de coordenadas esférico (Figura 12), se as duas coordenadas  $\theta$  e  $\zeta$  permanecerem constantes, isto é, se duas superfícies coordenadas (o manto semicônico e o semiplano) se interceptam. Neste caso a linha de grade é uma das possíveis linhas coordenadas.

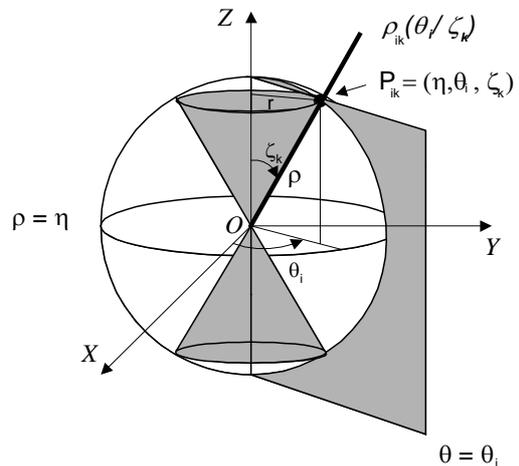


Figura 12 - Definição de um ponto  $P_{ik}$  (ponto de interseção) sobre o manto esférico com a linha de grade  $\rho_{ik}(\theta_i/\zeta_k)$

Com o semiplano  $\theta = \theta_i = const$  e com o semicone circular  $\zeta = \zeta_k = const$  é possível reproduzir qualquer quantidade de linhas de grade  $\rho(\theta/\zeta)$ , as quais se estendem na direção radial sobre o manto cônico circular. As linhas de grade  $\rho_{ik}(\theta_i/\zeta_k)$ , por exemplo,

interceptam o manto esférico com o raio  $\rho = \eta$  nos pontos  $P_{ik} = (\eta, \theta_i, \zeta_k)$ .

### 3.3.4 Linhas de grade em um sistema de coordenadas não cartesiano

Tem-se aqui um caso especial de um sistema de coordenadas do objeto, onde as direções coordenadas não são perpendiculares entre si.

As linhas de grade são definidas em um sistema de coordenadas não cartesiano, quando elas se estendem paralelamente aos eixos coordenados não cartesianos.

De acordo com a finalidade é oportuno fazer uma mudança de base, o que implica na mudança das coordenadas de um vetor, em relação à base anteriormente definida (MEYBERG, 1999).

A figura 13 mostra um exemplo de um objeto com faces em forma de um losango. Na figura está representando, junto ao sistema de coordenadas cartesiano convencional, um sistema de coordenadas não cartesiano. Em lugar da base cartesiana  $e_1, e_2, e_3$ , denominada usualmente como  $\vec{i}, \vec{j}$  e  $\vec{k}$ , (MEYBERG, 1999, p. 20), emprega-se aqui uma base correlacionada ao objeto, cujos vetores  $b_1, b_2, b_3$ , de uma maneira natural, coincidem com os cantos característicos de um objeto.

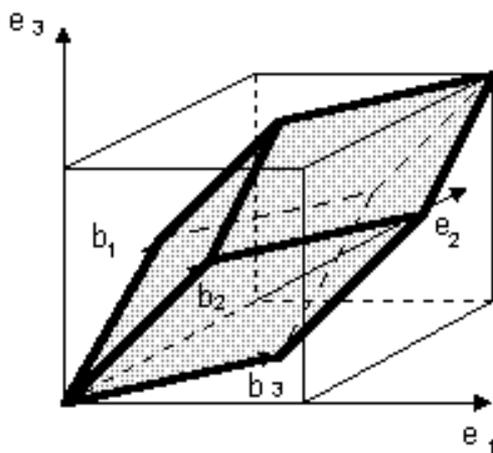


Figura 13 – Arestas de um paralelepípedo formando uma base do  $R^3$ .

A Figura 14 mostra que uma linha de grade poderá ser reproduzida também paralela a um eixo coordenado  $Y$  ( $X/Z$ ) através de planos, os quais não são perpendiculares entre si.

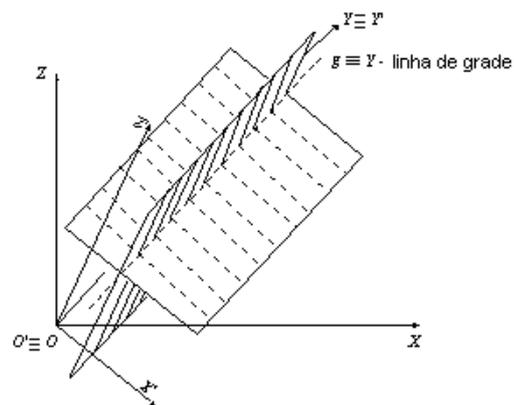


Figura 14 - Exemplo de uma linha de grade  $g$  em um sistema de coordenadas não cartesiano

O sistema de coordenadas não cartesiano pertence a uma classe mais ampla denominada sistemas de coordenadas afim. As novas coordenadas  $R'_p = (X', Y', Z')$  de um ponto  $P \in \mathbb{R}^3$  correlacionam-se com suas coordenadas cartesianas  $R_p = (X, Y, Z)$  através da matriz  $B$ , cujas colunas são os vetores  $b_1, b_2, b_3$ , os quais descrevem, em um sistema cartesiano, as novas direções coordenadas:  $R_p = BR'_p$ . Neste sentido poderão ser representadas linhas de grade em qualquer direção, como sendo retas determinadas pela interseção dos planos coordenados, dois a dois.

### 3.4 Descrição analítica de uma linha de grade

Distinguem-se dois casos:

(a) as linhas de grade são definidas como a interseção de dois planos

Um plano poderá ser definido na forma  $aX + bY + cZ = d$ .

Propositadamente, escolhem-se os parâmetros  $(a, b, c)$  de modo que  $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ , sendo  $\vec{N} = [a, b, c]$  o vetor normal ao plano. Então  $d$  é a distância do plano à origem do sistema de coordenadas.

(b) as linhas de grade são definidas como retas

A representação paramétrica é feita através do vetor de direção unitário  $\vec{M}$  da linha de grade e um ponto sobre a mesma.

O emprego do primeiro ou segundo caso depende do método de procura do ponto de interseção com a superfície do objeto escolhido (DE SEIXAS, 2001).

### 3.5 A menor distância $d$ de um ponto da superfície do objeto à de uma linha de grade

A procura do ponto de interseção de uma linha de grade com a superfície do objeto é realizada iterativamente, considerando-se a menor distância  $d$  de

um ponto a LASER, sobre a superfície, e uma linha de grade. Esta distância será, iterativamente, reduzida(Figura 8).

#### 4. CONCLUSÃO

A exigência do controle de qualidade de superfície 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 polar à base de teodolitos vêm sendo utilizados em várias aplicações industriais, como também no controle de qualidade de superfícies e de objetos.

Neste trabalho foi apresentado um novo método de medição, o qual poderá ser empregado para o levantamento de superfícies de objetos, bem como para a determinação de suas deformações. A materialização dos pontos artificiais, usados como alvos, se baseia no emprego de linhas de grade.

Ao contrário de métodos de determinação tridimensional de objetos já existentes, este novo método é mais econômico e flexível (DE SEIXAS, 2001). As desvantagens quanto ao emprego de marcas (alvos) artificiais e quanto as perdas das informações da medição zero deixam de existir quando é possível observar deformações ao longo de linhas de grade.

A descrição de um objeto será realizada através de pontos de interseção, os quais se encontram sobre linhas de grade pré-definidas em um sistema de coordenadas apropriado. Seu posicionamento será efetuado com ajuda de métodos iterativos. Ao longo destas linhas, realiza-se a análise de deformação, de modo que a partir da mudança de posição do ponto de interseção, em diferentes épocas, será reproduzida a mudança de forma. Embora na verdade estes pontos não sejam visíveis, sendo por causa disso caracterizados como pontos de interseção virtuais, permanece no método das linhas de grade a vantagem, que se pode sempre percorrer pontos sobre as mesmas linhas de grade.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GOTTWALD, R., BERNER, W., **The New KERN “System for Positioning and Automated Coordinate Evaluation” Advanced Technology for Automated 3-D Coordinate Determination.** ASPRS – ACSM Annual Convention, Baltimore (USA), p. 260 – 266, 1987.
- GOTTWALD, R., **Kern E2 – SE , Ein neues Instrument fuer die Industrievermessung?** AVN 4/1987, S. 147 – 154, 1987.

GRUEN, A., **Machine Vision – Elitaerer Forschungsgegenstand oder ein neues interessantes Arbeitsgebiet auch fuer praktizierenden vermessungsingenieurwesen?** AVN Heft 8 – 9, S. 321 – 324, 1992a.

GRUEN, A., **Digitale Nahbereichphotogrammetrie.** AVN, Heft 8 – 9, S. 324 – 343, 1992b.

HAAG, R., **Anwendungen der 3D – Messtechnik in der Industrie.** Ingenieurvermessung, 1988.

HUEP, W., **Konzeption und Einsatzmoeglichkeiten einer automatisierten Theodolitmesssystem.** Ingenieurvermessung, 1988.

HUFFLESS, J., **Laserstrahlsregelung und Optikdiagnostik einer CO2 – Hochleistungslaseranlage.** Fertigungstechnik 33, 1992.

KAHMEN, H., SUHRE, H., **Ein lehrfaehiges Vermessungswesen zur Ueberchung kinematischer Vorgaenge.** ZFV (108), S. 345 – 351, 1983.

KAHMEN, H., **Vermessungskunde,** 19. A, 1997.

KAHMEN, H., DE SEIXAS, A., **Neue Theodolimmessverfahren fuer die Bestimmung von Deformationen an nicht signalisierten Objekten.** Ingenieurvermessung , Muenchen, 2000.

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. Krppatsch.

MEYBERG, K., VACHENAUER, P., **Hoehere Mathematik 1.** 5. Auflage, Springer Verlag, 1999.

ROBERT, T., MOTIFFIT, N., **Kern System for Positioning and Automated Coordinated Evaluation – A Real time System for Industrial measurement.** Technical Papers ASPRS – ACSM Annual Convention, Baltimore (USA), 1987.

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: Opitcal 3-D Measurement Techniques V, editors A. Gruen, H. Kahmen,.

DE SEIXAS, A., **Objektrekonstruktion mittels Gitterlinien-verfahren.** Austria, 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., FERREIRA, T., ROMÃO, V.,  
BOTELHO, F., **Definição de sistemas de  
Referência no controle de qualidade de  
edificações.** In: Novos Desenvolvimentos em  
Ciências Geodésicas, p. 209-224. Curitiba:  
Universidade Federal do Paraná, 2003, editor chefe  
Edson Aparecido Mitshita (Série em Ciências  
Geodésicas, Volume 3).

SHERER, M., **Das Elektronische Tachymeter –  
Universal-Vermessungsinstrument  
der  
Gegenwart?**, S. 292 – 300, AVN 8 – 9, 1988.

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,.

TOMPSETT, M. F. et al., **Change Coupled Imaging  
Devices, Experimental Results.** IEEE Trans  
Electr. Dev., Vol. 18, 1971.

WIESER, A. **Ingenieurgeodätischen  
Überwachungsmessungen  
mit  
Videotheodoliten.** Viena 1995, Diplomarbeit –  
TU.

Recebido em 6 de fevereiro de 2004 – Aceito em 30 de  
dezembro de 2004.