

## Medições Geodésicas para Detecção de Movimentos em Terrenos Inclinados Susceptíveis a Recalques e Deslizamentos

*Geodesic Measurements for detection of Movements in Inclined Lands Susceptible to Landslides and Settlements*

Welisson José dos Santos  & Andréa de Seixas 

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Pernambuco, PE, Brasil  
E-mails: [welissonsantos93@gmail.com](mailto:welissonsantos93@gmail.com); [aseixas@ufpe.br](mailto:aseixas@ufpe.br)

### Resumo

Medições geodésicas para detecção e análise de movimentos 3D são empregadas em larga escala para o estudo e detecção de movimentos 3D em encostas sob ações antrópicas ou naturais. Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a concepção de sistemas deste porte. Os experimentos ocorreram nas imediações das torres eólicas Gravatá 01, 02, 03 e 04 do Parque Eólico da Eólica Tecnologia Ltda., localizado no município de Gravatá – PE, Brasil. As torres eólicas estão instaladas em terrenos que abrangem superfícies inclinadas e afloramentos rochosos, compondo uma área ideal para desenvolvimento de estudos para análise da aplicação de métodos geodésicos de monitoramento de estruturas e de superfícies. Foram aplicados métodos geodésicos de levantamentos para densificar e materializar um sistema de monitoramento geodésico constituído por uma rede planialtimétrica em caráter local. As coordenadas planimétricas dos novos vértices foram ajustadas via modelo paramétrico através do ajustamento em redes por triangulação e com vértices controlados por interseção a ré. O vértice determinado via interseção a ré apresentou desvios padrão em X e Y de  $\pm 15$  mm. Os vértices determinados a partir da triangulação apresentaram desvios padrão mínimos em X de  $\pm 5$  mm e  $\pm 3$  mm em Y e máximos em X de  $\pm 8$  mm e  $\pm 7$  mm em Y. A discretização do terreno inclinado foi realizada a partir de pontos-objeto fixados em uma malha quadrangular sobre o afloramento rochoso compreendido entre duas torres eólicas. A observação dos pontos-objeto foi realizada a partir da Rede Geodésica Planialtimétrica. Para isto definiu-se bases de observação e aplicou-se os métodos da interseção a vante, irradiação múltipla e nivelamento trigonométrico. Para as coordenadas planimétricas destes pontos, obteve-se com a interseção a vante desvios padrão mínimos em X e Y, respectivamente, de  $\pm 7$  mm e  $\pm 2$  mm, e máximos em X e Y, respectivamente, de  $\pm 10$  mm e  $\pm 3$  mm.

**Palavras-chave:** Redes geodésicas; Métodos de levantamentos geodésicos/topográficos; Medição de recalques e deslizamentos

### Abstract

Geodetic measurement systems for the detection and analysis of 3D movements are used on a large scale for the study and detection of 3D movements on slopes under anthropic or natural actions. This work presents a methodology for designing systems of this size. The experiments took place near the Gravatá 01, 02, 03 and 04 wind towers of Eólica Tecnologia Ltda., Located in the city of Gravatá - PE, Brazil. The wind towers are installed on land that includes sloping surfaces and rocky outcrops, composing an ideal area for the development of studies for the analysis of the application of geodetic methods for monitoring structures and surfaces. In this work, geodetic survey methods were applied to densify and materialize a geodetic monitoring system constituted by a planialtimetric network in a local character. The planimetric coordinates of the new vertices were adjusted using the parametric model through adjustment in triangular networks and with vertices controlled by resection. The vertex determined via resection showed standard deviations in X and Y of  $\pm 15$  mm. The vertices determined from the triangulation showed minimum standard deviations in X of  $\pm 5$  mm and  $\pm 3$  mm in Y and maximum in X of  $\pm 8$  mm and in  $\pm 7$  mm in Y. The discretization of the inclined terrain was carried out from object points fixed in a quadrangular mesh on the rocky outcrop between two wind towers. The observation of the object points was carried out from the Planialtimetric Geodetic Network. For this, observation bases were defined and the methods of forward intersection, multiple irradiations and trigonometric leveling were applied. For the planimetric coordinates of these points, the minimum standard deviations in X and Y, respectively, were obtained from  $\pm 7$  mm and  $\pm 2$  mm, and maximum in X and Y, respectively, from  $\pm 10$  mm and  $\pm 3$  mm.

**Keywords:** Geodetic networks; Methods of geodetic/topographic surveys; Measurement of settlements and landslides

## 1 Introdução

A ocupação de terrenos inclinados é um fenômeno de natureza comum no Brasil desde a época colonial. Tal fato de acordo com Farah (2003), deve-se principalmente a uma herança da Europa Medieval, onde havia uma preocupação constante com a segurança do ponto de vista militar. O soerguimento de cidades e fortificações no topo de colinas e montanhas facilitava a defesa, pois do alto, podia-se avistar a aproximação e os movimentos de exércitos inimigos e dificultar o acesso de incursões. A preservação de Cidades coloniais como em Olinda-PE e Salvador-BA mostra que os portugueses procuraram construir suas fortificações em terrenos estáveis.

O passar dos séculos impulsionou o crescimento brasileiro durante várias fases de sua história. No entanto, o processo de ocupação de terrenos com declividades mais acentuadas em áreas afastadas dos centros urbanos continuou a se repetir. Nos dias atuais essas localidades abrigam milhares de pessoas, que no geral estão expostas a fenômenos, que podem lhes causar efeitos prejudiciais, como o comprometimento de sua integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Segundo Varnés (1984), a avaliação do risco nessas localidades 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.

No contexto de terrenos inclinados ocupados por construções irregulares, têm-se que recalques e deslizamentos são dois tipos de fenômenos naturais comumente observados. O primeiro é definido pela NBR 6122 Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019), como o movimento vertical de um elemento estrutural no sentido descendente. O segundo faz parte de um conjunto de movimentos, denominados movimentos gravitacionais de massa, sendo caracterizado pela existência de um plano de ruptura curvo (deslizamento rotacional) ou plano (deslizamento translacional), conforme United States Geological Survey (2008).

Normalmente o acompanhamento de recalques é realizado em edificações prediais de grande porte vertical como prédios habitacionais e comerciais, torres eólicas, torres de telecomunicação e barragens. No entanto, praticamente toda estrutura apoiada sobre o solo está suscetível a recalques, inclusive construções residenciais de pequeno porte, que normalmente não contam com a existência de investigações geotécnicas responsáveis pelo fornecimento de informações capazes de atestar a qualidade do solo e garantir o correto dimensionamento de um projeto.

De acordo com Seixas, Seixas & Seixas (2009), os diversos tipos de danos ocasionados por recalques estão associados aos valores limites recomendados para os recalques totais e diferenciais. Os danos podem ser divididos em três grupos principais: visuais ou estéticos (sem risco de qualquer natureza), danos que comprometem o uso e funcionalidade do prédio e, finalmente, danos estruturais que colocam em risco a segurança dos usuários.

Enquanto os danos advindos da ocorrência de recalques em fundações não provocam de imediato um olhar mais atencioso em edificações de pequeno porte construídas sobre terrenos inclinados, os deslizamentos pela sua frequência associada a períodos de precipitações volumétricas elevadas e seu alto potencial de destruição de maneira inesperada despertam a cada dia um olhar mais atencioso de gestores e órgãos responsáveis por garantir a segurança de pessoas que habitam tais localidades. Acidentes de proporções gigantescas podem ser evitados a partir da correta identificação e caracterização de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. O desenvolvimento de metodologias de monitoramento nestes terrenos visa definir graus de exposição ao risco e 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.

O sucesso destes estudos exige uma ampla interdisciplinaridade entre as Ciências Exatas e Humanas, sendo necessário destacar o papel da Engenharia, que por meio de ciências, como a Geodésia, a Topografia, a Geotécnia, 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. Nos últimos anos, tem-se presenciado o desenvolvimento de diferentes metodologias em projetos de Engenharia voltados ao monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, como por exemplo os estudos desenvolvidos em (Euriques & Krueger 2017; Paese et al. 2014; Rhadamek & Silva 2012; Sabuncu & Ozener 2014; Santos 2017; Santos et al. 2019; Santos 2020; Viski & Krueger 2017).

Este trabalho contribui na apresentação de uma metodologia para concepção de sistemas de medição geodésica voltados à detecção e análise de movimentos 3D em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, trazendo a importância da definição de um referencial absoluto para a medição dos pontos de referência e pontos-objeto, concepção de parafusos de adaptação de medições de pontos-objeto para apoio de mira vertical e fixação de prismas, estabelecendo padrões de referência para as medições.

## 2 Concepção de Sistemas Geodésicos de Monitoramento

Conforme exposto em Santos (1999), a conceituação básica de mecânica dos materiais afirma que corpos ou peças, sob a ação de forças externas estão sujeitos a deformações de diversas naturezas, a depender de sua extensão, deformações podem ser caracterizadas como de escalas globais, regionais ou locais, podendo-se citar, respectivamente, como exemplos de tais deformações os movimentos relativos entre placas tectônicas, o choque entre placas tectônicas, e os movimentos observados em estruturas geralmente feitas pelo Homem como o enchimento de barragens.

De acordo com Kahmen & Faig (1988), é possível detectar deformações em uma estrutura utilizando métodos geotécnicos e geodésicos, sendo o primeiro utilizado principalmente para a detecção de movimentos relativos, ao passo que o segundo tem a sua maior aplicabilidade na detecção de movimentos absolutos. Ainda de acordo com os autores um movimento relativo será detectado pela análise da variação de um ponto-objeto em respeito a outro ponto-objeto, enquanto um movimento absoluto pode ser detectado através da variação de um ponto-objeto com respeito a um ponto de referência.

Do ponto de vista geodésico, dois propósitos podem ser considerados como os principais. Inicialmente, a própria detecção, análise e monitoramento de deformações, quer seja em aspectos locais, regionais ou globais. Um segundo propósito diz respeito ao estabelecimento de redes geodésicas, incluindo-se aí aquelas com o propósito de controle de deformações, nesses casos os deslocamentos dos vértices podem ser diretamente correlacionados a deslocamentos do corpo sob investigação. No caso, no qual o interesse reside no conhecimento da estabilidade da estrutura em si, busca-se saber o quanto os erros sistemáticos que afetam as observações, estão influenciando na forma da rede geodésica, Santos (1999).

As redes geodésicas implantadas com o objetivo de monitorar deformações nas mais diversas estruturas, dentre as quais terrenos inclinados, são geralmente representadas por um conjunto de pontos denominados pontos de referência e pontos-objeto, estes são responsáveis respectivamente por fornecer referências planimétricas/altimétricas para a realização de futuras medições e detectar possíveis variações posicionais ocorridas na estrutura monitorada.

A concepção dos sistemas geodésicos pode ocorrer através da utilização de métodos de levantamentos clássicos que são baseados na coleta de observações angulares e lineares em relação a um alvo, ou métodos modernos baseados na utilização de sistemas de posicionamentos globais como o *Global Navigation Satellite System (GNSS)*, sistemas de medição com estações robotizadas e medições

interferométricas a LASER (Cruz, Faggion & Muggio 2019; Neves et al. 2014; Seixas et al. 2007; Siguel et al. 2013; Silva & Seixas 2019).

A utilização de um método de levantamento clássico ou moderno para a concepção de uma rede geodésica de monitoramento deve levar em consideração critérios como o nível de precisão desejado, o tipo de estrutura a ser monitorada e o intervalo temporal estabelecido para a coleta de observações. A utilização de métodos clássicos ainda é comum nos dias atuais, aplicações como o monitoramento de barragens e edifícios prediais são exemplos nos quais estes tipos de levantamentos ainda são amplamente utilizados. Os métodos modernos ganharam bastante destaque nos últimos anos por conta da sua capacidade de fornecer informações muitas vezes em tempo real com precisões cada vez mais compatíveis com as obtidas a partir de métodos clássicos. Uma análise a respeito das precisões alcançadas por técnicas de levantamentos clássicas e modernas é realizada em Santos et al. (2019). Cabe destacar que nos dias atuais a concepção de redes geodésicas de monitoramento de estruturas pode ocorrer de maneira híbrida com técnicas de levantamentos clássicas e modernas sendo utilizadas em diferentes fases da concepção da rede. O sistema geodésico implantado é constituído por uma rede planialtimétrica local, apresentada em Canto (2018) e Canto e Seixas (2020) e densificada neste trabalho utilizando estações totais.

## 3 Metodologia

Neste item será abordada a metodologia e a aplicação dos métodos de levantamentos em campo.

### 3.1 Área de estudo e materiais

A área de estudo está localizada no município de Gravatá – PE, a aproximadamente 70 km da capital do estado. O local contempla o Parque Eólico da Eólica tecnologia Ltda., em uma região onde se pode observar um relevo fortemente ondulado, caracterizado pela presença de afloramentos rochosos. Esta localidade apresenta as condições ideais para a realização de estudos em terrenos inclinados e possui pontos de referência pré-determinados, possibilitando o adensamento da rede geodésica e investigação dos métodos de medição para o estudo de recalques e deslizamentos em terrenos inclinados. Embora o parque conte com a existência de 9 torres eólicas o sistema geodésico de monitoramento implantado abrange as imediações das torres eólicas Gravatá 01, 02, 03 e 04.

Os seguintes equipamentos, acessórios e *softwares* foram utilizados: Estações totais *Topcon GPT-3200N* com precisão angular de  $\pm 5''$  e precisão linear de  $\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm} \cdot D)$ , classificada de precisão média de acordo com a NBR 13133 Associação Brasileira de Normas Técnicas

(1994), acessórios para o levantamento de campo, tais como: prismas circulares, bastões, tripés, suportes bastão – tripé, trenas, fitas adesivas, apoio logístico, pinos de superfícies semiesféricas, pino de adaptação parafuso e mira, parafusos de roscas para adaptação dos prismas na rocha, cola de concreto, marcos geodésicos, hastes metálicas, lanternas e chaves fixas, além de gerador de energia. Na Figura 1 é possível visualizar a Rede Geodésica Planialtimétrica Local implementada na área de estudo, assim como as torres eólicas.

A RNPO08 visualizada na Figura 1 serve como referência absoluta da Rede Geodésica altimétrica Local concebida na área de estudo e levantada com o nível digital de altíssima precisão, detalhes acerca da materialização desta rede podem ser consultados em Canto (2018) e Santos (2020). Neste trabalho são abordados os resultados advindos da Rede Geodésica Planialtimétrica.

### 3.2 Procedimento Metodológico

A metodologia desenvolvida no trabalho está dividida em cinco fases distintas. Na primeira, tem-se o enfoque das atividades voltadas ao planejamento do trabalho como um todo, nesta fase foram definidos os objetivos do trabalho, área de estudo e um levantamento bibliográfico que embasasse a realização do estudo. Em uma segunda fase o foco do trabalho é direcionado para a aplicação de métodos de verificação e ajuste dos equipamentos a serem utilizados na coleta de observações em campo, no qual foi realizada a verificação da estação total (método de

verificação de limbo horizontal e limbo vertical) – Campo de pontos NIATE/CCEN/CTG – UFPE para a realização da Rede Planialtimétrica Local.

Em seguida na terceira fase os esforços foram direcionados a densificação dos pontos de referência e dos pontos-objeto: os pontos de referência envolveram as 4 torres eólicas e a medição dos pontos em terrenos inclinados; os pontos-objeto foram materializados em terreno inclinado entre as torres Gravatá 01 e 02. Estes pontos foram adaptados para permitir observações tanto com uma mira vertical quanto com um prisma óptico.

Na quarta fase foram realizadas as medições com a aplicação dos métodos de levantamentos geodésicos/topográficos responsáveis pela aquisição dos dados necessários a concepção do sistema geodésico de monitoramento planialtimétrico:

- Medição da Rede Planialtimétrica Local com estação total;
- Medição dos pontos-objeto em terreno inclinado com estação total.

Por fim na quinta fase foram realizados os respectivos processamentos dos dados e as análises dos resultados. As operações de campo foram iniciadas em dezembro de 2018 através de um reconhecimento de campo na área de estudo e conseqüente definição da melhor configuração espacial para a adição de novos vértices a rede geodésica planialtimétrica preexistente no local. E em seguida novas campanhas de medição foram realizadas em fevereiro, setembro e outubro de 2019.

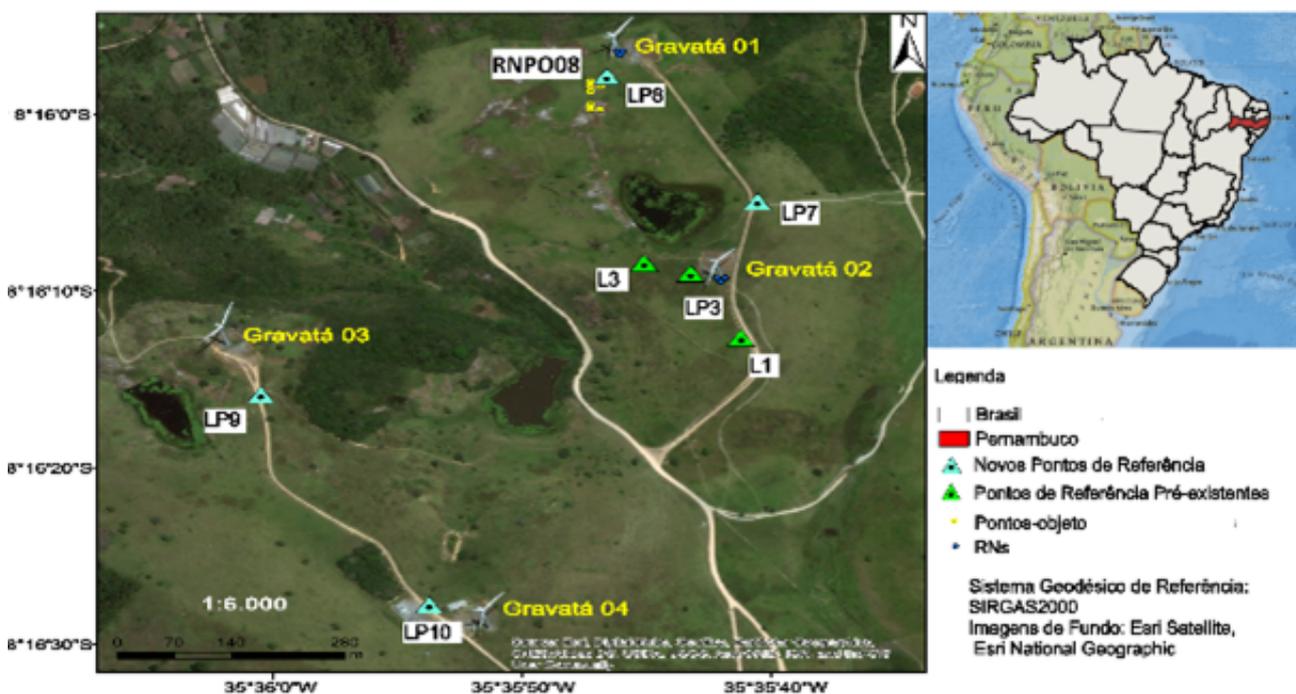


Figura 1 Rede Geodésica Planialtimétrica Local.

Diante da importância dos dados fornecidos a partir de um sistema geodésico de monitoramento é fundamental que se tenha confiança no que diz respeito a qualidade dos resultados encontrados. Neste trabalho, além da verificação específica dos equipamentos utilizados também se adotou a utilização do método das direções com a aplicação de no mínimo duas séries de leituras conjugadas e o emprego de centragem forçada visando garantir a qualidade da estrutura geodésica implantada. Após a verificação e ajuste dos equipamentos utilizados, deu-se início em campo a densificação da estrutura geodésica preliminarmente existente nas dependências da Eólica Tecnologia Ltda.

Ao todo foram adicionados à estrutura geodésica de referência planialtimétrica quatro novos marcos geodésicos, confeccionados conforme orientações para padronização de marcos geodésicos, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008). As coordenadas destes marcos foram obtidas através da utilização dos métodos da interseção a ré, triangulação, nivelamento geométrico de altíssima precisão em Santos (2020) e nivelamento trigonométrico. A definição da localização dos novos marcos foi direcionada de modo a formar bases de observações, das quais fosse possível determinar via métodos da interseção a vante e da irradiação múltipla as coordenadas planialtimétricas de oito pontos-objeto fixados sobre um terreno inclinado com afloramentos rochosos localizado nas imediações da torre eólica Gravatá 01. Tais pontos foram definidos, conforme item 3.3 e possuem como principal finalidade o estabelecimento de um referencial absoluto para a observação de recalques nas fundações das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02, conforme Santos (2020). Os respectivos modelos matemáticos dos métodos de

levantamentos geodésicos/topográficos utilizados podem ser encontrados em Kahmen e Faig (1988) e Silva e Segantine (2015). Detalhes acerca do modelo paramétrico do Método dos Mínimos Quadrados utilizado para o ajustamento das observações podem ser consultados em Gemael (1994).

### 3.3 Rede Geodésica Planialtimétrica Local

A Rede Geodésica Planialtimétrica Local deste trabalho, conta com a existência de sete marcos geodésicos, sendo eles denominados L1, L3, LP3, LP7, LP8, LP9 e LP10 (Figura 1), onde os três primeiros foram implantados em Canto (2018) e foram determinados a partir do método de posicionamento GNSS estático. Os vértices L3 e LP3 foram utilizados como alinhamento azimutal para a determinação de pontos de referência pelo método da triangulação e interseção a ré.

Os novos vértices (LP7, LP8, LP9 e LP10) foram distribuídos espacialmente em locais nos quais pudessem servir de bases referenciais para a realização de observações. Durante o reconhecimento essas localizações foram determinadas via método da irradiação 3D considerando observações em três séries conjugadas. Em campo definiu-se duas configurações para instalações das bases, uma base curta com distribuição espacial aproximadamente perpendicular a um terreno inclinado com afloramentos rochosos localizado nas imediações da torre eólica Gravatá 02 e uma base longa locada na superfície de modo aproximadamente paralelo ao mesmo terreno. Tais bases são formadas respectivamente pelo conjunto de vértices L3-LP7 e LP9-LP10. A materialização dos pontos de referência pode ser visualizada na Figura 2A, B e C.



**Figura 2** Materialização de pontos de referência; A. Materialização de marco geodésico; B. Marco geodésico LP9; C. Prisma centrado sobre marco geodésico LP9.

Estas bases de observação têm como objetivo o monitoramento planialtimétrico de oito pontos-objeto fixados em afloramentos rochosos localizados em um terreno inclinado nas proximidades da torre eólica Gravatá 01, tais pontos foram denominados PO01, PO02, PO03, PO04, PO05, PO06, PO07 e PO08, sendo materializados neste trabalho. O vértice LP8, a aproximadamente 5 metros de distância dos oito pontos-objeto, é o único ponto de referência nas proximidades da torre Gravatá 01, sua implantação teve o objetivo de facilitar futuras densificações da rede de referência no entorno desta torre.

Na campanha de levantamento realizada em 13/02/2019 além da materialização de pontos de referência, conforme Figura 2, foram aplicados os métodos de levantamento responsáveis pela aquisição de suas coordenadas planimétricas. Tendo as mesmas sido determinadas a partir da utilização do método da interseção a ré (vértice LP9) e do método da triangulação (vértices LP7, LP8 e LP10). Apesar da interseção a ré ser comumente utilizada na densificação de redes geodésicas, sua aplicação também teve como objetivo fornecer uma base composta pelos vértices L3 e LP9, capaz de dar seguridade a geometria da

rede de triangulação e um maior número de observações redundantes para o ajustamento das observações via modelo paramétrico do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Deste modo LP7, LP8 e LP10 foram determinados via método da triangulação com base fixa definida pelos vértices L3 e LP9. A execução da triangulação em campo é ilustrada na Figura 3.

A aplicação dos métodos da interseção a ré e da triangulação teve uma duração de 8 horas, divididas entre a implantação física dos marcos e a coleta das observações. Posteriormente durante a fase de processamentos, notou-se que seriam necessárias a coleta de novas observações com o objetivo de adquirir um maior número de observações redundantes e melhorar a geometria da rede de triangulação implementada. Essas novas observações foram coletadas em 07/11/2019. Ao todo foram coletadas 20 observações considerando os dois levantamentos realizados, das quais se considerou as 12 observações iniciais, como ângulos, e as 8 últimas como distâncias. As estações ocupadas e os vértices visados durante aplicação da triangulação podem ser vistas na Tabela 1.

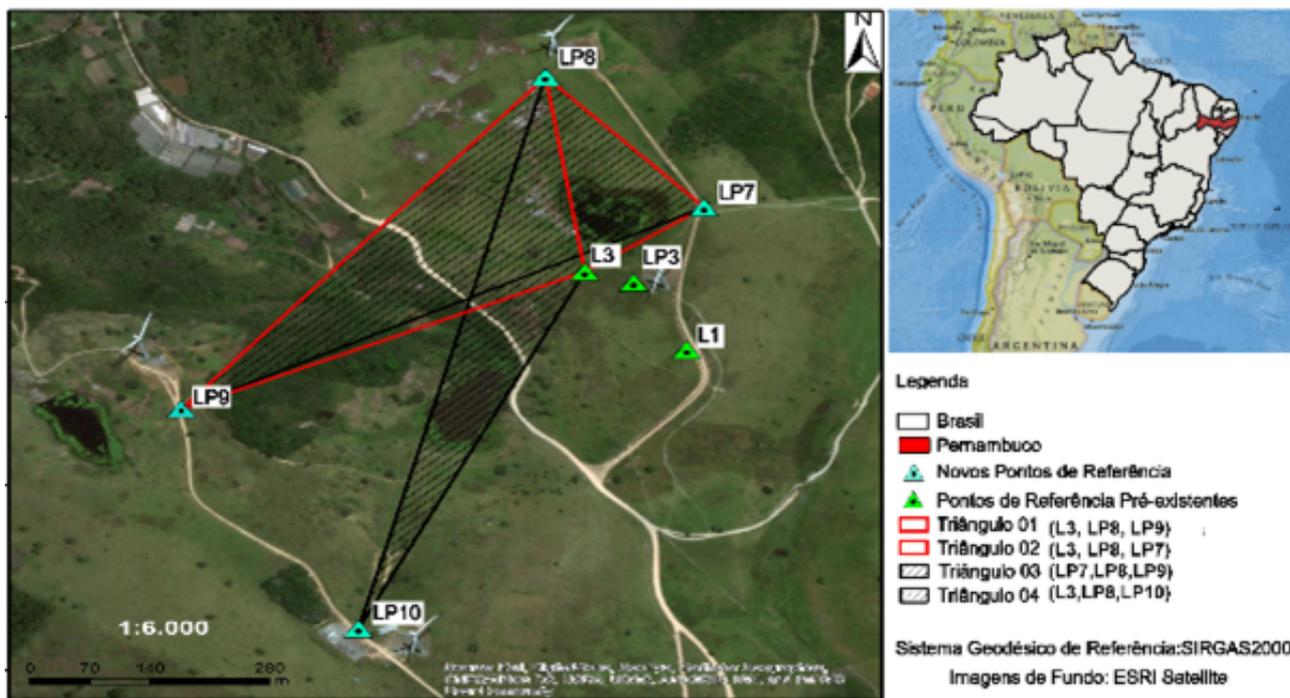


Figura 3 Rede de Triangulação.

**Tabela 1** Rede de observações coletadas a partir dos vértices de referência

Est	Estação Visada	Observação Coletada	Data de Execução
LP8	L3, LP10, LP7, LP9	Angular, linear	13/02/2019
LP7	LP9, L3, LP8	Angular, linear	13/02/2019
L3	LP9, LP8, LP10, LP7, LP3	Angular, linear	13/02/2019
LP9	L3, LP3, LP7, LP8, L1	Angular, linear	13/02/2019
LP10	L3, LP8	Angular, linear	07/11/2019

A densificação do sistema geodésico de monitoramento a partir da utilização do método da interseção a ré e da triangulateração possibilitou a realização de observações direcionadas aos oito pontos-objeto fixados em afloramentos rochosos conforme mencionado anteriormente neste item. Estes pontos são representados por pinos confeccionados especialmente para o trabalho e constituem um conjunto de 8 parafusos macho/fêmea com diâmetro de 20 mm de modo que é possível através deles fixar tanto um adaptador-prisma para a observação de medidas angulares e lineares quanto uma haste metálica para o posicionamento de miras verticais. A locação destes pinos foi realizada em 03/10/2019 sendo planejada a ter quadriculados de 10 metros ao longo da superfície rochosa, no entanto, percebeu-se em campo que alguns pontos ao serem locados de 10 em 10 metros não ficavam posicionados sobre o solo rochoso. Sendo assim, optou-se por dar espaçamento de 20 metros para o ponto PO05 em relação a PO06. Os pontos foram locados com auxílio de uma trena de fibra de vidro, a rocha foi perfurada com auxílio de um martelo, uma broca de 20 mm e um gerador elétrico de 3,5 Kva, uma vez que não há energia elétrica na localidade e os parafusos foram fixados na rocha com auxílio de cola Epóxi em uma

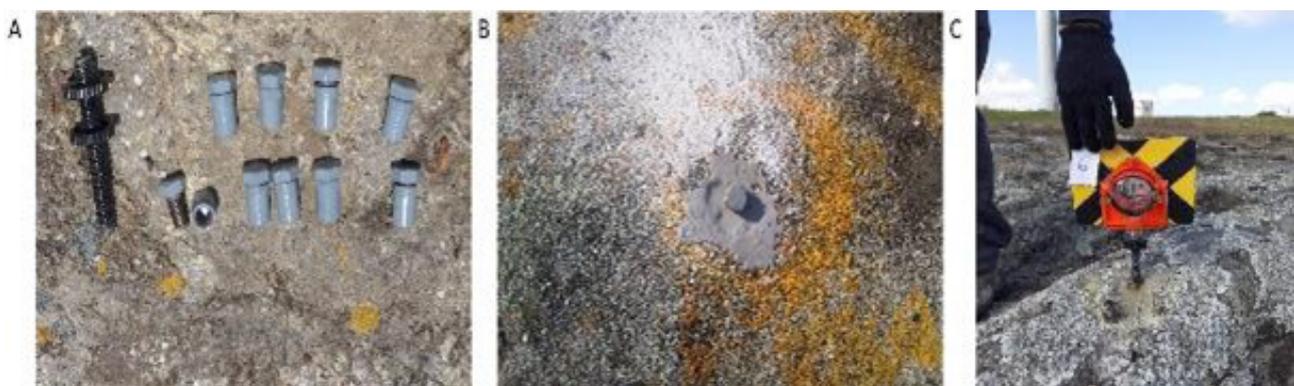
mistura 2X1. Detalhes acerca do procedimento de campo podem ser visualizados na Figura 4A, B e C.

A configuração inicial das bases de observação direcionadas aos pontos-objeto era composta pelos vértices LP7-L3 e LP9-LP10. Situações de campo, no entanto, impossibilitaram a observação de ponto-objeto a partir da base L3-LP7 o que tornou necessária a adoção de uma terceira configuração de bases composta pelos vértices L3-LP9. O método adotado para a observação dos pontos-objeto foi a interseção a vante, conforme modelo matemático de ajustamento demonstrado em Kahmen & Faig (1988). Uma ilustração da aplicação do método em campo é visualizada na Figura 5.

A execução do método em campo ocorreu em 07/11/2019 e teve uma duração de 7 horas com o auxílio de uma equipe formada por 4 pessoas. Os pontos com coordenadas conhecidas foram formados pelos vértices L3-LP9 (intervisíveis entre si) e LP9-LP10 (não intervisíveis). Os prismas foram diretamente parafusados sobre os 8 pontos-objeto, conforme Figura 5(C) e a coleta das observações foi realizada, considerando-se duas séries de leituras conjugadas (Posição Direta - PD e Posição Inversa - PI da luneta). A ordem de distâncias máximas observadas a partir das bases L3-LP9 e LP9-LP10 em direção aos pontos-objeto fixados em afloramento rochoso foi de 750 m e 936 m, respectivamente. Enquanto que as mínimas foram de 274 m e 708 m, respectivamente a partir de L3-LP9 e LP9-LP10.

## 4 Resultados e Discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões obtidas a partir da concepção da Rede Geodésica Planialtimétrica Local.



**Figura 4** Fixação de pontos-objeto na área de estudo 2; A. Conector de prisma óptico e conjunto de parafusos macho-fêmea; B. Ponto-objeto; C. Prisma fixado sobre ponto-objeto.

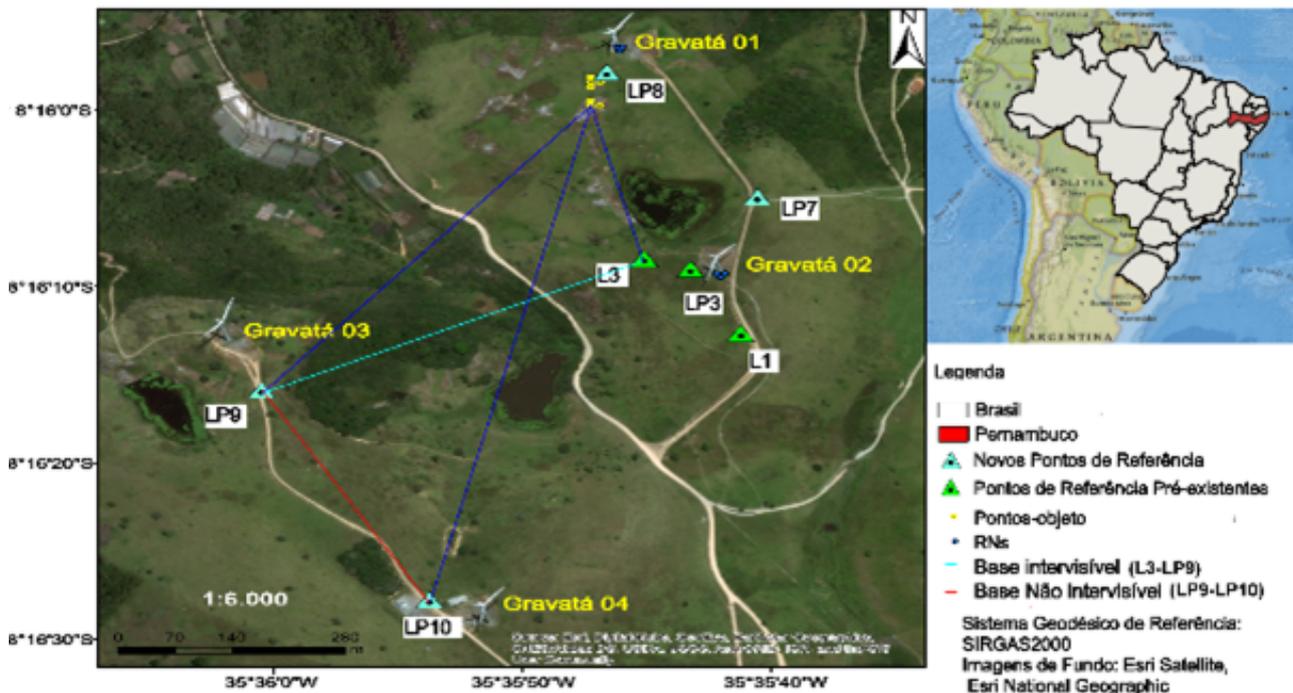


Figura 5 Bases de monitoramento implantadas na área de estudo 2.

#### 4.1 Rede Geodésica de Referência Planialtimétrica Local Determinada com Estação Total

Neste item são destacados os resultados alcançados via utilização de estação total para a determinação das coordenadas planimétricas dos pontos de referência LP7, LP8, LP9 e LP10 e respectivas discussões. Os termos deslocamentos verticais e deslocamentos planimétricos citados nos itens 4.1.3 e 4.2.1 podem ser entendidos, o primeiro, como recalques, quando os pontos-objeto são deslocados no sentido vertical para baixo e dependendo da magnitude poderá ser considerado como subsidência e o segundo, como deslizamentos, neste caso, é detectado movimento vertical para baixo e movimento dos pontos-objeto no sentido descendente de inclinação do terreno.

##### 4.1.1. Interseção a Ré

As coordenadas planimétricas do vértice LP9 foram obtidas através da aplicação do método da interseção a ré a partir da medição de ângulos e distâncias do vértice LP9 para os vértices L3, LP3 e L1 apresentados no item

3.3 a partir da Tabela 1. As coordenadas ajustadas através do modelo paramétrico do MMQ e os respectivos desvios padrão do vértice LP9 são apresentadas na Tabela 2.

A aplicação do método possibilitou a obtenção de coordenadas com precisões posicionais de  $\pm 15$  mm, respectivamente, em X e Y. O valor do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) calculado exposto na Tabela 2 está dentro do intervalo esperado, levando-se em consideração um número de dois graus de liberdade (6 parâmetros e 4 incógnitas). Sendo assim, a um grau de confiança de 95% as coordenadas obtidas foram aceitas.

##### 4.1.2. Triangulação

Os resultados advindos da aplicação do método da Triangulação foram ajustados utilizando o modelo paramétrico do MMQ. Os vértices L3 e LP9 tiveram suas coordenadas fixadas e serviram como base para a realização do ajustamento. Os resultados foram alcançados na 2ª iteração e utilizou-se o método da irradiação 3D a partir do alinhamento L3-LP9 para obter as coordenadas aproximadas dos vértices LP7, LP8 e LP10. As coordenadas ajustadas e os respectivos desvios padrão dos vértices LP7, LP8 e LP10 podem ser visualizadas na Tabela 3.

**Tabela 2** Coordenadas planimétricas (XY) e desvios padrão ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) no SGL SIRGAS2000 do vértice LP9

Estação	X (m)	Y (m)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$0,051 \leq \chi^2 \leq 7,378$
LP9	149.419,959	249.822,785	±15	±15	0,582

**Tabela 3** Coordenadas (XY) e desvios padrão ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) dos vértices LP7, LP8 e LP10

Estação	X (m)	Y (m)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$6,574 \leq \chi^2 \leq 23,685$
LP7	150.019,648	250.237,228	±5	±7	
LP8	149.826,068	250.454,229	±8	±3	8,594
LP10	149.610,758	249.543,153	±34	±13	

Nota-se a partir da análise da Tabela 3 que o valor do desvio padrão encontrado para a coordenada X do vértice LP10 apresentou um valor de  $\pm 34$  mm, quando na verdade esperava-se um valor de no máximo  $\pm 25$  mm compatível com os valores de precisão sob os quais se determinou os vértices LP9 e L3 utilizados como bases para o ajustamento da rede de triangulação. Essa discrepância pode ser justificada pelo fato de as medições angulares e lineares a partir do vértice LP10 terem sido realizadas em uma data posterior as realizadas a partir de LP7 e LP8, (vide Seção 3.3). Recomenda-se neste caso que as medições da rede de triangulação sejam todas realizadas em uma única campanha de medição.

A aplicação do teste de hipóteses considerando a distribuição  $\chi^2$  encontrou um valor de 8,594, valor este, que se enquadra no intervalo crítico admissível para situações, onde se tem 14 graus de liberdade (20 observações e 6 incógnitas) e 5% de nível de significância. Sendo assim, a um grau de confiança de 95% as coordenadas ajustadas obtidas foram aceitas. É importante ressaltar que o ajustamento da triangulação pode ser feito tridimensionalmente, no entanto, aqui, optou-se por separar planimetria da altimetria, uma vez que os dados planimétricos foram melhores do que os dados altimétricos obtidos com a estação total.

#### 4.1.3. Nivelamento Trigonométrico

As coordenadas altimétricas dos marcos geodésicos L3, LP9 e LP10 foram determinadas via nivelamento trigonométrico com correções dos efeitos da curvatura e da refração atmosférica. Como referências altimétricas foram utilizadas as cotas dos marcos geodésicos LP7 e LP8 com valores de 990,72803 m e 1001,03661 m. Os desvios padrão destas cotas são de  $\pm 0,06$  mm para LP7 e de  $\pm 0,01$  mm para LP8. As cotas altimétricas destes marcos foram determinadas via nivelamento geométrico de altíssima precisão realizado em Santos (2020), utilizando-se como referencial altimétrico a RNPO08 com cota definida no valor de 1000 metros.

Para o cálculo das cotas altimétricas de L3 e LP9 via nivelamento trigonométrico optou-se por considerar as observações angulares e lineares realizadas apenas a partir de LP7 e em direção a L3. A ideia inicial consistia em considerar as observações advindas tanto de LP7 como de LP8 e apresentar uma média das cotas de L3 e LP9 obtidas a partir destes vértices, no entanto, durante os processamentos, observou-se que os erros de fechamentos observados nos alinhamentos onde LP8 estava envolvido (LP8-L3/L3-LP8, LP8-LP9/LP9-LP8) atingiram valores de 0,044 m e 0,096 m, tendo o segundo valor especialmente ficado fora dos intervalos de precisão esperados. Na Tabela 4 são apresentadas as distâncias, efeitos da curvatura e da refração, desníveis e respectivos erros de fechamento nas observações que envolveram o vértice LP7.

O erro de fechamento máximo apresentado na Tabela 4 foi de 0,025 m no alinhamento (LP7-L3/L3-LP7), enquanto que os valores máximos devidos aos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica foram de respectivamente 0,065m e 0,008 m. Um sistema de monitoramento altimétrico com observações realizadas a partir de LP9 e L3 apenas pode detectar deslocamentos verticais superiores a 0,025 cm. Os valores são condizentes com os intervalos de precisão passíveis de serem alcançados pelo método de acordo com a literatura.

As cotas de L3 e LP9 foram calculadas considerando a média aritmética do módulo dos desníveis observados no nivelamento/contranivelamento de cada estação. Para o alinhamento LP7-L3/L3-LP7 o desnível médio foi de  $\pm 4,997$  m, enquanto que para o alinhamento LP7-LP9/LP9-LP7 esse valor foi de  $\pm 14,657$  m. O vértice LP10 teve sua coordenada calculada em função do vértice LP8, nesse caso não foi possível determinar erros de fechamento uma vez que apenas foram realizadas observações de LP10 em direção a LP8, ressalta-se nesse caso que conforme destacado no item 3.3 as observações de LP10 em relação a LP8 ocorreram em diferentes datas. As cotas altimétricas de L3, LP9 e LP10 são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 4** Dados do Nivelamento Trigonométrico

Estação Ocupada	Estação visada	Distância Inclinada (m)	Curvatura terrestre (m)	Refração atmosférica (m)	Desnível (m)	Erro de Fechamento (m)
LP7	L3	174,394	0,002	0,000	-5,009	-0,025
L3	LP7	174,394	0,002	0,000	4,985	
LP7	LP9	729,110	0,042	0,005	-14,668	-0,022
LP9	LP7	729,106	0,042	0,005	14,645	

**Tabela 5** Cotas altimétricas dos vértices L3, LP9 e LP10. \*Não houve redundância nas observações de LP10, por isso não há como determinar o desvio padrão.

Estação	Cota Altimétrica (m)	Desvio Padrão (mm)
L3	985,731	±12
LP9	976,072	±11
LP10	995,912	-

## 4.2 Determinação dos Pontos-Objeto com Estação Total

Neste item são discutidos os resultados obtidos via utilização de estação total para as coordenadas planialtimétricas dos pontos-objeto PO01, PO02, PO03, PO04, PO05, PO06, PO07 e PO08.

### 4.2.1. Método da Interseção a Vante

Os oito pontos-objeto observados a partir das bases de observação composta pelos vértices (LP9 – LP10) e (LP9 – L3) foram ajustados via modelo paramétrico do MMQ, utilizando como valores observados os azimutes e distâncias existentes entre os pontos LP9/LP10 e LP9/L3 e os pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa. As coordenadas planimétricas ajustadas e seus respectivos desvios padrão a partir da base LP9-LP10 podem ser vistas na Tabela 6.

Nota-se a partir da Tabela 6 que as precisões posicionais máximas e mínimas das coordenadas X e Y dos pontos-objeto analisados obtidas a partir da base LP9-LP10 foram de respectivamente ±30 mm para PO08 e ±22 mm para PO04, dito isto, pode-se afirmar que a partir desta base de monitoramento não poderão ser detectados deslocamentos planimétricos inferiores a ±30 mm. Neste caso, considerou-se como deslocamento mínimo identificável o valor do maior desvio padrão obtido para a coordenada posicional de um ponto-objeto e desprezou-se as precisões posicionais dos vértices integrantes da base de observação. As coordenadas planimétricas ajustadas e seus respectivos

desvios padrão a partir da base L3-LP9 podem ser vistas na Tabela 7.

As precisões posicionais obtidas a partir da base L3-LP9 foram notadamente superiores as encontradas a partir de LP9-LP10. Tendo o desvio padrão posicional máximo sido encontrado para os pontos-objeto PO01 e PO02 com valor de ±10 mm, enquanto o mínimo foi de ±7 mm em PO04. Utilizando o mesmo raciocínio empregado para a detecção de deslocamentos, entende-se que é confiável afirmar que a partir desta base somente serão detectados deslocamentos planimétricos superiores a ±10 mm.

A discrepância máxima obtida para a coordenada X de um ponto-objeto observado a partir das bases de observação LP9 – LP10 e LP9 – L3 foi de 30 mm para os pontos-objeto PO06 e PO07, enquanto a mínima discrepância em X considerando as duas bases de observação foi de 12 mm para a coordenada de PO01. A discrepância máxima em Y foi de 21 mm observada entre as coordenadas Y de PO05, PO06 e PO08, enquanto que a mínima foi de 9 mm para o ponto-objeto PO01.

As coordenadas planimétricas foram obtidas através de uma rotina iterativa desenvolvida no *software Matlab 2018<sup>a</sup>* e sete das oito observações convergiram na terceira iteração, a exceção foi a coordenada do ponto PO02 obtida a partir da base LP9 – LP10 que teve sua solução encontrada apenas na sexta iteração. Os resultados advindos da aplicação do teste do  $\chi^2$ , considerando os oito pontos-objeto analisados estiveram dentro do intervalo crítico admitido para situações, onde se tem dois graus de liberdade e um nível de significância de 5%.

### 4.2.2. Irradiação Múltipla

Os dados coletados referentes a aplicação da irradiação múltipla foram processados utilizando rotinas desenvolvidas no *software LibreOffice Calc*. As coordenadas planimétricas dos oito pontos-objeto foram obtidas a partir dos marcos geodésicos L3, LP9 e LP10. Os resultados que apresentaram maior compatibilidade em relação aos obtidos via interseção a vante foram encontrados a partir de L3 e LP10, sendo apresentados na Tabela 8.

**Tabela 6** Coordenadas planimétricas (X, Y) e desvios padrão ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ) dos pontos-objeto obtidos via interseção a vante a partir da base LP9-LP10

Estação	X (m)	Y (m)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_{xy}$ (mm)	$0,051 \leq \chi^2 \leq 7,378$
PO01	149.829,614	250.450,741	±25	±12	±28	4,275
PO02	149.831,476	250.440,892	±21	±10	±23	0,054
PO03	149.839,718	250.401,863	±21	±11	±24	3,748
PO04	149.829,901	250.399,679	±20	±10	±22	3,316
PO05	149.827,892	250.409,420	±22	±11	±25	4,072
PO06	149.823,761	250.428,932	±24	±12	±27	4,435
PO07	149.821,750	250.438,728	±26	±13	±29	4,843
PO08	149.819,860	250.448,532	±27	±13	±30	5,092

**Tabela 7** Coordenadas planimétricas (X, Y) e desvios padrão ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ) dos pontos-objeto obtidos via interseção a vante a partir da base L3-LP9. \*NO - Não Observado.

Estação	X (m)	Y (m)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_{xy}$ (mm)	$0,051 \leq \chi^2 \leq 7,378$
PO01	149.829,602	250.450,750	±10	±3	±10	4,124
PO02	149.831,446	250.440,912	±10	±3	±10	4,557
PO03	NO	NO	NO	NO	NO	NO
PO04	149.829,877	250.399,697	±7	±2	±7	2,487
PO05	149.827,863	250.409,441	±8	±3	±9	3,218
PO06	149.823,731	250.428,953	±9	±3	±9	3,533
PO07	149.821,720	250.438,748	±9	±3	±9	3,838
PO08	149.819,829	250.448,553	±10	±3	±10	4,219

**Tabela 8** Coordenadas planimétricas via irradiação múltipla a partir de L3 e LP10. \*Não houve redundância em PO03 por isso não foi possível determinar desvio padrão.

Est.	$X_{L3}$ (m)	$Y_{L3}$ (m)	$X_{LP10}$ (m)	$Y_{LP10}$ (m)	$X_m(m) \pm \sigma_x(mm)$	$Y_m(m) \pm \sigma_y(mm)$
PO01	149.829,586	250.450,747	149.829,534	250.450,751	149.829,560±26	250.450,749±2
PO02	149.831,400	250.440,905	149.831,343	250.440,925	149.831,372±29	250.440,915±10
PO03	NO	NO	149.839,586	250.401,897	149.839,586	250.401,897
PO04	149.829,895	250.399,700	149.829,777	250.399,710	149.829,836±59	250.399,705±5
PO05	149.827,879	250.409,444	149.827,792	250.409,444	149.827,836±44	250.409,444
PO06	149.823,717	250.428,950	149.823,649	250.428,959	149.823,683±34	250.428,954±4
PO07	149.821,712	250.438,747	149.821,623	250.438,757	149.821,668±44	250.438,752±5
PO08	149.819,819	250.448,551	149.819,765	250.448,553	149.819,792±27	250.448,552±1

Uma comparação realizada entre as coordenadas planimétricas obtidas via irradiação múltipla a partir de L3 e LP10 ( $X_m$ ,  $Y_m$ ) da Tabela 8 e os melhores resultados encontrados via interseção a vante, conforme Tabela 7 do item 4.2.1 mostram que 57,1% das discrepâncias modulares em X foram inferiores a 0,050 m com valores máximos que alcançaram 74 mm em PO02 e mínimos de 27 mm em

PO05. Enquanto que 100,0% das discrepâncias em Y foram iguais ou inferiores a 8 mm. Os resultados principalmente em X foram comprometidos pela precisão do vértice LP10 e pela distância do mesmo em relação aos pontos-objeto com ordem mínima de 884,115 m (LP10-PO04) e máxima de 933,594 m (LP10-PO01).

A mesma análise quando se leva em consideração apenas os resultados obtidos a partir de L3 apresenta discrepâncias máximas que em 85,7 % das análises não ultrapassa o valor de 18 mm para X com 100% dos valores em Y sendo iguais ou inferiores a 7 mm. A partir de L3 foi detectado um *outlier* com valor de 42 mm entre as coordenadas X de PO02 obtidas por interseção a vante e irradiação múltipla. As ordens de distâncias mínimas e máximas entre L3 e os pontos-objeto foram de respectivamente, 273,704 m (L3-PO02) e 324,027 m (L3-PO01). Nesta pesquisa foram excluídos os resultados alcançados via irradiação a partir de LP9, pois nesta situação encontrou-se discrepâncias em X e Y que alcançaram até 200 mm quando comparadas com os resultados obtidos via interseção a vante.

#### 4.2.3. Nivelamento Trigonométrico

Os pontos-objeto fixados em rocha tiveram suas cotas altimétricas calculadas a partir do nivelamento trigonométrico com correções do efeito da curvatura e da refração. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

A análise das cotas apresentadas na Tabela 9 mostram discrepâncias altimétricas absolutas a partir de L3 e LP9 de no máximo 19 mm em 57,14% dos casos, no entanto o percentual restante mostra discrepâncias absolutas superiores a este valor atingindo no máximo 63 mm e no mínimo 43 mm. Essas discrepâncias eram de certa forma esperadas, uma vez que as cotas de L3 e LP9 determinadas no item 4.1.3 e utilizadas aqui como referências para a

obtenção das cotas dos pontos-objeto apresentaram erros de fechamento de -25 mm e -22 mm, respectivamente, para L3 e LP9 (vide Seção 4.1.3).

## 5 Conclusões

O estudo e análise de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos realizado envolveu medições de redes geodésicas compostas por um conjunto de pontos de referência e pontos-objeto, materializados através da utilização de diferentes métodos de levantamentos geodésicos/topográficos.

A determinação dos pontos de referência da rede foi realizada a partir da aplicação do método da interseção a ré para o vértice LP9 e do método da triangulateração para os vértices LP7, LP8 e LP10 (vide Seção 3.3). Os pontos foram distribuídos de modo a formar bases de referência nas quais fosse possível a observação de oito pontos-objeto fixados em afloramentos rochosos localizados sobre um terreno inclinado através da aplicação do método da interseção a vante (vide Seção 3.3).

A partir da base de observação LP9-LP10 foram detectados desvios padrão posicionais máximos  $\pm 30$  mm em PO08 e mínimos de  $\pm 22$  mm em PO04 (vide Seção 4.2.1), este fato permite concluir que os deslocamentos planimétricos inferiores a este intervalo não seriam detectados a partir desta base. O mesmo não foi observado em relação a base LP9-L3 que obteve desvio posicional máximo de  $\pm 10$  mm em PO01 e PO02 e mínimo de  $\pm 7$  mm em PO04 (vide Seção 4.2.1), sendo seguro admitir que

**Tabela 9** Nivelamento Trigonométrico a partir de L3 e L9. \*D.I – Distância Inclinada,  $\delta R_0$  – Efeito da Curvatura,  $\delta \kappa$  – Efeito da Refração.

Estação Ocupada	Ponto Visado	D.I (m)	$\delta R_0$ (mm)	$\delta \kappa$ (mm)	$\Delta H$ (m)	Cota (m)
L3	PO01	324,312	8	1	14,992	1000,723
L3	PO02	314,308	8	1	14,677	1000,408
L3	PO03	NO	NO	NO	NO	NO
L3	PO04	273,872	6	1	10,939	996,670
L3	PO05	283,836	6	1	11,525	997,256
L3	PO06	303,833	7	1	13,325	999,056
L3	PO07	313,841	8	1	13,792	999,523
L3	PO08	323,834	8	1	14,172	999,903
LP9	PO01	750,131	44	6	24,705	1000,78
LP9	PO02	742,926	43	6	24,340	1000,41
LP9	PO03	715,487	40	5	21,084	997,16
LP9	PO04	707,981	39	5	20,534	996,61
LP9	PO05	714,807	40	5	21,165	997,24
LP9	PO06	728,660	42	5	23,013	999,08
LP9	PO07	735,742	42	6	23,408	999,48
LP9	PO08	742,961	43	6	23,841	999,91

deformações inferiores a  $\pm 7$  mm não são detectáveis pela base LP9-L3. Ressalta-se que o vértice LP10 foi medido em campanhas de medição realizadas em épocas diferentes das realizadas para os vértices LP8, LP7 e LP9, tendo sido observado, na ocasião da medição, possíveis variações no entorno do vértice, o que pode ter interferido na precisão alcançada (vide Seções 3.3 e 4.2.1) e consequentemente sido replicado para a observação de pontos-objeto a partir da base LP9-LP10.

As coordenadas dos oito pontos-objeto fixados sobre a superfície rochosa obtidas via irradiação múltipla estiveram dentro de um intervalo de precisão aceitável quando comparado as coordenadas ajustadas obtidas via interseção a vante, no entanto, ressalta-se que esta compatibilidade pôde ser alcançada devido a adoção de procedimentos como a centragem forçada, emprego do método das direções e a confecção de um adaptador para o prisma óptico utilizado nas observações (vide Seção 3.3). Aqui também vale destacar que os resultados da irradiação considerando apenas L3 são mais compatíveis com os alcançados via interseção a vante (vide Seção 4.2.2).

A altimetria dos ponto-objeto obtida via nivelamento trigonométrico com correções dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica foi realizada a partir dos vértices L3 e LP9 que também tiveram cotas determinadas a partir deste método. Um percentual significativo das cotas altimétricas dos pontos-objeto obtidas a partir de L3 e LP9 apresentaram discrepâncias superiores ao nível de precisão passível de ser alcançado a partir do nivelamento trigonométrico. Essas incertezas minimizam a confiabilidade para detecção de deslocamentos verticais a partir do sistema de monitoramento implantado, sendo recomendado uma nova aplicação do método na área de estudo para verificar se de fato há coerência nos resultados.

Acima do valor da qualidade posicional alcançada para a rede geodésica planimétrica local implementada com estação total, presume-se que é possível detectar de acordo com a classificação da International Union of Geological Sciences (1995) baseada em Varnés (1984) movimentações de velocidades lentas, com valores superiores a 1,6 m/ano que caracterizam movimentos de massa do tipo escorregamentos e escoamentos.

É importante destacar que a capacidade de detecção de movimentações em terrenos susceptíveis a recalques e deslizamentos informada no parágrafo anterior está baseada apenas na qualidade posicional alcançada durante a implantação da rede geodésica planimétrica. Para finalidades de monitoramento de recalques e deslizamentos nestes terrenos deve haver uma aplicação periódica de métodos de levantamentos topográficos e geodésicos. Os dados obtidos em épocas diferentes auxiliam o estudo geotécnico acerca do local estudado, possibilitando o conhecimento dos parâmetros de movimentação do terreno inclinado.

Os oito pontos-objeto fixados sobre afloramento rochoso localizado nas imediações das torres eólicas estudadas são alternativas admissíveis para o estabelecimento de um referencial altimétrico absoluto para o monitoramento de recalques e deslizamentos em terrenos inclinados, uma vez que presume-se que tais pontos estão livres das ações de deformações estruturais.

A metodologia utilizada no trabalho pode ser aplicada em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos localizados em outras áreas de estudo, desde que se atenha as limitações de cada método de levantamento empregado. Também há de se considerar a utilização de equipamentos que minimizem a influência de erros humanos na coleta das observações. A utilização de estações totais robotizadas, laser scanner e o Lidar são exemplos de geotecnologias que podem otimizar o processo de materialização das redes geodésicas e facilitar a coleta periódica de dados.

## 6 Agradecimentos

Nossos agradecimentos a Eólica Tecnologia Ltda pela autorização da realização dos experimentos de campo nas suas dependências e por todo suporte concedido ao longo do trabalho. Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação pela concessão dos equipamentos e acessórios locados no Laboratório de Geodésia – LAGEO e no Laboratório de Topografia – LATOP. Aos projetos de Pesquisa: Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG/CTG/UFPE – PROPESQ/UFPE, processos número 23076.040512/2015-15 e número 23076.016133/2018-57; Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados, processo número 23076.16133/2018-57; A Geodésia Aplicada à Discretização de Edificações Prediais e o Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica PROPESQ/UFPE, processo número 23076.011861/2017-91. Aos alunos Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Priscilla Heliênay, Luiz Canto e Leonardo Barbosa e ao Engenheiro Civil Raphael Seixas pelas suas participações na aquisição dos dados em campo apresentados.

## 7 Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas 1994, *NBR 13133/94: Execução de Levantamento Topográfico*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas 2019, *NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- Canto, L.F.C & Seixas, A., 2020, 'Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: Definição do Sistema de Referência e de Medição para o Monitoramento', *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 72, no. 2, pp. 294-311.
- Canto, L.F.C. 2018, 'Metodologia para o Monitoramento Geodésico em Torres Eólicas Onshore', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Cruz, W., Faggion, P.L. & Muggio, M.R., 2019, 'Análise dos resultados de processamentos de dados GNSS aplicado ao monitoramento de estruturas, utilizando efemérides transmitidas, precisas e o Posicionamento por Ponto Preciso do IBGE', *Revista Brasileira de Geomática*, vol. 7, no. 1, pp. 61-79.
- Euriques, J.F. & Krueger, C.P., 2017, 'Investigação da Movimentação Vertical na Estrutura da BCAL/UFPR', *IV Simpósio Brasileiro de Geomática*, pp. 511-8.
- Farah, F. 2003, *Habituação e encostas*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.
- Gemael, C. 1994, *Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas*, Editora UFPR, Curitiba.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2008, *Padronizações de Marcos Geodésicos*, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides 1995, 'A Suggested Method for Describing the Rate of Movement of a Landslide'. *Bulletin of The International Association of Engineering Geology*, vol. 52, no. 1, pp. 75-8.
- Kahmen, H. & Faig, W. 1988, *Surveying*, Walter de Gruyter, Berlin.
- Neves, R.V., Faggion, P.L., Nadal, C.A. & Veiga, L.A.K. 2014, 'Avaliação da Aplicação de Técnicas Geodésicas no Monitoramento de Estruturas Civas', *Revista Brasileira de Geomática*, vol. 2, no. 2, pp. 67-75.
- Paese, C.P.M., Werlich, R.M.C., Krueger, C.P. & Garnés, S.J.A. 2014, 'Aplicação de estrutura geodésica no monitoramento de área de escorregamento de terra', *V Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia Da Geoinformação*, pp. 473-80.
- Rhadamek, A.A.P. & Silva, T.F. 2012, 'Monitoramento geodésico de uma encosta em processo de deslizamento de terra', *IV Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação*, pp. 1-9.
- Sabuncu, A. & Ozener, H. 2014, 'Monitoring vertical displacements by precise levelling: a case study along the Tuzla Fault, Izmir, Turkey', *Geomatics, Natural Hazard and Risk*, vol. 5, no. 4, pp. 320-33.
- Santos, M.C. 1999, *Estabilidade das Estruturas Geodésicas*, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Santos, W.J. 2017, 'A contribuição da Topografia e da Geodésia no estudo de terrenos inclinados e áreas de risco', Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco.
- Santos, W.J., Seixas, A. & Santos, S.M. 2019, 'Avaliação da Aplicação e Eficácia de Métodos de Medição Geodésicos e Topográficos nos Levantamentos de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas de Risco', *Revista Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 4, pp. 267-83.
- Santos, W.J. 2020, 'Sistemas de Medição Geodésica e Detecção de Movimentos 3D em Terrenos Inclinados Susceptíveis a Recalques e Deslizamentos'. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Seixas, A., Pacheco, A.P., Veiga, L.A.K., Santos, D.P. & Faggion, P.L., 2007, 'Uma Abordagem Geodésica de Técnicas Ópticas de Medição Tridimensional para Determinação e Transporte de Alturas em Áreas de Risco', *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 13, no. 1, pp. 165-85.
- Seixas, A., Seixas, J.R. & Seixas, J.J. 2009, 'Auscultação Geodésica No Controle De Recalque Da Fundação De Edifício Predial De Grande Porte', *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 15, no. 21, pp. 277-98.
- Siguel, A.R., Faggion, L.P., Veiga, L.A.K., Nadal, C.A., Mattos, M.S. & Soares, M.A. 2013, 'Aplicação do Método de Irradiação Tridimensional no Monitoramento de Barragens', *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 19, no. 3, pp. 391-406.
- Silva, I. & Segantine, P.C.L., 2015, *Topografia para Engenharia Teoria e Prática de Geomática*, Elsevier, Rio de Janeiro.
- Silva, E.V. & Seixas, A. 2019, 'Análise da Estabilidade da Rede Geodésica Altimétrica Local Densificada no Campus Recife da UFPE', *Revista Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 2, pp. 350-65.
- United States Geological Survey 2008, *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*, United States Geological Survey, Virginia.
- Varnés, D.J. 1984, *Landside Hazard Zonation: a Review of Principles and Practices*, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris.
- Viski, A.R. & Krueger, C.P. 2017, 'Desenvolvimento de Equipamentos Destinados a Aferição de Antenas/GPS Aplicadas na Prevenção de Desastres Naturais', *IV Simpósio Brasileiro de Geomática*, pp. 463-69.

Recebido em: 17/08/2020

Aprovado em: 23/04/2021

### Como citar:

Santos, W.J. & Seixas, A. 2021, 'Medições Geodésicas para Detecção de Movimentos em Terrenos Inclinados Susceptíveis a Recalques e Deslizamentos', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 37543. [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_37543](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_37543)