



Avaliação da Aplicação e Eficácia de Métodos de Medição Geodésicos e Topográficos nos Levantamentos de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas de Risco
Evaluation of the Application and Efficacy of Geodetic and Topographic Methods in Inclined Land Surveys Susceptible to Risk Areas

Welisson José dos Santos¹; Andréa de Seixas¹ & Sylvana Melo dos Santos²

¹Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Cartográfica, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária - Recife - 50740-530, Brasil.

²Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária - Recife - 50740-530, Brasil. E-mails: welissonsantos93@gmail.com; aseixas@ufpe.br; sylvana.ufpe@gmail.com

Recebido em: 12/06/2019 Aprovado em: 20/08/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_267_283

Resumo

O estudo e a análise de terrenos inclinados susceptíveis a áreas de risco exigem por parte dos setores responsáveis por seu acompanhamento um elevado grau de atenção. O desenvolvimento de metodologias de prevenção, monitoramento e contenção nessas localidades é de extrema importância e exige uma medição periódica e/ou contínua. Pretende-se neste trabalho apresentar os resultados da análise de métodos geodésicos/topográficos aplicados em um terreno inclinado, a partir da implantação de estruturas geodésicas tridimensionais, utilizando diferentes métodos de levantamentos topográficos e geodésicos, levando-se em consideração a aplicabilidade e a eficácia de tais métodos nessas localidades. Dentre os métodos aplicados, destacam-se o nivelamento geométrico de alta precisão, nivelamento trigonométrico, interseção a ré, interseção a vante e o método de posicionamento GNSS/RTK – Global Navigation Satellite System/Real Time Kinematic. A acurácia altimétrica do nível digital empregado foi verificada através das orientações da Norma ISO 17123-2 (ISO, 2001). Os experimentos foram realizados nas adjacências da Igreja Nossa Senhora do Carmo, localizada no Sítio Histórico de Olinda em Pernambuco entre os meses de janeiro e fevereiro de 2017. O terreno inclinado foi discretizado por pontos-objeto dispostos ao longo de três setores da escadaria da igreja, formando uma malha quadriculada composta por 68 pontos com espaçamentos de 40 cm no primeiro e segundo setor e de 80 cm no terceiro, formando, respectivamente, uma malha quadrangular em cada setor medido. Os resultados encontrados através da aplicação dos métodos de levantamentos geodésicos/topográficos estão dentro dos limites de precisão e acurácia esperados, deste modo foi possível expor as vantagens e desvantagens entre a aplicação de um método ou outro. Por fim é possível afirmar que as metodologias e os métodos empregados neste trabalho podem ser desenvolvidas em áreas com graus de risco mais elevados, em operações que envolvam desde medidas preventivas como o monitoramento de encostas a medidas corretivas, como a execução de obras de terraplenagem, no entanto, para que a metodologia tenha êxito no cumprimento de seus objetivos, deve-se levar em consideração as características do local a ser estudado.

Palavras-chave: Terrenos inclinados; Estruturas Geodésicas; Métodos de levantamentos geodésicos/topográficos.

Abstract

The study and analysis of inclined terrains susceptible to risk areas requires a high degree of attention from the sectors responsible for their monitoring. The development of methodologies for prevention, monitoring and containment in these locations is extremely important and requires periodic and/or continuous measurement. This paper intends to present the results of the analysis of geodetic / topographic methods applied in a inclined terrain, from the implantation of three-dimensional geodesic structures, using different topographic and geodetic survey methods, taking into account the applicability and effectiveness of such methods in these localities. Among the applied methods, stands out High-precision geometric leveling, trigonometric leveling, reverse intersection, forward intersection and the GNSS / RTK positioning method - Global Navigation Satellite System / Real Time Kinematic. The altimetric accuracy of the digital level used was verified through the guidelines of the standard ISO 17123-2 (ISO, 2001). The experiments were conducted in the vicinity of Nossa Senhora do Carmo Church, located in the Historical Site of Olinda in Pernambuco between January and February 2017. The inclined terrain was discretized by object points arranged along three sectors of the church staircase, forming a square mesh composed of 68 points with spacings of 40 cm in the first and second sector and of 80 cm in the third, forming, respectively, a quadrangular mesh in each measured sector. The results obtained through the application of geodetic / topographic survey methods are within the limits of precision and accuracy expected, in this way it was possible to expose the advantages and disadvantages between the application of one method or another. Finally, it is possible to affirm that the methodologies and methods used in this paper can be developed in areas with higher degrees of risk, in operations involving since preventive measures such as the monitoring of slopes to corrective measures, such as the execution of earthworks, however, for the methodology to be successful in achieving its objectives, it is necessary to take into account the characteristics of the site to be studied.

Keywords: Inclined Terrains; Geodetic Structures; Methods of geodetic / topographic surveys.

1 Introdução

O crescimento desordenado das cidades brasileiras aliado a falta de políticas de ocupação urbana, obrigou boa parte da população brasileira, no geral os mais pobres, a ocuparem terrenos íngremes localizados na grande maioria das vezes nas periferias dos centros urbanos. A comunidade científica costuma nomear estas localidades através do termo áreas de risco, pois seus habitantes estão expostos a fenômenos, que podem lhes causar efeitos prejudiciais, como o comprometimento de sua integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Tais fenômenos podem ter causas naturais ou induzidas.

Segundo Varnés (1984), a avaliação do risco em uma determinada situação deve levar em consideração critérios como a suscetibilidade da área ao tipo de desastre em foco, o perigo potencial, o grau de exposição e a vulnerabilidade dos sistemas encontrados no local estudado. Cabe ao poder público realizar a gestão destas localidades definindo os graus de exposição ao risco que as pessoas estão submetidas e a partir daí pôr em prática medidas que tenham como meta prevenir, mitigar ou até mesmo conter os riscos sob os quais os habitantes destas localidades estão sujeitos. Na prática a gestão de áreas de risco no Brasil exige um esforço gigantesco por parte dos órgãos governamentais e devido às dimensões continentais do nosso país e sua volumosa população nem sempre é possível realizar o monitoramento destas localidades com eficiência, visto o alto número de casos de fenômenos de movimentação gravitacional de massas, que ocorrem principalmente em épocas de pluviosidades volumosas.

Acidentes de proporções gigantescas podem ser evitados a partir da correta identificação e caracterização de áreas de risco e o sucesso destes estudos exige uma ampla interdisciplinaridade entre as Ciências Exatas e Humanas, sendo necessário destacar o papel vital exercido pela Engenharia, que por meio de ciências, como a Geodésia, a Topografia, a Geotecnia, a Fotogrametria e o Sensoriamento Remoto, proporcionam a aquisição de dados técnicos geoespaciais essenciais para a geração de produtos precisos e acurados acerca da localidade estudada.

É notável que a qualidade dos dados coletados por essas ciências atingiu padrões de excelência admiráveis nos últimos anos, tal fato, deve-se prin-

cipalmente ao amplo desenvolvimento da eletrônica, da informática e do setor espacial ocorrido a partir da segunda metade do século 20, fatores que impulsionaram o avanço da instrumentação e das metodologias usadas para a coleta de dados acerca da superfície terrestre. Tem-se presenciado nos últimos anos a consolidação de diversas Geotecnologias, como, por exemplo, receptores GNSS, estações totais robotizadas, níveis digitais, sistemas de sensores orbitais, sistemas Light detection and ranging – LiDAR, veículos aéreos não tripulados – VANT, câmeras fotogramétricas digitais, dentre outras.

Neste trabalho serão abordados através da aplicação de diferentes Métodos de Levantamentos Topográficos e Geodésicos, o desenvolvimento de metodologias de caráter preventivo, que possam ser utilizadas em atividades, que envolvam a definição das características topográficas e geotécnicas em áreas de risco. Os Métodos de Medição topográficos e geodésicos empregados, envolveram em suma a materialização de estruturas geodésicas compostas por pontos de referência e pontos-objeto em um terreno inclinado, localizado nos arredores da Igreja Nossa Senhora do Carmo no Sítio Histórico do Município de Olinda – Pernambuco. A correta definição e acompanhamento destas estruturas garante a acurácia dos dados técnicos adquiridos e a utilização de diferentes métodos de medição terrestres e permite a realização de comparações qualitativas e quantitativas, onde fatores como a minimização dos custos, redução do tempo de coleta e o atendimento aos padrões de qualidade posicional de acordo com os equipamentos empregados são levados em consideração.

Neste trabalho, dar-se-á ênfase aos métodos de medição executados com o emprego de estações totais, níveis digitais e receptores GNSS, aonde requer a materialização dos pontos-objeto e sua vinculação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

2 Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas de Risco

De acordo com Farah (2003) sob o ponto de vista geométrico um terreno inclinado apresenta as seguintes características:

Inclinação (α): é o ângulo, expresso em graus, formado pelo plano horizontal e o plano médio do terreno inclinado;

Amplitude (H): é a diferença de cotas verificada entre o topo e a base da encosta;

Declividade (D): é a relação, expressa em porcentagem, entre a amplitude e o comprimento da projeção horizontal da encosta. Seu valor em percentual é apresentado na Equação 01;

$$D=100 \times \frac{H}{L} \quad (01)$$

Onde: H = Amplitude;

L = Comprimento da projeção horizontal da encosta.

Perfil: é a característica de variação da declividade da encosta ao longo de sua seção transversal.

Um fenômeno natural de frequente ocorrência em terrenos inclinados é a movimentação gravitacional de massa, que segundo Bates & Jackson (1987), consiste na movimentação para baixo de materiais rochosos e terrosos em grande quantidade, devido a influência da força gravitacional. Uma das classificações para movimentos gravitacionais de massa com maior aceitação mundial é dada em Varnés (1978), segundo a qual os movimentos gravitacionais subdividem-se em: quedas, tombamentos, espalhamentos, escorregamentos e escoamentos. Apesar desta classificação ter ampla aceitação mundial, de acordo com Augusto Filho (1994) estes movimentos podem apresentar características peculiares a cada localidade e por isso classificações de caráter regional podem ser encontradas nas literaturas. Um exemplo disso é a classificação com base no tipo de movimento, proposta por Augusto Filho (1992) que está adequada a realidade dos movimentos observados no Brasil.

A avaliação da estabilidade de terrenos inclinados permite identificar os riscos potenciais que determinada localidade pode sofrer com a ocorrência de movimentos de massa de acordo com Farah (2003), tal avaliação é condicionada concomitantemente a três fatores naturais, sendo eles: características geométricas, características geológicas (tipos de solos e rochas que a compõem), ambiente fisiográfico

(abrangendo clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, dentre outras). Qualquer alteração em uma destas características pode modificar as condições de estabilidade do local, alterando o grau de risco para as edificações presentes na área, e possibilitando a ocorrência de movimentos de massa.

2.2 Gerenciamento e Gestão de Áreas de Risco

De acordo com a Organização das Nações Unidas - ONU (2004) avaliar e gerir riscos envolve a aquisição de conhecimentos qualitativos e quantitativos do risco e de seus fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais. Estas informações devem ser usadas sistematicamente para determinar a probabilidade de ocorrência de um evento, sua magnitude e suas consequências. A aquisição destas informações geralmente se dá pela adoção da seguinte rotina:

- 1) identificar a natureza, localização, intensidade e probabilidade de uma ameaça;
- 2) determinar a existência e o grau de vulnerabilidades e exposição a essas ameaças;
- 3) identificar as capacidades e recursos disponíveis para enfrentar ou gerenciar ameaças;
- 4) determinar níveis aceitáveis de risco.

Levantamentos de riscos realizados em encostas de vários municípios brasileiros indicam que, em todos eles, a falta de infraestrutura urbana é uma das principais causas dos fenômenos de deslizamentos no Brasil. Dessa forma, uma política eficiente de prevenção de riscos de deslizamentos em encostas deve considerar como áreas prioritárias de atuação os assentamentos precários e deve também fazer parte das políticas municipais de habitação, saneamento e planejamento urbano Carvalho & Galvão (2006). Em nosso país infelizmente as sucessivas trocas de administrações no poder público refletem por muitas vezes a descontinuidade de projetos que poderiam evitar gastos desnecessários como a adoção de medidas corretivas muitas vezes com custos elevados, prejuízos sociais, econômicos, materiais e a mais grave consequência de todas que é a perda de vidas humanas.

É evidente que a determinação do grau de risco presente em uma determinada localidade leva em consideração diversos fatores além da Topografia e da Geodésia, no entanto como neste trabalho o enfoque maior é dado para essas ciências, a Tabela 1 apresenta uma metodologia desenvolvida em Alheiros (1998) apud Bandeira (2003), para a determinação do grau de risco na ocupação de encostas em Recife – PE, levando em consideração a Topografia de tais encostas. Essa classificação é de extrema importância para a definição de medidas de prevenção, contenção e monitoramento. A área de estudo analisada neste trabalho sob o ponto de vista desta metodologia é classificada como de baixo risco, uma vez que possui 7 metros de altura, 34 metros de comprimento, declividade de 20% e perfil retilíneo.

Graus de Risco	Atributos	Altura (m)	Extensão (m)	Declividade (%)	Perfil	Morfologia (m)
Muito Baixo	1	<5	<100	<20	Côncavo	Convexa
Baixo	2	5-10	100-250	20-30	Retilíneo	Retilínea
Mediano	3	10-20	250-350	30-40	Côncavo-convexa	Sinuosa
Alto	4	20-30	350-500	40-50	Convexo	Côncava
Muito alto	5	>30	>500	>50	Convexo	Côncava

Tabela 1 Atributos por Graus de Risco, Segundo Fatores Topográficos.

3 Metodologia

3.1 Área de Estudo e Materiais

A área de estudo está localizada no Sítio Histórico de Olinda – Pernambuco, a Igreja Nossa Senhora do Carmo é considerada a mais antiga igreja da ordem dos Carmelitas na América. A localidade foi escolhida devido ao fato de apresentar pontos de referência pré-existentes, que facilitaram o desenvolvimento dos métodos de levantamentos topográficos e geodésicos empregados neste trabalho. Além disso, o relevo relativamente inclinado da área permite a discussão do tema aplicada em terrenos inclinados susceptíveis a áreas de risco.

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos, acessórios e softwares:

02 Estações totais Topcon GPT-3200N: precisão angular de 5” e precisão linear de 5mm + 5ppm*D;

01 Nível Topcon ATB4: precisão de 2 mm por duplo Quilômetro nivelado;

01 Nível digital Leica DNA-03: precisão de 0,3 mm por duplo Quilômetro nivelado;

01 Mira de invar de 2 metros de código de barras Leica;

01 Mira de invar de 4m de alumínio e de encaixe

02 Receptores GNSS Topcon Hiper L1/L2: Precisão horizontal de 3 mm + 0,5 ppm e Precisão vertical de 5mm + 0,5 ppm;

Softwares: AstGeoTop 2017, Garnés, (2017), Adjust Wolf e Ghilani (2006), Matlab 8.1.

3.2 Procedimento Metodológico

As operações de campo foram iniciadas em novembro de 2016 através da definição de pontos de referência. Aqui cabe ressaltar que através do levantamento bibliográfico realizado preliminarmente, destacam-se os trabalhos que abordam sobre as estruturas geodésicas pré-existentes e implantadas anteriormente, de Gama (2008), Gama *et al.* (2012), Souza (2012), Seixas *et al.* (2014), Seixas *et al.* (2014), Santana Neto (2015), Santana Neto & Seixas (2017) e Gomes (2016).

Neste trabalho, deu-se continuidade as implantações de pontos de referência interligando-os aos pré-existentes. Os novos pontos de referência foram implantados através da utilização dos seguintes métodos: interseção a ré, nivelamento trigonométrico, nivelamento geométrico e *GNSS/RTK*, os três primeiros são descritos em Kahmen & Faig (1988) ao passo que o último é detalhado em Monico (2008).

A definição do terreno inclinado através da implantação de um campo de pontos-objeto em sua superfície ocorreu paralelamente à definição do campo de pontos de referência, ficando estabelecido durante as operações de reconhecimento de campo,

ainda em novembro de 2016, que a escadaria localizada em frente à Igreja Nossa Senhora do Carmo, por possuir uma relativa declividade e permitir a implantação estável de vértices em sua superfície, representava um meio viável para a aplicação de métodos de levantamentos topográficos e geodésicos voltados para o acompanhamento de terrenos inclinados susceptíveis a áreas de risco. A definição dos pontos-objeto foi realizada através dos seguintes métodos de levantamento: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, interseção a vante e *GNSS/RTK* a partir de uma quadriculação do terreno. As operações de campo foram finalizadas em janeiro e fevereiro de 2017.

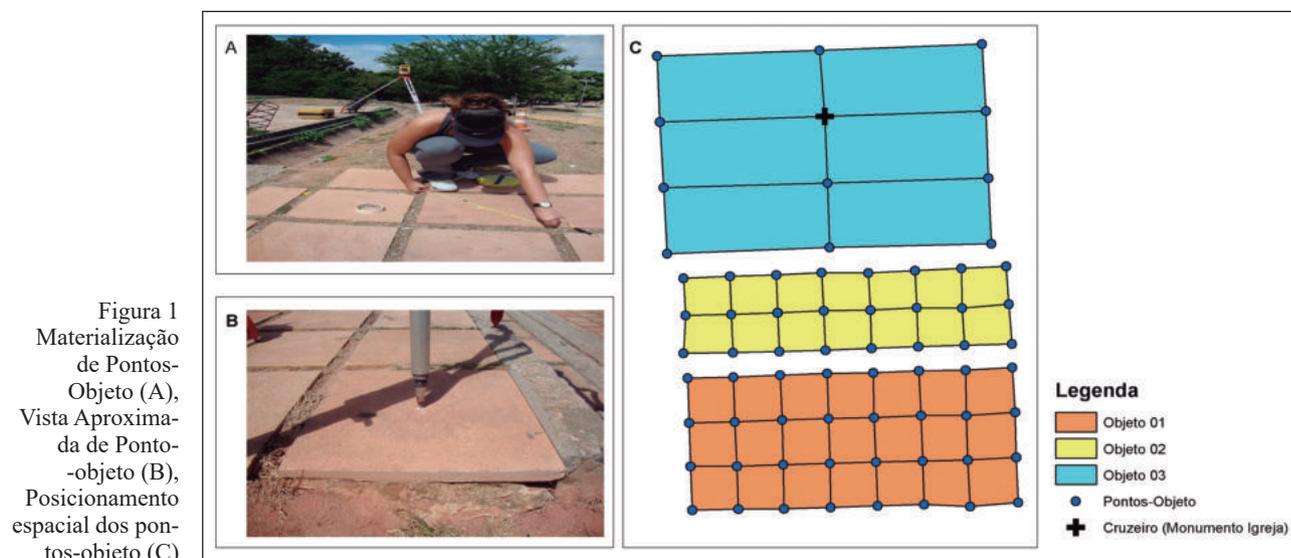
Ressalta-se nesta etapa que apesar da Igreja Nossa Senhora do Carmo possuir aos seus arredores uma encosta em estado natural, a materialização de pontos-objeto diretamente nesta superfície não foi possível, visto que o local assim como todo o Sítio Histórico de Olinda é tombado pelo IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Assim, neste trabalho, os pontos-objeto foram fixados sobre as lajotas da escadaria a partir de marcações gráficas realizadas em uma fita adesiva, posteriormente colocada sobre os pontos médios destas lajotas. Vale ressaltar que devido à grande extensão da escadaria apenas foram materializados pontos-objeto em três setores específicos aqui denominados como objeto 01, objeto 02 e objeto 03, estes setores estão localizados na parte superior da escadaria nas proximidades da cruz fixada em frente à Igreja.

A distribuição espacial dos pontos-objeto ao longo dos três setores formou quadriculados de 80 cm nos objetos 01 e 02 e de 160 cm no objeto 03 Santos (2017) e Santos *et al.* (2018). Na Figura 1 é possível visualizar detalhes acerca da materialização e da distribuição espacial dos pontos-objeto materializados, enquanto na Figura 2 é possível visualizar através de um fluxograma detalhes acerca dos procedimentos metodológicos realizados durante a execução do trabalho.

3.3 Estruturas Geodésicas Tridimensionais

A definição de estruturas geodésicas tridimensionais é uma das etapas iniciais na execução de projetos de infraestrutura relacionados à Engenharia. Tais estruturas são definidas de acordo com Santos (1999) como uma malha de vértices, monumentados no terreno, conectados entre si através de observações.

A estrutura geodésica tridimensional materializada neste trabalho levou em consideração 75 vértices, dentre os quais 7 pontos de referência que serviram como base para determinação das coordenadas planimétricas e altimétricas dos 68 pontos-objeto levantados, estes últimos com a finalidade de descrever em detalhes as características de um terreno inclinado representado, nesse caso, pela escadaria da Igreja N.S. do Carmo. Na Figura 3 é possível visualizar através de um esboço ilustrativo a estrutura geodésica implantada.



Avaliação da Aplicação e Eficácia de Métodos de Medição Geodésicos e Topográficos nos Levantamentos de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas de Risco
Welisson José dos Santos; Andréa de Seixas & Sylvana Melo dos Santos

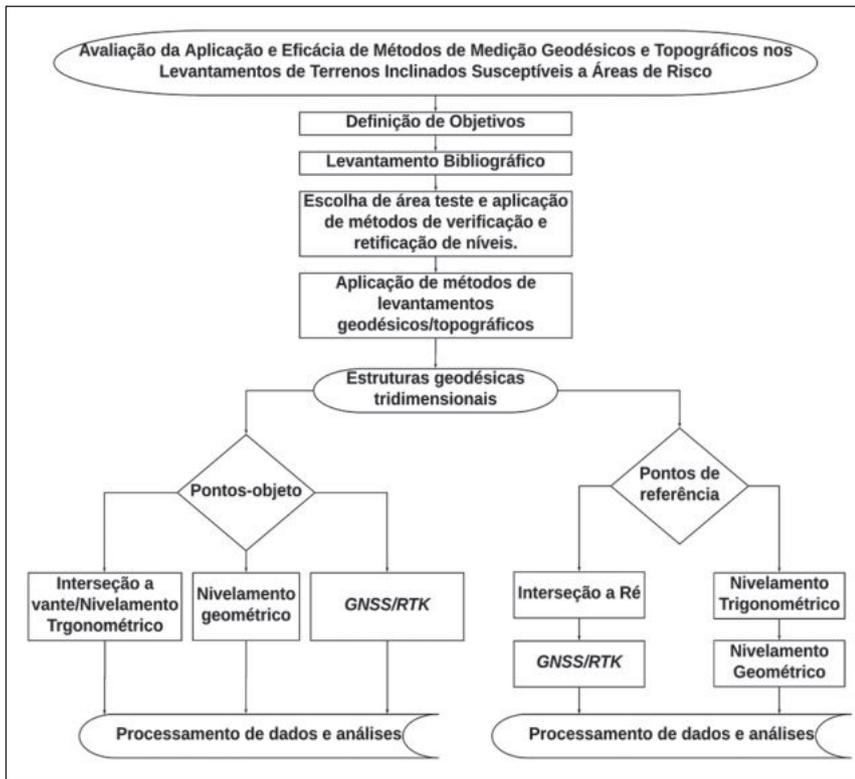


Figura 2
Metodologia adotada durante a execução do trabalho.

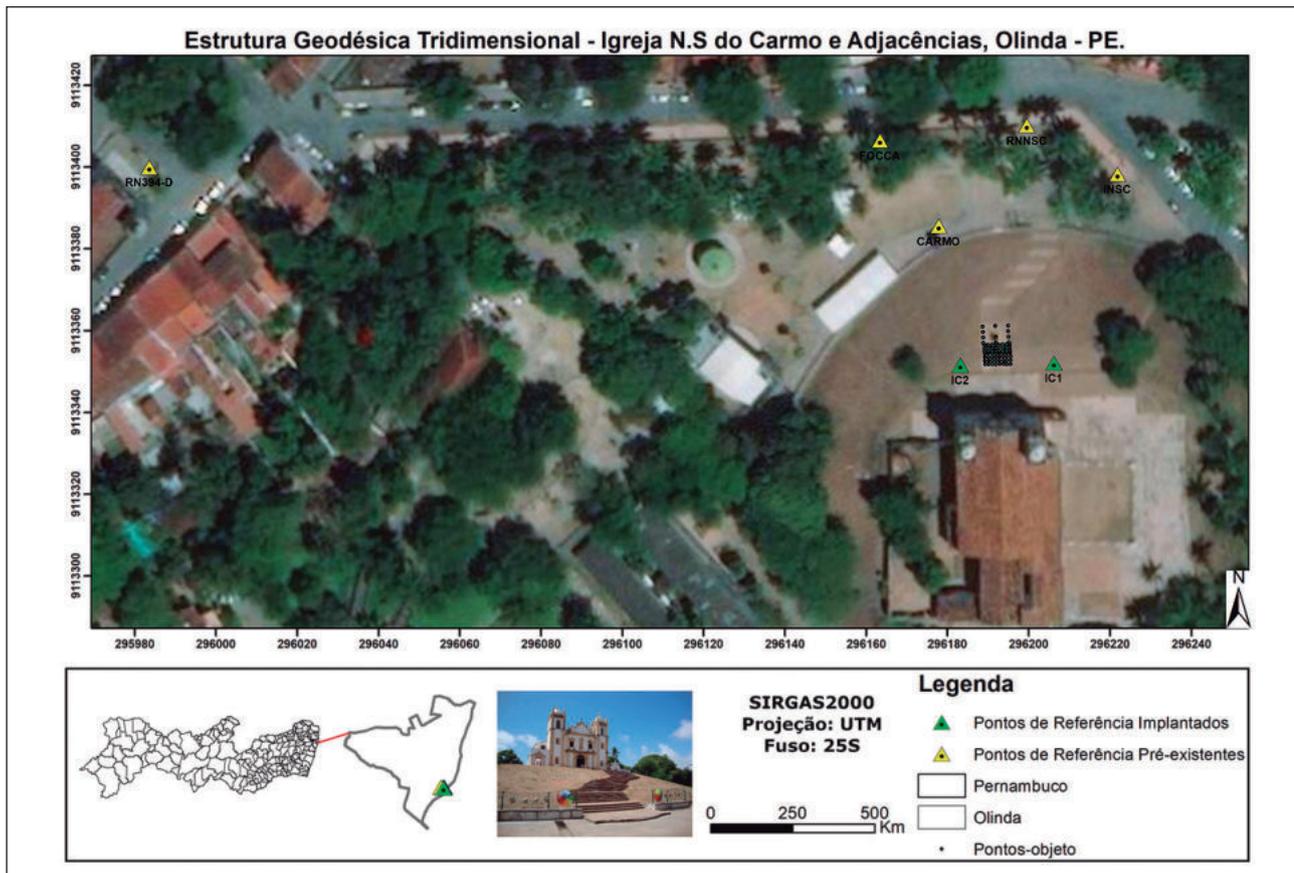


Figura 3 Estrutura Geodésica Tridimensional.

4 Resultados e Discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados para os pontos de referência e pontos-objeto implantados durante a realização deste trabalho. A descrição dos resultados seguirá a ordem cronológica da execução dos métodos em campo.

4.1 Verificação e Retificação de Níveis Digitais – ISO 17123-2

O emprego de equipamentos precisos e acurados é sem dúvida de elevada importância durante a execução de projetos que envolvem a Engenharia, verificar se os níveis de precisão e acurácia especificados pelos fabricantes, realmente estão sendo atendidos é uma medida que pode evitar problemas futuros durante o andamento de um projeto.

Neste trabalho o nível digital Leica DNA 03 teve seus níveis de precisão e acurácia verificados através da aplicação do método completo descrito na norma ISO 17123-2 (2001). Tal método foi aplicado na base de verificação e retificação de níveis digitais da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE Seixas & Seixas (2015), em novembro de 2016 e janeiro de 2017.

O nível digital utilizado durante as operações de campo possui, segundo seu fabricante um desvio padrão $\pm 0,3\text{mm/km}$, sendo classificado conforme a NBR 13133 ABNT (1994) como um equipamento de muito alta precisão. Tal equipamento foi aprovado em todos os testes aritméticos e estatísticos propostos no método completo da norma ISO 17123-2 (2001), tais resultados são apresentados respectivamente nas Tabelas 2 e 3.

Δ (mm)	$\sum r^2$ (mm)	ν	S (mm)	Siso-lev (mm)	Datas
-0,01	0,00008	38	$\pm 0,148$	$\pm 0,428$	30/11/2016
0,62	0,00090	38	$\pm 0,154$	$\pm 0,448$	16/01/2017

Tabela 2 Resultados Aritméticos, Método Completo ISO 17123-2.

Onde:

Delta (Δ) - Diferença entre o desnível médio das vinte primeiras observações e o desnível médio das vinte últimas observações;

($\sum r^2$) - equivale a soma dos quadrados dos vinte primeiros resíduos com os quadrados dos vinte últimos resíduos;

Graus de liberdade (ν) - $2 \times$ (número de observações – número de incógnitas), neste caso o número de graus de liberdade equivale a 38;

Desvio padrão experimental (s) - raiz quadrada do somatório dos resíduos ao quadrado dividido pelo número de graus de liberdade;

Desvio padrão por 1 km de nivelamento duplo (Siso-lev) - segundo a norma ISO 17123-2 (ISO, 2001) corresponde ao desvio padrão experimental multiplicado por uma constante de valor 2,89;

$\overline{s^2}$ - Desvio padrão para uma amostra de observações realizada em diferentes épocas.

Após a análise dos resultados obtidos foi possível enquadrar o equipamento em uma classe de altíssima precisão que não é prevista na NBR 13133. Detalhes acerca da metodologia empregada para a execução do método podem ser consultadas na norma ISO 17123-2 (2001), Santos (2017) e Silva *et al.* (2018). A etapa de verificação e retificação de níveis foi uma operação de suma importância no

Tabela 3
Resultados Estatísticos, Método Completo ISO 17123-2.

Condições	Datas	Resultados			Situação
		s	$\sigma \times 1,19$		
$s \leq \sigma \times 1,19$	30/11/2016	$\pm 0,148$ mm	0,357 mm		Teste Aceito
	16/01/2017	$\pm 0,155$ mm	0,357 mm		
$0,52 \leq s^2/\overline{s^2} \leq 1,91$	30/11/2016 16/01/2017	s^2	$\overline{s^2}$	$s^2/\overline{s^2}$	Teste Aceito
		0,022 mm	0,024 mm	0,917	
		0,024 mm	0,021 mm	1,143	
$\ \Delta\ \leq s^2/\sqrt{10} \times 2,02 \leq s \times 0,64$	30/11/2016 16/01/2017	$s^2/\sqrt{10} \times 2,02$		$s \times 0,64$	Teste Aceito
		0,09		0,01 mm	
		0,09		0,01 mm	

desenvolvimento deste trabalho, agregando qualidade e garantindo a confiabilidade dos dados altimétricos coletados.

4.2 Pontos de Referência

4.2.1 Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão

O nivelamento geométrico de altíssima precisão utilizou como Referência de Nível a altitude ortométrica do vértice RN394-D IBGE (2011) com valor de 15,9082 metros. As altitudes ortométricas foram calculadas de acordo com o método do nivelamento geométrico composto e ajustadas pelo método proporcional as distâncias, conforme Silva & Segantine (2015). Na Tabela 4 é possível visualizar a altitude ortométricas da Referência de Nível ocupada.

Referência de Nível	Altitude Ortométrica (m)
RNNSC	8,71390

Tabela 4 Altitude Ortométrica obtida da RNNSC.

A altitude ortométrica da Referência de Nível Nossa Senhora do Carmo (RNNSC) serviu como base para a determinação das altitudes ortométricas dos demais vértices integrantes do campo de pontos de referência e conseqüentemente dos pontos-objeto. Os procedimentos de nivelamento e contranivelamento foram tomados em diferentes direções, tendo a linha de nivelamento (RN394-D - RNNSC) atingido um comprimento de 253,615 m, ao passo que o contranivelamento alcançou o valor de 869,375m, uma vez que foi preciso contornar a igreja para voltar a RN de partida. Na Tabela 5 é possível visualizar alguns indicadores de qualidade do nivelamento.

Tolerância Altimétrica (mm/km)	Erro de Fechamento (mm)	Precisão (mm/km)
±10,05300	0,96000	±0,64057

Tabela 5 Indicadores de Qualidade do Método de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão.

4.2.2 Nivelamento Trigonométrico

O método do nivelamento trigonométrico foi utilizado para a obtenção das altitudes ortométricas

dos pontos de referência IC1 e IC2, assim como também dos 68 pontos-objeto materializados sobre a escadaria. Tal método utiliza a distância inclinada, o ângulo vertical, a altura do instrumento e a altura do prisma óptico para obter através de operações trigonométricas o desnível entre dois pontos. Como este método também utiliza estações totais ele foi aplicado simultaneamente a realização da operação de interseção a ré, sendo a altura dos instrumentos e dos prismas coletadas com o auxílio de uma trena milimétrica.

As altitudes ortométricas dos vértices IC1 e IC2 foram obtidas tomando-se como base a Referência de Nível RNNSC, pois esta foi obtida através de nivelamento geométrico de altíssima precisão, tendo sido apresentada na seção 4.2.1. As respectivas altitudes de IC1 e IC2 são apresentadas na Tabela 6.

Vértice	Ponto Visado	Desnível (m)	Altitude Ortométrica (m)
IC1	RNNSC	-6,138	14,857
IC2	RNNSC	-5,925	14,644

Tabela 6 Altitudes ortométricas de IC1 e IC2.

4.2.3 Interseção a Ré

As coordenadas dos vértices de referência IC1 e IC2 implantados neste trabalho foram obtidas através da aplicação do método da interseção a ré, utilizando o modelo matemático de transformação por Helmert descrito em Ghilani & Wolf (2006).

O método consiste em basicamente realizar a medição de ângulos e distâncias a partir de um ponto com coordenadas planimétricas desconhecidas e ao menos dois outros com coordenadas conhecidas. Em situações onde existem mais de dois pontos conhecidos é possível realizar o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados – MMQ.

Neste trabalho os vértices (CARMO, INSC e FOCCA) determinados em Santana Neto (2015) e Gomes (2016) foram utilizados como pontos de coordenadas conhecidas e a partir destes, determinou-se as coordenadas planimétricas de IC1 e IC2, a abundância de vértices com coordenadas conhecidas possibilitou o ajustamento por MMQ. A análise estatística das observações foi realizada através da aplicação do teste do Qui-Quadrado (χ^2). Os valores

encontrados com a aplicação deste teste foram menores que os valores críticos possíveis para a situação analisada, na qual o número de graus de liberdade é dois. Sendo assim, a um nível de confiança de 95%, as coordenadas obtidas foram aceitas, o controle dos dados obtidos foi realizado com a verificação através do software Adjust Ghilani & Wolf (2006).

Os resultados são apresentados na Tabela 8, levando-se em consideração o Sistema Geodésico Local – SGL como origem do sistema topocêntrico (coordenadas geodésicas locais), a posição horizontal do vértice BVM – Bernardo Vieira de Melo e a posição vertical do plano topocêntrico a altitude geométrica desse vértice (Tabela 7). O vértice BVM foi determinado a partir de posicionamento *GNSS* relativo estático envolvendo uma rede *GNSS* levantada com receptores de dupla frequência a partir das estações RBMC RECF e SAT 91551, descrito em Gama (2008) e Souza (2012).

Estação	Latitude (φ)	Longitude (λ)	h (m)
BVM	8°0'54,99766" S	34°51'5,42264" W	26,486

Tabela 7 Coordenadas Planialtimétricas do Vértice BVM.

Estação	X(m)	Y(m)	Desvio Padrão X(m)	Desvio Padrão Y(m)	Qui Quadrado	Graus de Liberdade
IC1	150394,883	249898,512	±0,022	±0,022	0,000633	2
IC2	150371,870	249898,028	±0,018	±0,018	0,000484	2

Tabela 8 Coordenadas Planimétricas em Sistema Geodésico Local SIRGAS2000 dos Vértices IC1 e IC2.

4.2.4 Posicionamento *GNSS/RTK*

O método *GNSS/RTK* oferece a vantagem de apresentar ao usuário os dados planialtimétricos coletados em campo em tempo real, sendo assim, teoricamente não seria necessário um processamento dos dados em escritório, no entanto, como neste trabalho cada ponto materializado, seja ele de referência ou objeto, teve no mínimo duas observações *GNSS/RTK* realizadas, optou-se por considerar como coordenadas finais a média aritmética das observações.

O procedimento de campo consistiu em realizar a instalação do receptor base sob o ponto de co-

ordenadas conhecidas denominado INSC (representado na Figura 4), medir e anotar a altura da antena do equipamento posicionado neste vértice.

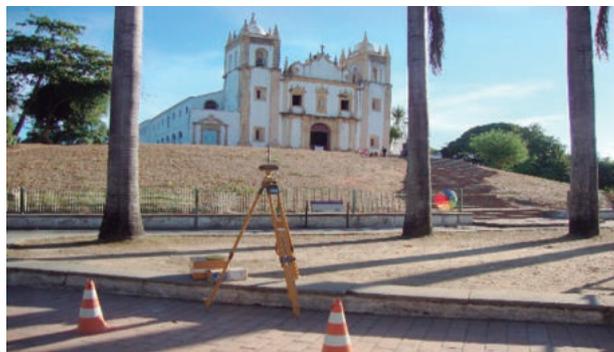


Figura 4 Receptor Base Posicionado sob o Vértice INSC.

Finalizada a etapa de instalação da base, o receptor *rover* percorreu os demais pontos integrantes da estrutura geodésica tridimensional, tal receptor foi instalado em um bastão específico com altura de 2,000 metros.

Na Tabela 9 é possível visualizar as coordenadas planialtimétricas dos pontos de referência IC1 e IC2 no SGL SIRGAS2000. Todos os resultados foram obtidos a partir de soluções fixas.

Estação	IC1	IC2
X(m)	150394,901	150371,882
Y(m)	249898,527	249898,013
h (m)	9,313	9,129
Desvio Padrão (X, Y) m	±0,016	±0,013
Desvio Padrão h(m)	±0,015	±0,018

Tabela 9 Coordenadas Planialtimétricas dos pontos de referência IC1 e IC2, onde h representa a altitude geométrica.

Nota-se através da análise das Tabelas 8 (seção 4.2.3) e 9 que as discrepâncias entre as coordenadas X e Y obtidas a partir do método da interseção a ré e da técnica *GNSS/RTK* para o vértice IC1 foram de 1,8 cm para X e de 1,5 cm para Y. Ao passo que para o vértice IC2 tais discrepâncias foram de 1,2 cm e 1,5 cm respectivamente para X e Y. Por fim a técnica *GNSS/RTK* também permite realizar uma análise quantitativa acerca do desnível observado entre os vértices IC1 e IC2, nesta situação, têm-se que considerando o método do nivelamento trigonométrico, com resultados apresentados na seção 4.2.2

o desnível encontrado entre os vértices IC1 e IC2 foi de -0,213 m, ao passo que se levando em conta a técnica *GNSS/RTK* esse valor foi de -0,184, totalizando uma discrepância absoluta de 0,029 cm.

O fato de a técnica *GNSS/RTK* ter apresentado valores de discrepâncias planimétricas e altimétricas, em relação aos demais métodos, dentro do intervalo de precisão esperado para a técnica, auxilia na tomada de decisões acerca dos métodos de levantamento que podem ser utilizados em um terreno inclinado, nesses casos fatores como tempo de execução e necessidade de equipes de levantamento são pontos nos quais a técnica *GNSS/RTK* possui ampla vantagem sobre o método da interseção a ré e do nivelamento trigonométrico. Neste trabalho a coleta dos pontos de referência (IC1 e IC2) demandou um intervalo de cerca de 20 minutos e uma equipe de 3 pessoas, enquanto a aplicação simultânea do método da interseção a ré e do nivelamento trigonométrico exigiu um intervalo de 4 horas com equipe formada por 4 pessoas.

4.3 Pontos-Objeto

4.3.1 Interseção a Vante 2D

O método da interseção a vante 2D consiste em obter as coordenadas de um ponto com coordenadas desconhecidas através da medição de ângulos e distâncias sobre dois pontos com coordenadas conhecidas. Neste trabalho com o objetivo de facilitar as operações de campo, foram empregadas duas estações totais e dois prismas ópticos, os instrumentos foram posicionados simultaneamente nos vértices IC1 e IC2, sob os quais se realizaram as medidas angulares e lineares necessárias para a aplicação do método da interseção a vante 2D.

Seguindo a metodologia também adotada no procedimento da interseção a ré a coleta dos ângulos horizontais foi realizada através de visadas direcionadas a ponta do bastão, ao passo que na coleta dos ângulos verticais e distâncias inclinadas, visou-se o centro do prisma. Devido ao alto número de pontos-objeto coletados apenas realizou-se a coleta de uma série de leituras conjugadas. A aplicação deste método contou com a participação de uma equipe composta por seis pessoas e teve uma duração total de 6 horas.

O cálculo das coordenadas dos 68 pontos-objeto levantados sobre a superfície da escadaria utilizando o método da interseção a vante foi realizado com o auxílio do módulo interseção direta disponível no *software* AstGeoTop Garnés (2017). O processamento dos dados seguiu o mesmo procedimento adotado em campo, no qual a escadaria foi dividida em três setores denominados objeto 01, objeto 02 e objeto 03. Sendo assim, foi adotada uma nomenclatura para identificar corretamente os pontos. Pode-se citar como exemplo os pontos 01P1 e 03P10 que identificam respectivamente o primeiro ponto levantado no objeto 01 e o décimo ponto levantado no objeto 03.

Considerando o fato de que o desvio padrão das componentes horizontais dos vértices IC1 e IC2 que serviram de base para a aplicação do método interseção a vante possuem ordens centimétricas e que as distâncias dos mesmos para os 68 pontos-objeto localizados na escadaria são inferiores a 21 metros, optou-se por realizar o processamento com injeção absoluta, desprezando-se os valores de desvios padrão encontrados para IC1 e IC2.

Sendo assim, foi possível constatar que 88% dos pontos coletados encontraram valores de desvios padrão para a componente X inferiores a ± 5 mm, enquanto que 95% dos desvios padrão encontrados para a componente Y foram inferiores a ± 2 mm.

4.3.2 Nivelamento Trigonométrico

Tendo-se conhecimento das altitudes ortométricas dos vértices IC1 e IC2 foi possível determinar a partir destes as altitudes dos pontos-objeto implantados. Deste modo cada ponto-objeto teve sua coordenada altimétrica determinada a partir da altitude ortométrica de IC1 e de IC2, resultando em dois valores de altimetria para um mesmo ponto-objeto.

A análise dos valores encontrados a partir destas distintas configurações permitiu encontrar uma discrepância máxima de 0,017 m e uma mínima de 0,004 m entre as coordenadas altimétricas obtidas a partir de um ou outro referencial. Apesar do fato de a maior discrepância encontrada estar situada na ordem dos centímetros cerca de 89% destes valores

apresentaram discrepâncias milimétricas, conforme o esperado para um nivelamento trigonométrico de curtas distâncias.

Convencionou-se adotar como altitude ortométrica para cada ponto-objeto observado a média dos valores das altitudes encontradas a partir de IC1 e IC2. Deste modo a maior altitude ortométrica encontrada foi de 14,861 m para o ponto O1P32 ao passo que a menor foi de 13,817 m para o ponto O3P11

4.3.3 Posicionamento GNSS/RTK

Com relação aos 68 pontos-objeto levantados com a utilização do método GNSS/RTK obtidos a partir de soluções fixas, notou-se que 83% destes pontos apresentaram desvios padrão em suas componentes horizontais inferiores a $\pm 1\text{cm}$, enquanto que 92% dos desvios padrão encontrados para a componente vertical foram inferiores a $\pm 2\text{cm}$ e de acordo com Segantine (2005), tais resultados são compatíveis com as precisões esperadas para a aplicação do método.

4.3.4 Nivelamento Geométrico

O procedimento de nivelamento geométrico contou com a utilização do nível analógico Topcon ATB4 e uma mira de alumínio de encaixe com graduação centimétrica. Esta foi a operação final realizada na área de estudo, tendo sua execução sido iniciada com a escolha de um local ideal para a instalação do equipamento, onde a partir deste ponto foi possível realizar o levantamento dos dados necessários para o cálculo das altitudes ortométricas dos pontos-objeto sem que houvesse a necessidade de um reposicionamento do equipamento em outro local.

A aplicação deste método consistiu inicialmente em realizar uma leitura de ré no vértice IC2 de altitude ortométrica conhecida (apresentada na seção 3.5) e leituras de vante para todos os pontos-objeto materializados. As leituras efetuadas envolveram a observação dos fios estadimétricos (Fio Superior – FS, Fio Médio - FM, Fio inferior - FI) do nível analógico em relação a mira posicionada na vertical sobre cada ponto-objeto. Nessa situação, para controle, foi realizada uma comparação entre

o valor médio calculado através das observações do fio superior e inferior e o valor do FM observado, caso a discrepância entre o valor calculado e o valor lido fosse superior a 0,001m era necessário ler novamente as observações FS, FM e FI.

A maior altitude ortométrica encontrada utilizando o método do nivelamento geométrico foi de 14,863 m para o ponto-objeto O1P28, enquanto a menor foi de 13,825 m para o ponto-objeto O3P8. O valor do desnível máximo encontrado entre os pontos-objeto e o vértice IC2 foi de -0,819 m, enquanto o mínimo foi de 0,035 m.

É importante frisar que de acordo com Kahmen & Faig (1988) em nivelamentos radiantes com distâncias de até 100 metros pode-se desprezar os efeitos da curvatura terrestre e ainda assim garantir precisões na ordem de 1 mm, fato que também pode ser replicado para os efeitos da refração atmosférica. Neste trabalho tais efeitos foram desprezados, uma vez que o equipamento utilizado foi o Nível Topcon ATB4 com precisão ± 2 mm por duplo Quilômetro nivelado e a maior distância entre pontos extremos foi encontrada no momento em que o vértice O1P4 foi observado, tal distância possui o valor de 11,100 m da estação ocupada pelo nível. A aplicação do método do nivelamento geométrico pode ser visualizada na Figura 5.

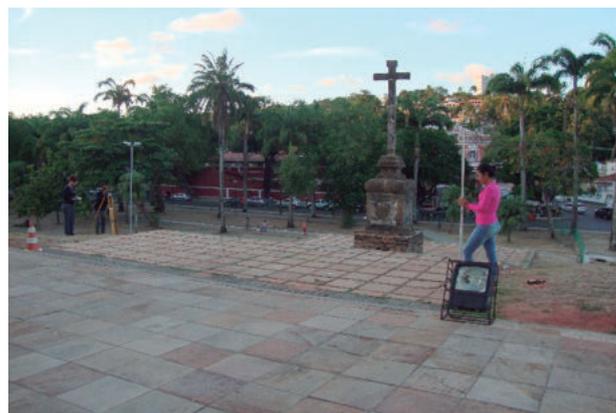


Figura 5 Aplicação do Método de Nivelamento Geométrico Usando Nível Automático Analógico.

A alta acurácia proporcionada pelo emprego do método do nivelamento geométrico o torna o método mais empregado na Engenharia, tendo as altitudes ortométricas dos pontos-objeto obtidas por

este método, sendo tomadas como referências neste trabalho em detrimento as mesmas obtidas por nivelamento trigonométrico e *GNSS/RTK*.

4.4 Terraplenagem

A quadriculação do terreno descrita no item 3.2 teve como um de seus objetivos realizar uma discussão acerca de procedimentos de terraplenagem que podem ser utilizadas para conter ou mitigar processos gravitacionais de massa que frequentemente ocorrem em terrenos inclinados. Como o objeto 03 possui um conjunto de pontos não uniformes como os objetos 01 e 02, o cálculo dos volumes de corte e aterro para este objeto não foi realizado. Para o estudo da terraplenagem na área de estudo determinou-se que as obras de terraplenagem deveriam obter um plano inclinado de 1 para 7, com rampa de -20 %, sem a exigência de uma altura determinada para este plano, neste caso os volumes finais de corte e aterro serão idênticos, tal hipótese é descrita, como exemplo de aplicação de terraplenagem em planos inclinados, em Silva e Segantine (2015). Os volumes de corte e aterro foram obtidos considerando os dados altimétricos advindos do método de nivelamento geométrico e posicionamento *GNSS/RTK*.

O primeiro passo para o cálculo dos volumes de corte e aterro foi descobrir a altura média geral do terreno, neste caso, considerou-se como altura média geral (hm) a média aritmética das alturas médias de cada quadrado. Este método é conhecido como método das alturas ponderadas e está descrito em Silva & Segantine (2015). O valor da altitude média do terreno considerando as altitudes ortométricas advindas do método de nivelamento geométrico corresponde a 14,676 m. Na situação abordada a forma de conseguir volumes de corte e aterro idênticos consiste em manter a altura do plano inclinado no centro de gravidade da área igual àquela que resulte também em volumes de corte e aterro, ou seja, em nosso caso 14,676 metros. O centro de gravidade do terreno analisado fica na linha 4 conforme Figura 6.

Sabendo-se que no centro de gravidade a altitude ortométrica do plano inclinado é igual a altura média do terreno e que a inclinação da rampa é de -20 %, ou seja, a cada 100 metros a altitude do terre-

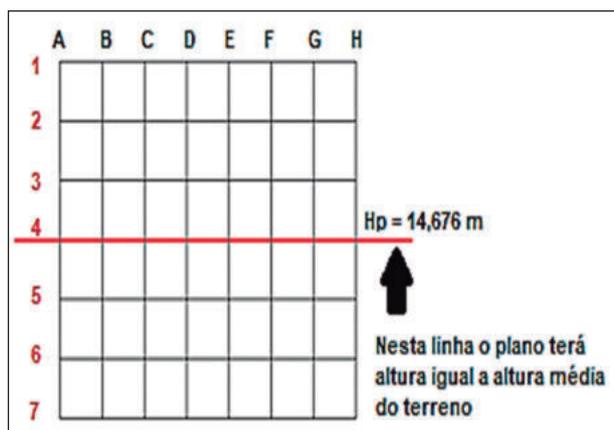


Figura 6 Linha de corte.

no deve aumentar ou diminuir 20 metros, é possível determinar a altitude dos demais perfis vistos na Figura 6 com a simples aplicação de uma regra de três simples. Se em 100 metros há uma variação de 20 metros no desnível do terreno em 0,80 metros ocorre uma variação de 0,16 metros, sendo assim a altitude ortométrica dos perfis 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 é vista na Tabela 10.

Perfil	Altitude Ortométrica (m)
1	15,156
2	14,996
3	14,836
4	14,676
5	14,516
6	14,356
7	14,196

Tabela 10 Altitudes Ortométricas dos Perfis.

Conhecendo-se as altitudes ortométricas do plano inclinado é possível esquematizar os perfis e obter os volumes de corte e aterro, seguindo os procedimentos descritos em Silva & Segantine (2015). O volume total de corte encontrado foi de 1,673 m³, enquanto o volume de aterro foi de 1,682 m³, atendendo, portanto, as condições iniciais que indicavam que os volumes de corte e aterro deveriam ser aproximadamente iguais.

O procedimento seguido para o cálculo dos volumes de corte e aterro com a utilização do método de nivelamento trigonométrico e o método de posicionamento *RTK* seguiu a mesma rotina de cál-

culo descrita para a obtenção destes volumes utilizando o método de nivelamento geométrico, apenas ressalta-se o fato de no método de posicionamento RTK ter-se utilizado as altitudes geométricas coletadas, diferentemente do método de nivelamento trigonométrico e geométrico que utilizam as altitudes ortométricas. A altitude geométrica média do terreno encontrada utilizando o método de posicionamento *GNSS/RTK* foi de 9,140 m e a altitude ortométrica média do terreno foi de 14,671 m quando se considerou o nivelamento trigonométrico.

O volume total de corte e aterro considerando-se a técnica *GNSS/RTK* foram de respectivamente, 1,669 m³ e 1,658 m³, enquanto pelo nivelamento trigonométrico, os valores encontrados foram de 1,677 m³ e 1,676 m³, respectivamente. Percebeu-se ao final dos processamentos que os métodos empregados proporcionaram valores semelhantes de volumes de corte e aterro para o caso analisado neste trabalho, com discrepâncias de 0,004 m³ para os volumes de corte e 0,024 m³ para os volumes de aterro, quando são comparados o nivelamento geométrico e o posicionamento *GNSS/RTK*. Ao passo que quando são comparados o nivelamento geométrico e o nivelamento trigonométrico as discrepâncias entre os volumes de corte e aterro atingem os valores de 0,004 m³ e 0,006 m³, respectivamente. Os valores de discrepância encontrados indicam que a aplicação de qualquer um dos métodos, neste terreno inclinado, não apresentará valores significativamente destoantes para o plano inclinado resultante das operações de terraplenagem.

Detalhes adicionais acerca da aplicação do método da Terraplenagem podem ser consultadas em Santos (2017) e Santos *et al.* (2018). Nas seções posteriores serão realizadas algumas comparações acerca das qualidades posicionais obtidas pelos métodos de levantamentos topográficos/geodésicos aplicados neste trabalho.

4.5 Comparação entre as Altitudes Ortométricas Obtidas a Partir de Nivelamento Trigonométrico e Nivelamento Geométrico

Como as coordenadas altimétricas dos pontos-objeto observados foram obtidas através da aplica-

ção de diferentes métodos, fez-se necessário realizar uma análise acerca dos resultados obtidos. Devido ao fato de o nivelamento geométrico efetuado tomar como referência para o transporte de altitude apenas a altitude do vértice IC2, optou-se por comparar as altitudes dos pontos-objeto obtidos via nivelamento trigonométrico considerando-se apenas este vértice como referência.

Os valores altimétricos obtidos a partir da utilização de ambos os métodos de nivelamento apresentaram discrepâncias milimétricas, tendo 98% das discrepâncias analisadas sido inferiores a 1 cm. As discrepâncias máximas observadas foram encontradas nos pontos-objeto O3P1 e O3P12 com valores de 0,010 m, enquanto a mínima discrepância foi encontrada no ponto-objeto O1P32 com valor de 0,002 m.

4.6 Comparação dos Desníveis Obtidos Através do Nivelamento Trigonométrico, Nivelamento Geométrico e *GNSS/RTK*

O desnível existente entre o vértice IC2 e os pontos-objeto implantados neste trabalho foi obtido através da utilização de nivelamento trigonométrico, nivelamento geométrico e posicionamento *GNSS/RTK*. Inicialmente foi realizada a comparação entre os desníveis obtidos através da aplicação dos métodos de nivelamento geométrico e trigonométrico, que apresentaram uma discrepância máxima no ponto-objeto O2P5 no valor de 0,008 m, a análise completa destas discrepâncias apresenta em 98% dos casos valores inferiores a 0,005 m, tais resultados estão de acordo com os níveis de precisão que estes métodos podem alcançar.

Em seguida a análise foi realizada entre os desníveis obtidos com a técnica *GNSS/RTK* e com os métodos de nivelamento geométrico e trigonométrico, ressaltando-se que nesse caso apenas os desníveis podem ser comparados, pois os métodos proporcionam altitudes de naturezas distintas. As discrepâncias máximas e mínimas encontradas nessas situações apresentaram valores de 0,051 m e 0,001 m em uma conjectura onde a técnica *GNSS/RTK* e o nivelamento geométrico foram analisadas e 0,045 m e 0,001 m no caso da comparação entre a técnica *GNSS/RTK* e o nivelamento trigonométrico.

A precisão da componente vertical alcançada pelo método de posicionamento RTK possui de acordo com Segantine (2005) valores entre 15 mm - 20 mm \pm 2 ppm. Apesar dos valores de discrepâncias máximas mencionadas estarem fora do intervalo de precisão esperado, notou-se que 56% das discrepâncias obtidas entre os desníveis obtidos via nivelamento geométrico e a técnica *GNSS/RTK* foram inferiores a este intervalo, ao passo que este percentual foi de 68% quando se levou em análise as discrepâncias obtidas entre o nivelamento trigonométrico e a técnica *GNSS/RTK*.

Devido ao fato de os métodos terem atingido as precisões esperadas, um importante fator a ser levado em consideração é o tempo de execução dos mesmos em campo e nesse caso a praticidade do uso da técnica *GNSS/RTK* é sem dúvida um enorme facilitador para a aquisição de dados com acurácia e precisão em terrenos inclinados com graus de risco mais elevados, embora o método do nivelamento geométrico proporcione uma maior qualidade posicional.

4.7 Coordenadas Planimétricas Obtidas via Interseção a Ré, Interseção a Vante e *GNSS/RTK*

Os vértices integrantes da estrutura geodésica tridimensional considerada neste trabalho tiveram suas coordenadas planimétricas determinadas a partir de diferentes métodos, tendo a técnica *GNSS/RTK* sido empregada tanto na determinação dos pontos de referência IC1 e IC2 quanto na determinação de todos os pontos-objeto materializados nesta escadaria.

Inicialmente é possível comparar sob o ponto de vista qualitativo a utilização da técnica *GNSS/RTK* com o método da interseção a ré, sendo que a primeira técnica apresenta como grandes vantagens o tempo de coleta em campo, a não necessidade de grandes equipes de apoio ao levantamento, a obtenção dos resultados em tempo real e a não necessidade de pontos intervisíveis entre si. Por outro lado sob o ponto de vista quantitativo, os desvios padrão das observações encontrados para o método da interseção a ré foi superior ao encontrado pela técnica *GNSS/RTK*, no entanto há de se considerar nesse caso que as coordenadas dos vértices IC1 e IC2 foram obtidas a partir de vértices pré-existentes no

local e as precisões obtidas durante o levantamento destes vértices influenciaram nos resultados dos desvios padrão encontrados para IC1 e IC2 considerando o método da interseção a ré.

A mesma comparação foi realizada entre os resultados encontrados pelo método da interseção a vante e a técnica *GNSS/RTK* e as vantagens qualitativas da técnica de posicionamento espacial ficaram ainda mais evidenciadas, principalmente no que diz respeito ao tempo de coleta e ao número de integrantes da equipe de levantamento. Nesse caso vale mencionar que o levantamento completo dos dados necessários para a aplicação do método de interseção a vante consumiu um intervalo de 6 horas tendo sido a operação de maior duração realizada neste trabalho contando com o apoio de uma equipe formada por 6 pessoas, enquanto o mesmo levantamento foi realizado utilizando-se a técnica *GNSS/RTK* em 2 horas com uma equipe de 4 pessoas. No que diz respeito a avaliação quantitativa o método da interseção a vante obteve uma ampla vantagem sobre a técnica de posicionamento espacial. Isso se deve principalmente ao fato de nesse caso ter-se considerado injunções absolutas com as precisões dos vértices IC1 e IC2 não influenciando nos cálculos dos pontos-objeto levantados, sendo assim, para o método da interseção a vante 92% dos pontos-objeto levantados obtiveram desvios planimétricos iguais ou inferiores a ± 5 mm, enquanto que para a técnica *GNSS/RTK*, encontrou-se 83% dos pontos-objeto levantados apresentando desvio planimétrico inferior a ± 1 cm.

5 Conclusões e Recomendações

O desenvolvimento de metodologias que possibilitem a discretização e o acompanhamento das características geométricas de terrenos inclinados é uma atividade muito relevante para a sociedade como um todo, pois fornece dados aos setores públicos/privados responsáveis pela gestão destas localidades, que lhes permitem desenvolver estratégias para prevenir, mitigar e conter atividades como a movimentação gravitacional de massas que costumam ocorrer nestes locais e causam os mais variados impactos psicológicos, físicos e materiais para as pessoas expostas a tal risco.

A metodologia aplicada neste trabalho propôs expor a partir da utilização de métodos de medição topográficos e geodésicos as precisões, dificuldades e até mesmo a viabilidade encontrada entre a aplicação de um método ou outro. Os resultados dos processamentos dos dados coletados em campo mostraram que os padrões possíveis de serem alcançados por cada método de levantamento utilizado foram obtidos, tal fato pôde ser constatado através das literaturas disponíveis e por comparações realizadas entre os dados advindos dos métodos empregados.

O nivelamento geométrico de alta precisão efetuado com o nível digital Leica DNA-03 foi compatível com a precisão especificada pelo fabricante, alcançando uma precisão de $\pm 0,64057$ mm/km nivelado. Preliminarmente a execução deste nivelamento a precisão do nível digital empregado foi verificada através das orientações do método completo da norma ISO 17123-2, tendo o equipamento sido enquadrado em uma classe de altíssima precisão, ratificando deste modo a qualidade dos dados altimétricos coletados durante a execução do trabalho.

O método da interseção a ré permitiu a obtenção de coordenadas planimétricas com precisão na ordem de centímetros para os pontos de referência, enquanto o método do nivelamento trigonométrico possibilitou para as coordenadas altimétricas destes mesmos pontos uma precisão milimétrica.

Para os 68 pontos-objeto espaçados em uma malha de 80 centímetros (objeto 01 e objeto 02) e 1,6 metros (objeto 03) obteve-se com o método da interseção a vante 2D desvios padrão de ordem milimétrica. Em 88% dos casos na componente X os valores encontrados foram inferiores a ± 2 mm e em 95% dos casos inferiores a ± 5 mm na componente Y.

Com relação a determinação das altitudes ortométricas dos pontos-objeto, utilizou-se o método do nivelamento geométrico com o nível analógico ATB4, com o transporte de altitude sendo realizado através do vértice de referência IC2, a altitude média do terreno encontrada foi de 14,676 m, enquanto as máximas e mínimas encontradas foram de 14,863 m e 13,825 m, respectivamente, para os pontos-objeto 01P28 e 03P8. As altitudes destes mesmos pontos obtidas via nivelamento trigonométrico não apresen-

taram em sua maioria discrepâncias superiores a 1 cm quando comparadas as obtidas por meio de nivelamento geométrico.

Utilizando-se a técnica *GNSS/RTK*, obteve-se para os pontos-objeto desvios padrão mínimos e máximos de ± 5 mm (01P17) e $\pm 1,9$ cm (03P8) para a componente horizontal, enquanto que os desvios mínimos e máximos para a componente vertical foram de ± 7 mm (01P14) e $\pm 2,1$ cm (03P4). A análise dos desníveis obtidos via nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico quando comparadas as fornecidas pela utilização da técnica *GNSS/RTK* não apresentaram em sua maioria valores superiores aos padrões de precisão posicional estimados para a técnica *GNSS/RTK*.

A metodologia aplicada neste trabalho pode ser empregada em áreas com maiores graus de risco, desde que se leve em consideração as limitações apresentadas por cada método, entraves como a limitação das linhas de visada, alto grau de ocupação e a segurança apresentada na área em estudo devem ser levadas em consideração, dificilmente a aplicação de apenas um método de levantamento será suficiente para se ter informações detalhadas de um terreno inclinado de grandes extensões.

Para finalidades de monitoramento de áreas de risco deve haver uma aplicação periódica de métodos de levantamentos topográficos e geodésicos, pois os dados obtidos em épocas diferentes permitem o conhecimento geotécnico acerca do local estudado, possibilitando o conhecimento acerca dos parâmetros de movimentação do terreno inclinado, embora a metodologia tenha se mostrado plenamente aplicável aos casos em que se necessita o conhecimento acerca das características geométricas de um terreno, a materialização dos pontos-objeto do modo como foi realizado neste trabalho não seria suficiente para a aplicação de campanhas de monitoramento na área de estudo, uma vez que o monitoramento exigiria a materialização permanente de alvos.

Sobre a superfície do terreno inclinado, alvo dos estudos realizados neste trabalho, a execução de obras de infraestrutura como a terraplenagem poderia ser realizada tanto pelos métodos de nivelamento geométrico quanto pelo método de posicionamento

GNSS/RTK, conforme constatado no item 4.4, uma vez que as discrepâncias entre os volumes finais de corte e aterro encontrados são praticamente desprezíveis. Neste caso, a praticidade do uso do método de posicionamento *GNSS/RTK* pode ser uma alternativa bastante viável, uma vez que os resultados mostraram semelhanças com os resultados dos métodos clássicos.

A análise da qualidade posicional alcançada pelos métodos aplicados neste trabalho permite afirmar que em terrenos inclinados com a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa com deslocamentos iguais ou inferiores a 1 cm apenas seriam detectados com a aplicação de métodos clássicos de levantamento como a interseção a ré e a interseção a vante para planimetria e o nivelamento geométrico e trigonométrico para altimetria. Ao passo que deslocamentos entre 2 cm e 5 cm seriam passíveis de serem detectados através da aplicação de métodos de posicionamento espacial como a técnica *GNSS/RTK*.

Por fim é importante salientar que embora os métodos de levantamentos Geodésicos e Topográficos proporcionem dados precisos e acurados, o avanço da tecnologia vem proporcionando uma maior dinamização das operações de campo e o surgimento de métodos que embora não sejam tão novos apresentam um caráter emergente, como o *LiDAR*, o *Laser Scanner* e estações totais robotizadas.

6 Agradecimentos

Nossos agradecimentos ao Departamento de Engenharia Cartográfica pela concessão dos Equipamentos e acessórios locados no Laboratório de Geodésia – LAGEO e no Laboratório de Topografia - LATOP, ao Projeto de Pesquisa nº 3076.040512/2015-15 PROPESQ/UFPE pela concessão de bolsa de pesquisa associada ao Trabalho de Conclusão de Curso (Diretoria do CTG associada ao projeto nº 3076.040512/2015-15), ao Projeto de Pesquisa intitulado a Geodésia Aplicada à discretização de Edificações Prediais e o Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica, PROPESQ/UFPE, processo número 23076.011861/2017-91. A todos alunos do Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura que contribuíram para a aquisição

de dados em campo: Marcio Silva, Marcella Fernandes, Yan Lucas, Carla Barbosa, Flávia Manhães e Júlio Simões.

7 Referências

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1994. Execução de Levantamento Topográfico: NBR 13133/94. Rio de Janeiro, 35p.
- Alheiros, M. M. 1998. *Riscos de Escorregamentos na Região Metropolitana do Recife*. Universidade Federal da Bahia, Tese de Doutorado, 129p.
- Augusto Filho, O. 1992. Caracterização Geológica-geotécnica voltada à Estabilização de Encostas: Uma proposta Metodológica. In CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2, Florianópolis, 1992. *Anais*, Florianópolis, UFSC, p.721-733.
- Augusto Filho, O. 1994. *Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de ilha bela*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 167p.
- Bandeira, A.P.N. 2003. *Mapa de Risco de Erosão e Escorregamento das Encostas com Ocupações Desordenadas no Município de Camaragibe-PE*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 233p.
- Bates, R.L. & Jackson, J.A. 1987. *Glossary of Geology*. Virginia, American Geological Institute. 788p.
- Carvalho, C.S. & Galvão, T. 2006. *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais*. Brasília, Cities Alliance. 111p.
- Farah, F. *Habituação e encostas*. 2003. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 312p.
- Gama, L. F.; Seixas, A. & Souza, A. M. B. 2012. Implantação e análise de estruturas geodésicas planimétricas obtidas por GPS e estação total: Aplicações em levantamentos cadastrais e urbanos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 64 (2): 227- 247.
- Gama, L.F. 2012. *Experimentos e análises metodológicas do desempenho de estruturas geodésicas planimétricas implantadas com GPS e estação total: aplicações em levantamentos cadastrais urbanos*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 221p.
- Garnés, S. J. A. 2017. Programa AstGeoTop 2017. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Software de cálculo.
- Ghilani, C.D. & Wolf, P.R. 2006. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*. New Jersey, John Wiley & Sons Inc. 631p.
- Gomes, J. L. 2017. *Aplicações de Dados Geodésicos no Entorno das Edificações Prediais Históricas da Cidade de Olinda - PE*. Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Trabalho de Conclusão de Curso, 125p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2011. Relatório de Estação Geodésica RN394D. Rio de Janeiro, 1p.

Avaliação da Aplicação e Eficácia de Métodos de Medição Geodésicos e Topográficos nos Levantamentos de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas de Risco

Wellisson José dos Santos; Andréa de Seixas & Sylvana Melo dos Santos

- ISO - International Organization for Standardisation. 2001. ISO 17123: Optics and Optical Instruments – Field Procedures for Testing Geodetic and Surveying Instruments – Part 2: Levels. Genebra, 14p.
- Kahmen, H. & Faig, W. 1988. *Surveying*. Berlin, Walter de Gruyter. 578p.
- Monico, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo, Unesp. 476p.
- ONU – Organização das Nações Unidas. 2004. *Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives*. Genebra, Unisdr. 430p.
- Santana Neto, J. P. 2015. *Densificação de estruturas geodésicas e transporte de coordenadas definidas por métodos planialtimétricos de medição*. Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Trabalho de Conclusão de Curso, 83p.
- Santos, M.C. 1999. *Estabilidade das Estruturas Geodésicas*. Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Apostila, 79p.
- Santos, W. J. 2017. *A contribuição da Topografia e da Geodésia no estudo de terrenos inclinados e áreas de risco*. Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, Trabalho de Conclusão de Curso, 143p.
- Santos, W.J.; Seixas, A.; Silva, M.B. & Melo, M.F.O. 2018. Métodos de Medição Topográficos e Geodésicos Aplicados ao Estudo de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas De Risco. In: *VII SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIA DA GEOINFORMAÇÃO*, 7, Recife, 2018, Recife. *Anais*, Recife, UFPE, p. 685 – 694.
- Segantine, P.C.L. 2005. *GPS: Sistema de Posicionamento Global*. São Carlos, EESC/USP. 364p.
- Seixas, A.; Gama, L.F.; Moraes, J.N. & Souza, A.M.B. 2014. O estabelecimento de padrões de referência altimétrica utilizando o nivelamento geométrico para a definição de alvos altos e inacessíveis. *Boletim de Ciências Geodésicas* 20 (2): 388-410.
- Seixas, A.; Souza, A. M. B. & Gama, L.F. 2014. Methodology for Definition of the Three-Dimensional Geodesic Structures in the Olinda's Historical Site. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8: 1-10.
- Seixas, A. & Seixas, J. 2015. *Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG CTG/UFPE*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Projeto de Pesquisa.
- Silva, I. & Segantine, P.C.L. 2015. *Topografia para Engenharia Teoria e Prática de Geomática*. Rio de Janeiro, Elsevier. 412 p.
- Souza, A.M.B. 2012. *Análise e comparação de estruturas geodésicas tridimensionais definidas por métodos planialtimétricos de medição*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de Mestrado, 223p.
- Varnés, D. J. 1978. Slope Movement Types and Processes. In: SCHUSTER, R.L. & KRIZEK, R.J. (Eds.). *Landslides: Analysis and Control*. National Academies Press, p.11-33.
- Varnés, D.J. 1984. *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practices*. Paris, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. 60p.