

Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3d a curta Distância

Antonio Maria Garcia Tommaselli, *UNESP Presidente Prudente*

Conteúdo [[esconder](#)]

1. Introdução
2. A técnica fotogramétrica
 - 2.1 Predição de erros para a Fotogrametria no caso normal
3. A tecnologia de varredura a laser
4. Análise comparativa
5. Exemplos de aplicações
6. Perspectivas de uso integrado das tecnologias
7. Referências bibliográficas

▶ [Resumo](#)

1. Introdução

O levantamento tridimensional de pontos no terreno é um problema clássico, que pode ser tratado por distintas metodologias. A mais antiga é o levantamento direto, com a medida de distâncias e direções usando instrumentos topográficos. Esta técnica ganhou significativa eficiência com o advento dos medidores eletrônicos de distâncias e ângulos, instrumentos que integrados, convencionou-se chamar de estações totais. Os medidores a laser foram significativamente melhorados e passaram a realizar a medição de distâncias sem a necessidade de refletores, o que permitiu a determinação remota de coordenadas, sem tocar o objeto. Além disto, o amadurecimento da tecnologia de controle de servo-mecanismos, aplicada aos instrumentos topográficos, assegurou o desenvolvimento da estação total robotizada, que permite a medição programada de pontos, mesmo sem o operador.

A tecnologia de varredura a laser é um aperfeiçoamento destes princípios. Nos últimos anos, os scanners a laser têm sido utilizados em vários tipos de levantamentos terrestres. Na varredura a laser, as distâncias aos objetos são medidas sem a necessidade de refletores e as medidas não são efetuadas em feições específicas, mas em todo o objeto automaticamente, gerando uma nuvem densa de pontos com coordenadas 3D. Existem vários tipos de scanners 3D, variando desde as características do sistema de varredura, passando pelo princípio de medição da distância, até a velocidade e intervalos de medida. A nuvem de pontos medida pelo scanner está no referencial do equipamento e pode ser transformada para o referencial do espaço objeto por meio de uma transformação de corpo rígido, usando como base alvos especiais instalados no campo de varredura do scanner. A exatidão e a quantidade de pontos medidos variam de acordo com o modelo do scanner.

Entre as técnicas para levantamentos 3D, a Fotogrametria teve papel histórico importante, pois foi a técnica que permitiu a produção em massa de documentos cartográficos. A Fotogrametria teve seu desenvolvimento iniciado no século XIX, com alguns experimentos

com imagens tomadas de balões. Nesta época, as dificuldades com a coleta de fotografias aéreas, fomentaram o desenvolvimento de métodos baseados em fotografias terrestres, tomadas com câmaras métricas. Estes métodos eram adaptações dos processos de triseção inversa e intersecção ponto a ponto, usados em Topografia, e propiciaram a compilação de mapas topográficos por Fotogrametria Terrestre. Havia, contudo, uma grande dificuldade na identificação do mesmo ponto em diferentes fotografias, particularmente quando as fotografias fossem tomadas em estações com base muito grande. Por outro lado, a base não poderia ser diminuída, para não comprometer a precisão da intersecção. O problema de identificação de pontos homólogos em duas fotografias foi resolvido com a invenção do estereocomparador por Pulfrich, em 1901, e a introdução do princípio das marcas flutuantes. As aplicações terrestres da Fotogrametria, como o levantamento de monumentos e encostas, também se desenvolveram no período, já que parte da teoria e os instrumentos necessários para a Fotogrametria Terrestre, já eram conhecidos no final do século XIX.

Paradoxalmente, entretanto, este ramo da Fotogrametria sempre teve reduzido número de empresas com uma produção incipiente, quase experimental. Isto se deve a vários fatores, mas principalmente à dificuldade de padronizar o processo, em função das diferentes situações e à diversidade de requisitos de cada problema. Em contrapartida, a Aerofotogrametria, foi durante o século XX a grande responsável pela produção dos documentos cartográficos, graças à rigidez das especificações.

A automação do processo fotogramétrico somente começou a ser incorporada operacionalmente, a partir da década de 1980, com a disponibilidade de plataformas computacionais com relação custo/desempenho compatível com a produção fotogramétrica. Os algoritmos de correlação de imagens, desenvolvidos a partir do final da década de 50, possibilitaram a identificação automática de pontos homólogos, permitindo a automação da coleta de Modelos Digitais de Terreno e de pontos de passagem para a Aerotriangulação ([15] SHENCK, 1999). Os algoritmos de correlação de imagens, base dos processos automáticos, entretanto, funcionam adequadamente somente em imagens com texturas não homogêneas, como é o caso de imagens aéreas. Mesmo nestes casos, há necessidade de supervisão e edição posterior dos modelos 3D gerados, para a eliminação de erros grosseiros, particularmente em áreas urbanas e florestas ([10] MIKHAIL et al, 2001).

Mesmo toda esta tecnologia, que se tornou disponível maciçamente a partir de meados da década de 1990, durante muito tempo o levantamento de plantas industriais para o modelamento 3D de objetos, particularmente em instalações industriais, ficou reduzido ao uso prancheta e trena, a métodos topográficos usando teodolitos e estações totais e, menos freqüentemente, Fotogrametria à curta distância. No Brasil, particularmente, pouco uso da Fotogrametria tem ocorrido para o modelamento de instalações e plantas industriais.

O advento da varredura 3D a laser permitiu a solução de vários dos problemas existentes nestas técnicas já utilizadas, pois reúne a exatidão dos métodos diretos com a possibilidade de geração de milhões de pontos com coordenadas 3D em apenas alguns minutos.

2. A técnica fotogramétrica

A Fotogrametria e a Visão de Máquina, fazem parte das técnicas de mensuração passivas, isto é, que utilizam a luz visível refletida pelos objetos e captada por uma câmara métrica. A Fotogrametria permite a medição de objetos diretamente nas imagens, desde que estes estejam visíveis em, pelo menos, duas imagens tomadas adequadamente. O processo fotogramétrico segue algumas etapas que serão brevemente descritas a seguir.

A primeira etapa é o planejamento do projeto, etapa fundamental para assegurar a obtenção de exatidão compatível com a aplicação. Nesta etapa são definidos os instrumentos a serem usados e, principalmente, a locação aproximada das estações da câmara, para garantir uma configuração geométrica adequada.

A segunda etapa é o trabalho de campo, que consiste na coleta de várias imagens e no estabelecimento de meios para a determinação dos parâmetros de orientação das imagens. Esta orientação pode ser determinada direta ou indiretamente. Nos métodos de determinação direta, os parâmetros (3 coordenadas do Centro Perspectivo e 3 ângulos de orientação) são medidos em campo, usando instrumentos específicos para a coleta, como os fototeodolitos ou as estereocâmaras. Nos processos de determinação indireta é necessário o estabelecimento de uma rede de pontos de apoio. Esta rede deve ser levantada por processos topográficos e possuir alta precisão, pois dela dependerá o resultado final do processo fotogramétrico. Para projetos simples, além dos pontos de apoio, podem ser usadas distâncias para melhorar a exatidão do processo. Vários tipos de câmaras podem ser usadas, mas o processo fotogramétrico rigoroso requer câmaras métricas pré-calibradas. Câmaras não-métricas podem também ser usadas, mas é necessário um processo de auto calibração, que demanda um maior número de pontos de apoio e software específico para esta finalidade.

Cada ponto no espaço objeto a ser medido deve ser visível em duas ou mais imagens, tomadas de pontos de vista distintos. A distância entre as estações (base) é um dos fatores que influenciam severamente a exatidão final do processo fotogramétrico e também um dos problemas, pois nem sempre é possível estacionar a câmara na posição recomendada, em função de obstruções ou de limitações do local. As imagens tomadas devem possuir um certo percentual de superposição, para permitir a reconstrução por intersecção. O percentual ideal, para o caso normal, é de 60% de superposição. Caso sejam tomadas imagens convergentes este percentual pode ser maior, sem comprometer a qualidade geométrica da intersecção de raios, mas as imagens convergentes são de interpretação automática difícil, em função da distorção geométrica introduzida na forma dos objetos e também não permitem a visualização estereoscópica.

A terceira fase do processo é o preparo das fotos para a medição. Se forem usadas câmaras digitais, basta descarregá-las e aplicar algumas técnicas de melhoramento de imagens. No caso de câmaras analógicas, que usam filme, é necessário revelar o filme, digitalizar e realçar as imagens, caso o processo de medição venha a ser digital. Se o processo for executado em reprodutores analógicos ou analíticos, não é necessária a digitalização.

A quarta etapa do processo é a determinação dos parâmetros de orientação interior da câmara, como a distância focal, a posição do ponto principal e as distorções das lentes. No caso de câmaras métricas, estes parâmetros são fornecidos pelo fabricante em um certificado de calibração. No caso de câmaras não métricas, o usuário deve calibrá-las, preferencialmente antes e depois da coleta, para certificar-se de que os parâmetros se mantiveram estáveis. Se a câmara não for estável, então o resultado do processo será confiável apenas sob condições especiais, como o uso de calibração foto-variante, no qual os parâmetros podem variar para cada imagem (ATKINSON, 1996).

A quinta fase do processo fotogramétrico é a determinação indireta das posições e orientações da câmara, chamados de parâmetros de orientação exterior, em todas as estações, processo conhecido como Fototriangulação por feixes perspectivos, ou ajuste em bloco, pois todas as posições e orientações das imagens são calculadas simultaneamente, em conjunto com as coordenadas dos pontos de passagem e pequenas correções às coordenadas dos pontos de apoio.

Esta fase é a mais importante e crítica do processo e pode ser subdividida em vários passos. Inicialmente devem ser fornecidas as posições e orientações aproximadas das estações da câmara e as coordenadas no espaço objeto dos pontos de apoio. Pode-se, então, passar à medição de pontos nas imagens. São medidos os pontos de apoio e de passagem visíveis em cada imagem. Os pontos de passagem são necessários para conectar as várias imagens do bloco e permitir o ajuste dos feixes, ao passo que os pontos de controle permitem a ligação do referencial imagem com o referencial do espaço objeto.

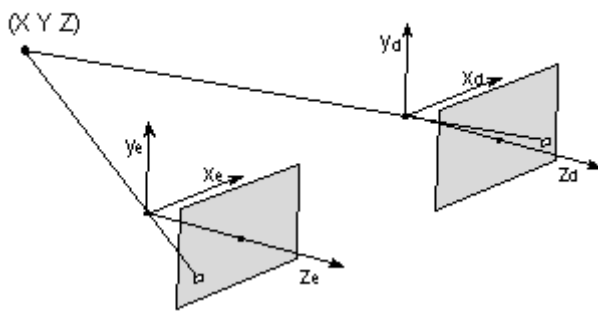


Figura 1 : Princípio da intersecção fotogramétrica

A tarefa de identificação e medição dos pontos de apoio pode ser feita manual ou automaticamente, mas o processo automático exige alvos especiais e algoritmos de reconhecimento de padrões. São necessários, no mínimo 6 pontos de passagem em cada par de imagens. A medição dos pontos de passagem pode ser feita usando algoritmos de correlação de imagens, mas em ambientes de curta distância, como é o caso de instalações industriais, há uma considerável mudança nas características dos objetos pelo efeito da perspectiva e iluminação, o que causa muitas falsas correspondências. A próxima etapa é o cálculo simultâneo dos parâmetros de orientação exterior de todas as imagens que formam o bloco, usando como observações as coordenadas imagem dos pontos de apoio e de passagem, bem como as coordenadas dos pontos de apoio no referencial do espaço objeto. Este cálculo é feito pelo Método dos Mínimos Quadrados e equações de colinearidade linearizadas. A etapa de Fototriangulação pode ser minimizada, ou até mesmo eliminada, se os parâmetros de orientação forem determinados diretamente no campo, durante a coleta das imagens.

Uma vez conhecidos os parâmetros de orientação exterior de todas as imagens, é possível calcular as coordenadas de pontos 3D que aparecem em cada par, usando o princípio da intersecção (Figura 1). Dependendo da aplicação, podem ser restituídos elementos lineares e outras primitivas geométricas 3D ou pode ser extraído um modelo numérico discreto da cena, isto é, uma nuvem de pontos.

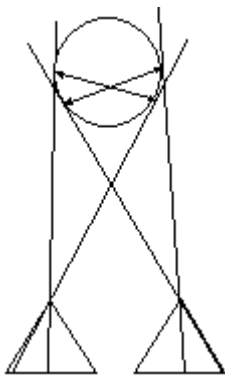


Figure 2 : Nos objetos cilíndricos as bordas visíveis em duas imagens não são as mesmas

No primeiro caso, o operador deverá carregar o par de imagens e identificar a feição a ser desenhada ou a parte a ser modelada, em ambas as imagens. Em alguns casos, o efeito de perspectiva pode alterar as faces visíveis do objeto. No caso de objetos cilíndricos ou esféricos, as bordas visíveis em duas das imagens não serão correspondentes, o que exige

um tratamento analítico específico, que está disponível em poucos sistemas fotogramétricos dedicados (VEXCEL, 2003). Normalmente, os sistemas fotogramétricos estão preparados para trabalhar sobre softwares CAD, podendo usar os comandos destes sistemas. Isto significa que o operador pode selecionar uma primitiva, por exemplo um cilindro, e modelar uma parte da imagem a partir da medida das bordas. Neste caso, não há a necessidade de extrair a nuvem de pontos 3D da área, mas a redundância é pequena e há necessidade do operador realizar manualmente todas as tarefas de identificação e medição (Figura 2).

No segundo caso, deseja-se gerar uma nuvem de pontos e a medição manual de todos os pontos correspondentes seria inviável. Recorre-se à correlação de imagens, que funciona bem no caso aéreo, mas pode apresentar problemas no caso terrestre, como será mostrado.

Uma das características dos métodos passivos, é a necessidade de identificação de pontos homólogos em duas ou mais imagens. Este é um dos fatores que limitam a aplicação de técnicas fotogramétricas automáticas para medições industriais, pois há a necessidade de objetos com texturas não repetitivas, para possibilitar a correspondência automática. Isto pode ser resolvido com a projeção ótica de padrões artificiais, mas isto limita o alcance do método a alguns metros. A alternativa mais usada é a colocação de alvos pré-codificados sobre a superfície, o que restringe o número de pontos a serem determinados a apenas algumas dezenas, gerando uma malha com baixa densidade de pontos. Além disto, os métodos de correspondência mais precisos (*matching* por mínimos quadrados) apresentam um alto custo computacional.

2.1 Predição de erros para a Fotogrametria no caso normal

A precisão das coordenadas Z (profundidade) obtidas pelo processo fotogramétrico, considerando o caso normal – fotografias tomadas com eixos óticos perpendiculares à base -, pode ser determinada pela expressão:

$$d_z = \pm \frac{Z}{B \cdot f} \sqrt{f^2 \cdot d_B^2 + B^2 \cdot d_f^2 + Z^2 \cdot d_{px}^2} \quad (1)$$

onde

- d_z é o erro esperado na profundidade;
- B é a base, isto é, a separação entre as câmaras;
- f é a distância focal;
- d_B é o erro esperado na medida da base;
- d_f é o erro esperado na distância focal da câmara;
- d_{px} é o erro esperado na medida de paralaxe;

A expressão (1) pode ser obtida por propagação de covariâncias a partir das equações de paralaxe para o caso normal (KRAUSS, 1993; ALBERTZ & KREILING, 1989).

Embora a equação (1) seja válida para o caso normal, a ordem de grandeza dos erros é semelhante para casos onde ocorram pequenas variações nos valores dos parâmetros. Pode-se simplificar a equação (1) negligenciando os erros na base e na distância focal:

$$d_z = \pm \frac{Z^2}{B \cdot f} \cdot d_{px} \quad (2)$$

Analisando-se a equação (2) percebe-se que o erro em profundidade varia com o quadrado da distância da câmara ao objeto. Pode-se separar dois elementos importantes nesta equação: a

relação Base/Distância (B/Z) e a escala da fotografia (f/Z). Os melhores resultados em profundidade são obtidos com a relação B/Z próxima a 1.

Erro na medida de paralaxe		Dpx =0.03mm			Dpx =0.01mm			Dpx =0.005mm		
Distância da câmara ao objeto		30 m	50 m	100 m	30 m	50 m	100 m	30 m	50 m	100 m
Base	1 m	284	764	3014	127	291	1044	100	195	583
	10 m	28	76	301	13	29	104	10	20	59
	20 m	14	38	151	7	15	53	5	10	30

A tabela 1 foi calculada considerando parâmetros normais em um projeto fotogramétrico. Foram consideradas distâncias da câmara ao objeto comuns em ambientes industriais. A distância focal de 100mm equivale à da câmara terrestre UMK, da Zeiss Jena, e foram considerados erros nas medidas de paralaxe assemelhados às dimensões do pixel na imagem digitalizada. O caso mais favorável (0.005mm=5µm) pode ser obtido com métodos de correlação subpixel somente em situações especiais (feições bem definidas ou alvos especiais pré-sinalizados) ou com medição sobre o diapositivo analógico em restituidor analítico.

Como já foi destacado, a precisão a ser obtida com o procedimento fotogramétrico é fortemente dependente da configuração, especialmente da relação Base/Distância, da escala da imagem e da precisão com que são medidas as coordenadas na imagem. Para uma relação Base/Distância constante, os erros esperados nas três coordenadas serão diretamente proporcionais à escala das fotografias, o que significa que basta alterar a escala para atingir a precisão desejada (KRAUSS, 1993). Para uma escala das fotografias constante, o erro em Z (profundidade) é inversamente proporcional à relação B/Z.

Da análise do método fotogramétrico, conclui-se que, a exatidão final das coordenadas extraídas por intersecção depende de vários fatores:

- Configuração das câmaras (relação base/distância);
- Escala das fotografias;
- Precisão das medidas de paralaxe ou de coordenadas na imagem, o que depende também de vários parâmetros:
 - Tamanho do pixel na imagem digitalizada;
 - Qualidade geométrica da imagem, que está relacionada ao erro de posicionamento de cada pixel;
 - Característica da textural do objeto a ser medido; caso o objeto tenha textura homogênea os erros serão maiores;
- Qualidade dos parâmetros de orientação interior da câmara e modelamento dos demais erros sistemáticos (distorção das lentes, trabalho do filme);
- Quantidade, distribuição e exatidão dos pontos de apoio;

Pode-se observar que os menores erros nas coordenadas Z dos pontos reconstruídos (7mm e 5mm) somente ocorrem nas situações mais favoráveis (Distância da câmara ao objeto de 30m e base 20m), com relações base/distância de 2/3 e 1, respectivamente.

Alguns destes fatores podem ser controlados em campo, como a relação base/altura, embora possam ocorrer dificuldades de ordem prática para estabelecer a relação ótima. Outros, como, a qualidade da câmara, dependem do equipamento a ser usado. Finalmente, a questão da

mudança de aspecto dos objetos devido à perspectiva pode ser incontornável, devido à própria essência do método fotogramétrico.

Podem ser utilizadas várias imagens simultaneamente para o cálculo das coordenadas da imagem, o que permitiria a minimização dos erros mostrados. O uso de métodos de correlação por mínimos quadrados, que permitem exatidão subpixel, também permite a redução dos erros nos pontos calculados por intersecção fotogramétrica.

3. A tecnologia de varredura a laser

Existem dois tipos principais de scanners a laser: os baseados no princípio da triangulação e os baseados no tempo de retorno do sinal.

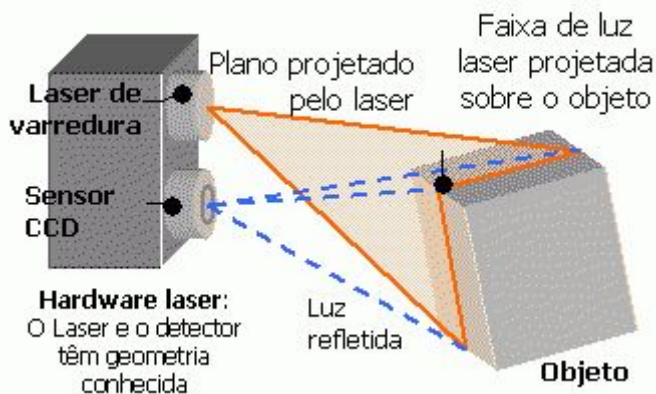


Figura 3 : Scanner baseado no princípio da triangulação

Os scanners baseados no princípio da triangulação possuem uma fonte laser e, no mínimo, um sensor CCD, que captura a luz laser refletida pelo objeto, como mostrado na figura 3. A geometria entre o laser e o sensor CCD é conhecida e permite o cálculo das coordenadas 3D dos pontos iluminados pela luz laser por intersecção. Utiliza-se o mesmo princípio da intersecção fotogramétrica e a precisão da reconstrução do modelo do objeto depende de elementos geométricos semelhantes, como a relação base/distância. Este tipo de sistema é adequado para a reconstrução de objetos pequenos e a distância máxima de operação dependerá da base empregada pelo scanner, como no método fotogramétrico. Como a base é normalmente fixa, há uma distância máxima de operação para a qual a precisão é satisfatória. A exatidão das coordenadas 3D neste tipo de scanner está no nível submilimétrico, dependendo da distância ao objeto (BARBER et al, 2001). As coordenadas calculadas estarão no referencial da base e, para transformá-las para um referencial do espaço objeto deve-se conhecer a orientação da base ou, então, colocar alvos no campo de varredura do scanner. A primeira possibilidade, que equivale à determinação direta da orientação do instrumento, exige a orientação e posicionamento da base em relação ao referencial do espaço objeto, dependendo do modelo do equipamento. Exemplos de scanners deste tipo são os modelos Vivid 910, da Minolta (MINOLTA, 2003) e o S25 da Mensi, que pode medir objetos no intervalo de 2m a 25m, com um desvio padrão de 0,6mm a 5 metros. Outro problema com o método de triangulação, é a identificação do ponto laser refletido pelo objeto e registrado pelo CCD, que pode ser limitada pela iluminação do ambiente e pela distância ao objeto (BARBER et al 2001). Para distâncias maiores outra alternativa é o sistema LiDAR (Light Detection And Ranging) que mede a distância através do tempo de retorno do pulso laser (Time of Flight). Neste sistema de varredura, o instrumento emite milhares de pulsos laser por segundo, normalmente de luz infravermelha. O instrumento mede as distâncias, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe (azimute e elevação), que são

coordenadas polares do ponto, em relação ao referencial do laser (figura 4). A partir destes dados é possível calcular as coordenadas cartesianas 3D dos pontos medidos e sua resposta espectral, que pode ser usada para criar uma imagem semelhante à visível. Com este sistema é, teoricamente, possível trabalhar durante a noite, já que não requer luz visível. O resultado final do processo de medição e processamento é uma nuvem de pontos, que poderia ser chamada, genericamente, de Modelo Numérico de Superfície, ao qual o valor de reflectância também pode ser associado. Os sistemas de varredura a laser são os sucessores das estações totais robotizadas, mas com maior velocidade de coleta e recursos de automação mais avançados.

Os recursos de varredura dos scanners 3D a laser são implementados por meio de espelhos controlados por servomotores. O scanner Cyra 2500 usa espelhos para defletir o feixe laser tanto no eixo vertical quanto no horizontal, permitindo um campo de visada de 40°x40°. Os scanners Calidus e Riels LMS-Z210 usam um prisma para defletir o feixe na vertical, mas rotacionam mecanicamente o scanner no plano horizontal, permitindo uma varredura de 360° para o Callidus e 340° para o Riegl.

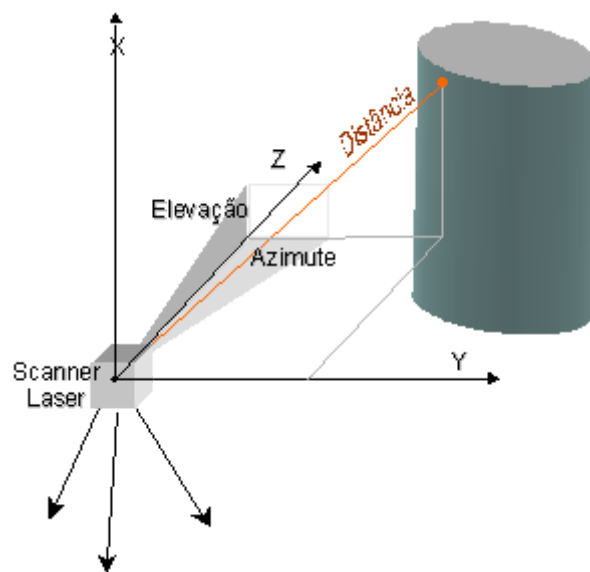


Figura 4 : Elementos geométricos coletados em campo para o cálculo de coordenadas 3D no sistema de varredura a laser (LiDAR)

A resolução da nuvem de pontos, que define o número total e a distância entre os pontos, pode ser estabelecida antes da varredura. Este parâmetro depende do tamanho do menor elemento que se deseja levantar e da distância ao objeto. Dependendo do modelo do scanner, pode-se refazer a varredura de alguns detalhes específicos com maior resolução espacial.

As nuvens de pontos com coordenadas dos pontos no espaço objeto e seus valores de reflectância são coletadas de vários pontos de vista para eliminar as oclusões devido à perspectiva central. Para referenciar estes pontos a um sistema do espaço objeto, são necessários alguns pontos bem definidos, normalmente proporcionados por alvos especiais (pelo menos quatro pontos).

Ao contrário da técnica fotogramétrica, que requer sempre duas estações, no mínimo, a varredura a laser requer somente uma estação para coletar coordenadas dos objetos em verdadeira grandeza.

Um problema comum aos scanners, tanto por triangulação quanto os do tipo LiDAR é a reflectância dos materiais presentes na cena. Se o sinal laser não for refletido adequadamente por um determinado material, não haverá como calcular as coordenadas daquele ponto. Gordon et al (2001) estudaram o comportamento do sistema Cyrax 2400 para alguns tipos de alvos, conforme mostra a figura 5 e observaram que apareciam “buracos” na nuvem de

pontos, correspondentes à alvenaria composta por tijolos cerâmicos vermelhos, ao passo que a argamassa refletia adequadamente o feixe laser. Isto levou os autores a estudar a refletância de alguns materiais (concreto, argamassa, tijolos e um alvo verde fornecido pelo fabricante do scanner) usando um espectrômetro portátil, obtendo as curvas de refletância no intervalo de 400nm a 600nm, mostradas na figura 5. Nesta figura observa-se que a ausência de refletância dos tijolos é explicada pela baixa resposta espectral a 532 nm.

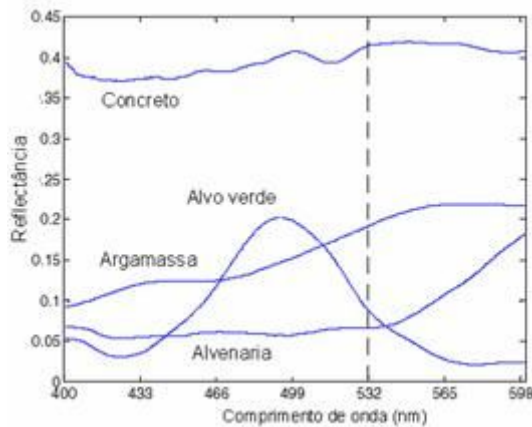


Figura 5 : Assinaturas espectrais de alguns materiais

Fonte: Adaptado de Gordon et al (2001)

Uma característica importante dos scanners do tipo LiDAR é a sua exatidão homogênea em relação à distância do objeto. Enquanto que nos scanners por triangulação ou no processo fotogramétrico, a exatidão diminui com o quadrado da distância, nos scanners LiDAR há uma discreta diminuição da precisão da medida com o aumento da distância. Isto ocorre porque o erro na medida do tempo de retorno não é influenciado significativamente pelo aumento da distância.

Gordon et al (2001) realizaram experimentos com o scanner Cyra 2400, colocando alvos à distância de 8m e de 94 m, e mediram cerca de 4000 pontos em ambos os alvos. Foram ajustados planos pelo Método dos Mínimos Quadrados a ambas as nuvens de pontos, calculando-se o desvio dos pontos em relação planos ajustados. No alvo mais próximo, o erro médio quadrático dos desvios foi de $\pm 3.3\text{mm}$, enquanto que no alvo mais distante o erro médio quadrático dos desvios foi de $\pm 2.4\text{mm}$, provavelmente porque no alvo mais próximo tenha havido alguma saturação no detector ótico do scanner (Gordon et al , 2001). Os valores nominais de exatidão deste scanner são de $\pm 4\text{mm}$ para 50 m e de $\pm 6\text{mm}$ para 100m. Em outro experimento para calibrar o scanner Cyra 240, Gordon et al (2001) concluíram que a exatidão da distância, após o ajuste de superfícies à nuvem de pontos, é da ordem de $\pm 2\text{mm}$, para uma distância de 30m.

Tabela 2 : Características de alguns Scanners 3D a laser do tipo LiDAR

Fontes: Colombo e Marana (2002); Mensi (2003); Optech (2003)

Fabricante	Cyra	Mensi	Optech	Callidus	Riegl	Riegl
Modelo	Cyrax2500 *	GS100	ILRIS-3D	Callidus 1.1	LPM-25H A	LMS-Z210
Precisão na medida de	4mm (a 50m)	6mm	7mm (a 100m)	5mm (a 32m)	8mm	25mm+ (2*D(mm)/100m)mm

profundidade						
Intervalo	1,5-100m 50m (ideal)	2-100m	3-350m	32-80m	80m	2m-350m
Campo de visada	40°x40°	60°x360°	40°x40°	180°x360°	150°x180°	80°x340°
Resolução angular (em graus decimais)	0,00029°	0,0018°	0,0017°	0,0625° (horizontal) 0,25° (vertical)	0,009°	0,005°
Imagem de refletância	sim	sim	sim	não	sim	sim
Taxa de coleta de pontos por segundo (pps)	1000	5000	2000	76 scans/seg	1000	9330

A tabela 2 traz uma síntese das características de alguns scanners 3D do tipo LiDAR. As características mais importantes são a exatidão na medida de distância e o campo de visada, aspectos importantes na seleção do equipamento em função da aplicação.

A varredura a laser apresenta várias características importantes:

- É um método ativo que não depende da luz visível refletida, embora alguns modelos de scanners apresentem comportamento inadequado na ausência total de iluminação;
-
- Operação remota, o que significa que o objeto não precisa ser tocado;
-
- O princípio geométrico de cálculo das coordenadas pode ser a triangulação ou o irradiação, dependendo do modelo, mas em ambos os casos a varredura pode ser feita com apenas uma estação por visada;
-
- A resposta está disponível em tempo real, ou seja, após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, estando apto a fornecer respostas sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies, etc.;
-
- Alta densidade de pontos coletados e, conseqüentemente, altíssima redundância na descrição discreta dos objetos;
-
- É possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, se necessário;
-
- A exatidão das coordenadas é homogênea, ou seja, a qualidade dos pontos depende apenas da distância do laser ao objeto;
-

- Operação *stand-alone* simples e flexível; basta um operador para posicionar e operar o sistema;
-
- É possível combinar vários modelos numéricos gerados de diferentes posições, o que permite cobrir quase toda superfície visível dos objetos;
-
- Alguns sistemas possuem softwares para a obtenção de descrições paramétricas dos objetos por ajuste à nuvem de pontos, o que permite uma exatidão ainda maior que a dos pontos isolados; além disto, devido à alta densidade de pontos as ferramentas automáticas de alguns sistemas fazem a busca pelos pontos pertencentes aos mesmos objetos ou superfícies com pouca interação com o operador, o que aumenta substancialmente a produtividade.

Os scanners a laser têm sido cada vez mais usados em levantamentos terrestres, devido às suas vantagens como: alta velocidade de coleta e processamento dos dados; alta densidade de pontos e exatidão homogênea dos pontos medidos. Na seção 5 serão apresentados alguns exemplos de aplicação da varredura a laser.

4. Análise comparativa

Fotogrametria e Varredura a Laser são técnicas distintas com mesmo objetivo: medir coordenadas 3D de pontos remotos, sem tocá-los.

Uma das diferenças entre estas técnicas é a área útil que pode ser coberta em cada estação. Supondo um ângulo de abertura igual para o feixe e para a câmara, a técnica de varredura a laser permitirá a medição de todos os pontos num intervalo de 1,5m a 100m, dependendo do modelo do scanner. Na Fotogrametria, entretanto, apenas 60% da área projetada será útil, pela necessidade de uma segunda imagem que permita a intersecção fotogramétrica. Se for considerado um bloco, que é a situação mais comum, então, cada imagem avança somente 40%.

Tabela 3 : Cobertura de diferentes câmaras e scanner a laser

Equipamento	Distância focal	Erro na medida de paralaxe	Base	Ângulo de abertura horizontal	Dimensão da cobertura horizontal	Exatidão esperada na distância por ponto isolado
Câmara Zeiss UMK_10/1318	100mm	10 mm	26 m	66°	26 m (modelo)	12 mm
Câmara Digital RolleID 7 Metric	Equivale a 28mm	27 mm	20 m	53°	20 m (modelo)	120 mm
Laser Cyrax 2500	-	-	-	40°	36 m	4 mm

A tabela 3 apresenta uma comparação entre duas câmaras fotogramétricas, uma analógica e outra digital, e o scanner Cyrax, considerando a dimensão horizontal coberta e a exatidão esperada, para um objeto a 50 m de distância do equipamento. No caso fotogramétrico,

considerou-se um recobrimento útil do estereo-modelo de 40%, que seria o avanço de cada base para a montagem de um bloco fotogramétrico. Pode-se verificar que ambas as câmaras proporcionam uma área de cobertura menor do que o scanner, pela necessidade de formar o estereo-modelo. A baixa precisão esperada para a câmara Rollei D7 se deve à sua resolução de 1280x1024 pixels e à distância focal de 28mm. Se forem considerados outros modelos de scanners, com varredura panorâmica, então esta análise de cobertura é ainda mais desfavorável para a técnica fotogramétrica. A exatidão esperada, apresentada na última coluna, foi obtida pela fórmula 2, para o caso das câmaras fotogramétricas, e pelo valor nominal fornecido pelo fabricante, no caso do scanner Cyra.

A análise a seguir leva em conta outros fatores importantes, já discutidos no decorrer do texto, procurando-se comparar as duas tecnologias para aplicações de curta distância.

Exatidão

Fotog. Depende de vários parâmetros e não é homogênea. A exatidão pode ser aumentada aproximando a câmara do objeto, mas isto aumenta o número de imagens a serem processadas, aumentando o tempo de coleta e processamento, o que pode tornar o processo proibitivo. A principal diferença entre a Fotogrametria e os scanners LiDar, refere-se o modelo geométrico de medida, a intersecção (ou triangulação) que depende da configuração adequada dos vários elementos.

Laser Nos sistemas LiDAR a exatidão é homogênea e depende pouca distância ao objeto, sofrendo uma pequena degradação com aumento da distância. Neste caso, a geometria de irradiação não é afetada pela configuração, pois todos os elementos são medidos diretamente. Os sistemas que usam triangulação são afetados pelo aumento da distância de modo similar ao processo fotogramétrico.

TEMPO DE CAPTURA EM CAMPO

Fotog. Alguns minutos por imagem. Na maioria dos casos é necessário colocar e levantar pontos de apoio. Devem ser feitas várias imagens de uma mesma área para cobrir toda a cena.

Laser Alguns minutos por estação. Os pontos de apoio somente precisam ser levantados se houver necessidade de ligação com o referencial do espaço objeto. A superposição entre as varreduras pode ser pequena. Não há diferença substancial no tempo de coleta entre as duas tecnologias.

TEMPO DE PROCESSAMENTO

Fotog. O tempo é maior, com várias etapas antes da modelagem geométrica, que é inteiramente manual, dependente do operador. Se houver necessidade de um modelo numérico discreto, então o tempo é maior, mesmo se for usada a correlação automática, que deve sofrer sempre revisão.

Laser Tempo necessário para a transformação das nuvens de pontos para um referencial comum e para o modelamento geométrico, que pode ser semi-automático, dependendo do sistema. Em algumas aplicações, não há necessidade de modelamento geométrico, sendo usada a nuvem de pontos diretamente. Isto significa que o tempo de processamento é de algumas horas após a coleta.

TEMPO DE RESPOSTA

- Fotog.** Os resultados somente estarão disponíveis após o processamento em gabinete.
- Laser** Resposta em tempo real. A nuvem de pontos, no referencial do sistema está disponível mesmo durante a varredura.

CONTROLE DE QUALIDADE

- Fotog.** Se for usada uma câmara digital, é possível verificar somente a qualidade das imagens, durante a coleta. Somente após o processamento em gabinete é possível controlar a qualidade dos resultados, isto é, as coordenadas 3D. Existem alguns sistemas fotogramétricos que permitem resposta em tempo real, mas limitam-se a reconstruir poucos alvos com características especiais.
- Laser** Controle de qualidade no campo. Após a coleta em cada estação, que é feita em alguns minutos, é possível fazer uma checagem dos dados e refazer a medição, se necessário.

REDUNDÂNCIA

- Fotog.** A redundância pode ser aumentada com aumento do número de imagens da mesma área e a uma menor distância em relação ao objeto, ao custo do aumento dos tempos de coleta e processamento. A geração de uma nuvem de pontos sempre é limitada pelos problemas com os algoritmos de correlação automática. No caso de modelamento geométrico direto, há pouca redundância, pois os objetos geométricos são atribuídos a partir da identificação de feições, como as bordas de uma tubulação. Pode-se coletar várias imagens da mesma área e usar procedimentos de correlação com várias imagens para aumentar a redundância.
- Laser** Alta redundância, pois são coletados milhões de pontos. Um objeto pode ter milhares de pontos que serão usados para ajustar um modelo geométrico que terá melhor exatidão, em razão da minimização dos erros.

FLEXIBILIDADE

- Fotog.** A coleta de imagens pode ser limitada pela profundidade de foco da câmara e pela necessidade de estabelecer uma base compatível com a distância ao objeto. Por outro lado, é possível aproximar a câmara para obter maior exatidão, ou seja, o processo fotogramétrico pode ser ajustado às necessidades de exatidão do projeto
- Laser** Não há restrição à posição do sensor; basta instalar e medir. Não há necessidade de superposição entre sucessivas tomadas, exceto para ligar as nuvens de pontos. Não é possível, contudo, alterar parâmetros de configuração para aumentar a exatidão do sistema.

TEXTURA DO MATERIAL

- Fotog.** As medidas devem ser feitas em feições bem definidas que aparecem em, pelo menos, duas imagens. Superfícies de textura homogênea não são corretamente modeladas pelos algoritmos de correlação.

Laser Não há restrição quanto à textura da superfície. Entretanto, a distância somente será medida se houver adequada reflexão do feixe, o que depende de vários parâmetros, como a orientação e características da superfície, como já foi mostrado. Vários materiais, por outro lado, não refletem suficientemente o feixe laser.

EFEITO DE PERSPECTIVA

Fotog. A diferença de perspectiva entre duas estações cria distorções que podem causar falhas nos algoritmos de correlação e mesmo oclusão de feições. A perspectiva em si não é um erro, mas uma característica da imagem. Quanto maior o ângulo de abertura da câmara (distância focal menor) mais severo será o efeito de perspectiva.

Laser Não há efeito de perspectiva, uma vez que o resultado da coleta é uma nuvem de pontos com coordenadas em verdadeira grandeza, no referencial do sensor. Haverá a oclusão dos objetos que não forem visíveis, do mesmo modo que no processo fotogramétrico.

ILUMINAÇÃO

Fotog. Trabalha com luz visível, sendo necessária luz solar ou iluminação artificial. Podem ocorrer sombras que interferem na visualização e na correlação automática.

Laser Como é um sensor ativo, que emite a própria radiação, não há necessidade de luz visível e, portanto, não ocorrem sombras, apenas a oclusão normal da face não visível do objeto. Devido às características do laser, alguns sistemas não apresentam resposta adequada na ausência total de iluminação.

MOVIMENTOS OU VIBRAÇÕES

Fotog. No processo fotogramétrico a imagem é capturada instantaneamente, não havendo nenhum problema com o movimento de objetos ou da própria plataforma de coleta.

Laser Não pode ocorrer movimento na plataforma de coleta ou nos objetos da cena, porque a posição da fonte é alterada, deformando a nuvem de pontos. Vibrações também ocasionam erros na varredura.

DENSIDADE DE COLETA

Fotog. Todos os pontos visíveis são registrados e a densidade de pontos na imagem depende apenas das resoluções do filme e do scanner que irá digitalizar a imagem ou da resolução do CCD, no caso de câmara digital. A densidade da nuvem de pontos no espaço objeto pode ser definida no gabinete e será sempre mais grosseira que a resolução da imagem.

Laser São registrados apenas os pontos nos quais o laser fizer a medida de distância. Os pontos intermediários são interpolados. Durante a coleta é possível selecionar áreas específicas e aumentar a densidade de pontos. Após a coleta, entretanto, não é possível mudar a resolução da nuvem de pontos, exceto por interpolação.

TRADIÇÃO

Fotog. A Fotogrametria é uma tecnologia conhecida, embora o caso terrestre seja de difícil padronização em função das diferentes características de cada problema. Existem várias alternativas de câmaras métricas e não métricas bem como sistemas para o processamento dos dados, que permitem atender à várias aplicações a um custo menor.

Laser É uma tecnologia emergente, e seu uso deverá crescer substancialmente nos próximos anos.

5. Exemplos de aplicações

Existem várias aplicações que requerem medidas 3D de objetos e superfícies que podem ser atendidas tanto pelas técnicas fotogramétricas quanto pela nova tecnologia laser. Algumas delas, entretanto, dados os requisitos de rapidez, exatidão e necessidade de uma grande nuvem de pontos, são mais bem atendidas pela varredura a laser. Nesta seção serão descritas algumas destas aplicações.

Uma das aplicações é o levantamento *as-built* para atualização ou reforma de plantas industriais. A varredura a laser permite a posterior conversão de segmentos da nuvem de pontos em elementos geométricos por meio de softwares especialistas. Um dos exemplos de aplicação é o de plataformas marítimas, nas quais as operações de inserção de novos elementos assumem elevados riscos, agravados pela inexistência de informações de *as-built* confiáveis. O método convencional usado em algumas plataformas é o de medida direta, com trenas e outros dispositivos, técnica que possui grande probabilidade de erros grosseiros e erros randômicos da ordem de 3 cm a 15cm. Uma das vantagens da tecnologia de varredura a laser é que a nuvem de pontos gerada em campo, pode ser confrontada com os projetos de novas instalações para a detecção de interferências, o que reduz riscos e custos com a adaptação de componentes não adequados. Além disto, a exatidão desta tecnologia reduz sensivelmente os riscos de interferências não detectadas por erros de modelagem. Deste modo, os componentes e peças podem ser pré-fabricados em terra e apenas montados na plataforma, sem soldas e outras operações de risco, o que reduz substancialmente os custos com a interrupção da produção ou acidentes eventuais. A nuvem de pontos coletada permite que a interferência seja evitada com a mudança prévia do projeto (SANDERS, 2001).

A nuvem de pontos coletada em campo, mesmo sem o posterior modelamento geométrico, é uma informação útil porque preserva todos os dados originais, como tubos, fiação elétrica, iluminação, etc., e evita que o projetista tenha que decidir quais partes modelar. Além disto, a nuvem de pontos originalmente coletada, contém todas as imperfeições reais das partes, como falta de verticalidade ou desvios laterais, que poderiam ser mascarados ao ajustar uma primitiva geométrica.

A tecnologia laser pode ser empregada para o levantamento de linhas de transmissão (3DLASERMAPPING, 2002), rodovias, ferrovias, monumentos históricos (BARBER et al, 2001), sítios arqueológicos, grandes estruturas como aeronaves e navios, pontes, sítios para animações na indústria cinematográfica, monitoramento de estruturas, controle de qualidade na indústria, engenharia reversa, aplicações médicas, etc...

Os exemplos de aplicações citados, também podem ser tratados com técnicas fotogramétricas. Os exemplos a seguir mostram aplicações das técnicas fotogramétricas, embora não seja possível comparar diretamente as tecnologias nestes casos, pois isto demandaria estudos de casos. Alguns exemplos de aplicações podem ser encontrados em Vexcel (2003).

6. Perspectivas de uso integrado das tecnologias

A alternativa mais atrativa para emprego das tecnologias laser e fotogramétrica, é a combinação de ambas, num processo cooperativo, o que já vem sendo desenvolvido operacionalmente (HASHEMI & ANDERSON, 2001). Situações onde a varredura a laser possa falhar, como objetos em movimento, podem ser atendidas pela Fotogrametria. Em algumas plantas industriais pode ser impraticável instalar o sensor laser próximo a pequenos objetos, o que poderia ser feito com pequenas câmaras digitais, mesmo com bases curtas.

Outra possibilidade de emprego integrado de ambas as técnicas é a fusão da imagem visível da câmara digital com o modelo numérico gerado pela varredura a laser, para criar um modelo 3D completo, incluindo, além das coordenadas, também as características visíveis do material. Isto já vem sendo feito na área de Realidade Virtual, com passeios virtuais em cidades modeladas computacionalmente, a partir de mapas e de imagens das fachadas das edificações. O mesmo pode ser feito para instalações industriais, proporcionando realismo e confiabilidade aos levantamentos e modelos a partir deles gerados. Além disto, a existência de imagens visíveis dos objetos permite refazer o modelamento tantas vezes quantas necessárias, aumentando o grau de detalhamento de acordo com a necessidade do usuário. O modelo estereoscópico pode ser visualizado em conjunto com a nuvem de pontos, o que permite o controle de qualidade do processo.

O advento da varredura laser 3D abre uma avenida de oportunidades para a solução de problemas para os quais a técnica fotogramétrica isoladamente era inadequada, com custos ou tempo de resposta elevados. A constante evolução da tecnologia a laser, por outro lado, faz prever o aumento rápido da exatidão e da densidade de amostragem passíveis de serem obtidos com estas técnicas. É possível prever a redução dos custos e o aumento da qualidade dos equipamentos, podendo-se fazer uma analogia com os scanners óticos, que passaram, em menos de 10 anos, de equipamentos altamente especializados e de alto custo, a eletrodoméstico disponível em residências.

Uma tendência é integrar os scanners a laser com GPS e outros sensores de modo a obter a nuvem de pontos georeferenciada e orientada, reduzindo a necessidade de registro usando alvos.

A técnica fotogramétrica também se beneficiará com o advento de câmaras digitais de resolução maior, que propiciam um aumento de exatidão e produtividade. A condução do processo fotogramétrico, entretanto, sempre será mais complexa e menos automatizada do que a varredura a laser, necessitando de recursos humanos mais especializados.

7. Referências bibliográficas

- [1] Albertz,J; Kreiling,W.: *Photogrammetric Guide*, Ed.Wichmann, Karlsruhe 1989
- [2] Atkinson,K.B.: *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, 1996
- [3] Barber,D.; Mills,J.; Bryan,P.: *Laser Scanning and Photogrammetry: 21st Century Metrology*,In: CIPA 2001 International Symposium. Surveying and Documentation of Historic Buildings - Monuments - Sites Traditional and Modern Methods, Proceedings, Germany, 2001
- [4] Colombo,L.; Marana,B.: *3D Building Model using Laser Scanning*, GIM International, Maio 2002

- [5] CYRA: *Cyrax 2500: Product Specifications*, Oakland, CA, EUA, 2002. Disponível em <http://www.cyra.com>, Acesso em 11 nov. 2002
- [6] Gordon,S.; Lichti,D.; Stewart,M.: *Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements*, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Proceedings. Orange, California, USA, p. 23-32, 2001
- [7] Hashemi,M.; Anderson,E.: *Laser Scanning takes 3D-CAD to new dimensions*, Chemical Engineering, p. 72-79, Aug. 2001
- [8] Kraus,K.: *Photogrammetry: Fundamental and Standard Processes*, V.1. Benn, 397 p., Dümmler, Bonn 1993
- [9] MENSİ: *GS100: Three Dimensional Value, Efficiency, Quality, & Versatility*, Fontenay-sous-Bois, France, 2003. Disponível em <http://www.mensi.com>, Acesso em 27 jun. 2003
- [10] MIKHAIL,E.M., BETHEL,J.S. MCGLONE,J.C.: *Introduction to Modern Photogrammetry*, Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York 2001
- [11] MINOLTA: *Vivid 910 Non-contact 3-D Digitizer*, 2003, Disponível em <http://www.minoltausa.com>, Acesso em 27 jun. 2003
- [12] Optech: *ILRIS-3D Features and Benefits*, Toronto, ON, Canada, 2003 Disponível em <http://www.optech.on.ca>, Acesso em 27 jun. 2003
- [13] ROLLEI: *Rollei d-flex: Rollei goes digital*, Braunschweig, Germany. 2002, Disponível em <http://www.rollei.de>, Acesso em 25 nov. 2002
- [14] Sanders,F.H.: *3D scanning helps Chevron revamp platform*, Oil & Gas Journal, p.92-98, April 2001
- [15] Schenk,T.: *Digital Photogrammetry*, TerraScience, 428 p., 1999
- [16] Vexcel: *FotoG application examples*, Boulder, Colorado, EUA, 2003. Disponível em: <http://www.vexcel.com/fotog/project.html>, Acesso em 13 ago. 2003
- [17] Vexcel: *What is close-range photogrammetry*, Boulder, Colorado, EUA, 2003, Disponível em <http://www.vexcel.com/fotog/learn.html>, Acesso em 13 ago. 2003
- [18] 3DLASERMAPPING: *Laser Measurement Technology & Software*, 2002, Disponível em <http://www.3dlasermapping.com/index.htm>, Acesso em 4 nov. 2002