



Planejamento de Rede de Monitoramento de Estruturas Empregando-se LST (Laser Scanner Terrestre)

Design of Monitoring Geodetic Networks of Data Using the LST (Laser Scanner Terrestrial)

*Évelin Moreira Gonçalves*¹
*Luis Augusto Koenig Veiga*²

Recebido em abril de 2019.
Aprovado em julho de 2019.

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados os procedimentos realizados no projeto de uma rede de monitoramento geodésico de uma barragem, empregando-se Laser Scanner Terrestre (LST). A premissa de que o modelo final do objeto tridimensional monitorado é gerado através da concatenação de diversas nuvens de pontos, obtidas a partir de várias estações de observação, norteou a definição de alguns critérios considerados no planejamento da coleta de dados em campo com LST. A definição desses critérios se deu a partir de testes realizados com o Laser Scanner FARO FOCUS 3D 120, em 9 diferentes cenários. Nos quais foi analisada a influência que alguns parâmetros, como a resolução da nuvem de pontos e a distância do LST em relação ao objeto, podem exercer no resultado final do monitoramento. Desta forma foi possível propor três diferentes hipóteses para a rede, baseadas nesses critérios. Em um modelo digital 3D da barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) Mauá, local para o qual foi realizado o estudo, simulou-se amostras de dados para cada uma das três hipóteses. Estes dados foram utilizados nas equações de propagação de erros, gerando as incertezas esperadas para os pontos objeto de cada cena. A análise incluiu também as incertezas posicionais em função do diâmetro do feixe laser. Por fim, foi eleita a rede que melhor atendeu as expectativas do monitoramento do ponto de vista das precisões e da funcionalidade de coleta de dados em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Laser Scanner Terrestre. Monitoramento de estruturas. Planejamento de redes geodésicas.

¹Departamento Acadêmico de Construção Civil. Curso Técnico de Agrimensura. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Santa Catarina, Brasil. E-mail: evelin.goncalves@ifsc.edu.br

²Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Brasil. E-mail: kngveiga@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents the procedures performed in the design of a geodetic monitoring network of a dam, using Terrestrial Laser Scanner (LST). The premise that the final model of the monitored three-dimensional object is generated through the concatenation of several point clouds, obtained from various observation stations, guided the definition of some criteria considered in the planning of field data collection with LST. These criteria were defined based on tests performed with the FARO FOCUS 3D 120 Laser Scanner in 9 different scenarios. The influence that some parameters, such as point cloud resolution and the distance of the LST from the object, can exert on the final monitoring result, were analyzed. Thus it was possible to propose three different hypotheses for the network, based on these criteria. In a 3D digital model of the dam of the Mauá Hydroelectric Power Plant (HPP), where the study was conducted, data samples were simulated for each of the three hypotheses. These data were used in the error propagation equations, generating the expected uncertainties for the object points of each scene. The analysis also included positional uncertainties as a function of laser beam diameter. Finally, the network that best met expectations for monitoring from the standpoint of accuracy and field data collection functionality, was selected.

KEYWORDS: Terrestrial Laser Scanner. Structure monitoring. Geodetic network planning.

* * *

Introdução

Desde o momento em que foram introduzidos no mercado os primeiros sistemas comerciais de Laser Scanner Terrestres (LST), abriu-se uma nova fase na determinação de coordenadas, com a possibilidade de medir milhões de pontos no objeto de interesse em um curto espaço de tempo, comparativamente às técnicas tradicionais, como estação total ou Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) (MUKUPA et al., 2016). Esta capacidade logo foi pensada para aplicações no monitoramento de grandes obras (FERRAZ, 2016; LENARTOVICZ et al., 2014). Oferecendo vantagens como o controle remoto, dispensando acessibilidade direta ao objeto e a superabundância de dados.

Neste caso em função das dimensões do objeto monitorado, existe a necessidade de realizar várias ocupações com o instrumento de forma a compor o modelo tridimensional da estrutura a partir de várias nuvens de

pontos. Ao contrário das técnicas geodésicas tradicionais, onde o monitoramento é baseado na comparação de coordenadas de alguns pontos selecionados em diferentes épocas, ao se realizar o monitoramento utilizando um LST, essas comparações deixam de ser pontuais e passam a ser globais. A detecção e caracterização de possíveis deslocamentos nas estruturas são realizadas comparando as nuvens de pontos coletas em duas ou mais épocas distintas, ou ainda, com subprodutos gerados a partir desses dados, como planos ou outros elementos geométricos.

Algumas particularidades na utilização desta tecnologia são determinantes na qualidade dos resultados, como a resolução espacial dos pontos ao longo da nuvem, a divergência do pulso laser e a posição do equipamento em relação ao objeto a ser medido (LENARTOVICZ et al., 2014). Segundo Van Genechten et al. (2008), se o ângulo de incidência entre o feixe laser e a superfície do objeto diminui, sua intensidade também é reduzida. Isso pode ocasionar falhas ou falsos resultados no levantamento de pontos.

Borges et al. (2018), aponta a importância de se utilizar um equipamento devidamente calibrado. Segundo o autor a presença de erros sistemáticos inerentes ao instrumento, quando não corrigidos ou modelados a priori, degrada sobremaneira a nuvem de pontos.

Outro ponto a ser considerado é a necessidade ou não de materialização física das estações de observação, ou onde o LST será instalado. Embora as nuvens de pontos possam ser geradas em épocas distintas através de diferentes posições do instrumento, manter a geometria busca garantir repetibilidade das condições de observação. No caso de trabalhos de monitoramento, onde dados de épocas diferentes são comparados, isto tende a ser uma vantagem.

Desta forma, este trabalho apresenta uma metodologia para concepção do projeto de primeira ordem de uma rede de monitoramento com LST, baseada em critérios de aplicabilidade do método na região estudada.

Como projeto de primeira ordem entende-se a escolha da melhor localização das estações em função do modelo matemático de determinação das coordenadas e do equipamento empregado.

Para viabilizar este estudo, primeiramente, foram realizados experimentos no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), buscando através de nove diferentes testes, definir alguns critérios de localização do LST em função do objeto monitorado.

Estes critérios serão aplicados na segunda etapa do estudo, que consiste na proposição de três diferentes geometrias para a rede de monitoramento da Usina Hidrelétrica de Mauá (UHE Mauá), localizada no Rio Tibagi entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba no Paraná.

A caracterização da influência dos efeitos de espalhamento do feixe laser bem como as técnicas de pré-análise basearam a escolha da geometria mais adequada da rede de monitoramento.

1 Planejamento de Redes Geodésicas

Torge (2003) classifica as redes geodésicas em três grandes níveis, a saber: redes globais que realizam o Sistema de Referência definido através da convenção internacional; redes nacionais que configuram a base para o levantamento territorial nacional ou continental, e para os Sistemas de Informações Geográficas bem como das cartas topográficas e temáticas; e por fim redes locais que são implantadas principalmente para projetos de engenharia, investigações geofísicas, determinação de procedimentos geodinâmicos, e monitoramentos geodésicos.

O projeto de implantação uma rede geodésica, tem como propósito obter um conjunto de pontos estáveis e bem definidos associados a coordenadas que atendam a uma determinada precisão. As etapas do projeto de implantação de uma rede vão desde o planejamento (pré-análise), materialização, coleta de dados em campo, até o ajustamento das observações

a fim de se estimar as coordenadas dos pontos e associá-las as suas precisões (KLEIN, 2014).

Quanto maior a importância atribuída à etapa de planejamento, maior a chance de otimização da rede chegando-se ao objetivo de precisão, acurácia, confiabilidade e custo reduzido (KUANG, 1996).

Tratando-se de unidades estruturais civis (barragens, pontes, etc. com suas respectivas fundações), a determinação de coordenadas de pontos vinculados às estruturas em épocas diferentes, deve ser associada ao mesmo referencial por meio de uma rede de referência estável, permitindo que se acompanhe o comportamento destes pontos ao longo do tempo e desta forma da própria estrutura (FAGGION et al., 2012).

Este processo de acompanhamento das coordenadas ao longo do tempo, juntamente com as análises de movimentações das estruturas, denomina-se monitoramento geodésico (OGUNDARE, 2016).

No âmbito do monitoramento geodésico de estruturas, alguns métodos de levantamentos vêm sendo pesquisados, entre eles estão o nivelamento geométrico de primeira ordem e nivelamento trigonométrico (SILVA, 2013), posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System), irradiação tridimensional (SIGUEL et al., 2013), e levantamentos com Laser Scanner Terrestre (LST) (LENARTOVICZ et al., 2014; SHEN, 2017). Cada um desses métodos tem suas particularidades no que tange o planejamento e a proposição da rede a ser empregada.

A aplicação da tecnologia LST no monitoramento de grandes estruturas é objeto de pesquisas, com resultados que demonstram que seu uso pode trazer importantes contribuições ao tema (LUO et al., 2017; SHEN, 2017; BENITO-CALVO et al., 2018).

Há também, o consenso de que as particularidades na empregabilidade destes equipamentos, devem ser melhor investigadas. Por exemplo, ao buscar discutir a influência da densidade de pontos na nuvem em um levantamento com LST, Lichti e Gordon (2004) afirmam haver alguns desafios, ao utilizar o LST, resultante de aspectos como a largura do feixe de

laser. No qual destacam a importância de se planejar o levantamento considerando esta significativa fonte erro na etapa de pré-análise.

Ideia que viria a ser ratificada por Lenartovicz et al. (2013), alguns anos mais tarde. Quando relata dificuldades ao se comparar dados coletados com LST em duas diferentes épocas. No monitoramento do comportamento da estrutura de uma barragem de concreto em uma usina hidrelétrica, durante a formação do reservatório.

Estas peculiaridades da tecnologia revelam a importância do planejamento de uma rede de monitoramento ótima que garanta a melhor geometria na coleta de dados. Juntamente com a repetibilidade nas condições do levantamento. Viabilizando também, um maior controle sobre os dados com um referencial preciso e estável (GONZÁLEZ-AGUILERA., 2008).

As coordenadas dos pontos ocupados poderiam, nessas condições, ser controladas com a combinação de outras técnicas geodésicas, como poligonação, utilizando estações totais. Permitindo a associação e controle destes pontos com relação a outras redes estáveis fora da zona de deformação (ALBA et al., 2006).

2 Laser Scanner Terrestre

O Laser Scanner Terrestre é um instrumento que permite mapear pequenos e grandes objetos e/ou superfície com uma densa nuvem de pontos tridimensionais (BORGES et al., 2018). Composto por um pacote combinado de *hardware* e *software*. O componente de *hardware* consiste em um sistema de medição de distância a laser, um dispositivo de medição angular e um scanner mecânico para medir a refletância de luz ou a intensidade refletida dos alvos (OGUNDARE, 2015). Borges et al. (2018), afirmam ser estes os principais componentes do LST, que permitem a aquisição das coordenadas tridimensionais dos pontos e seus respectivos níveis de intensidade de retorno do sinal.

O *hardware* é acoplado a um espelho ou prisma rotativo para facilitar a deflexão do feixe laser nas direções horizontal e vertical, enquanto os codificadores angulares registram sua orientação (OGUNDARE, 2015; BORGES et al., 2018).

Devido à sua rápida aquisição de dados, potencializada com adição do prisma rotativo, e a uma ampla cobertura espacial, estes equipamentos têm sido utilizados em diferentes aplicações, por exemplo, na geração de modelos digitais de terreno (SILVA et al., 2016), no monitoramento estruturas (MUKUPA et al., 2016) e no controle da escavação de tuneis (CINTRA e GONÇALVES, 2017).

Após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, associadas a valores de intensidade do retorno do sinal, dados RGB (obtidos por meio de fotografias adquiridas por câmeras fotográficas integradas), e os valores das normais (vetores normalizados) das coordenadas (FERRAZ, DE SOUZA e REIS, 2016).

As coordenadas (X, Y, Z) dos pontos sobre o objeto estão referenciadas ao centro de fase do equipamento, cuja definição é dada pela interseção do eixo principal e do seu eixo secundário (FERRAZ, DE SOUZA e REISS, 2016).

Estas coordenadas são função da relação entre a distância inclinada (di), a direção horizontal (Hz) e o ângulo vertical (v), conforme as Equações (1) a (3) (FERRAZ, 2016):

$$X_p = di \cdot \sin Hz \cdot \cos v \quad (1)$$

$$Y_p = di \cdot \cos Hz \cdot \cos v \quad (2)$$

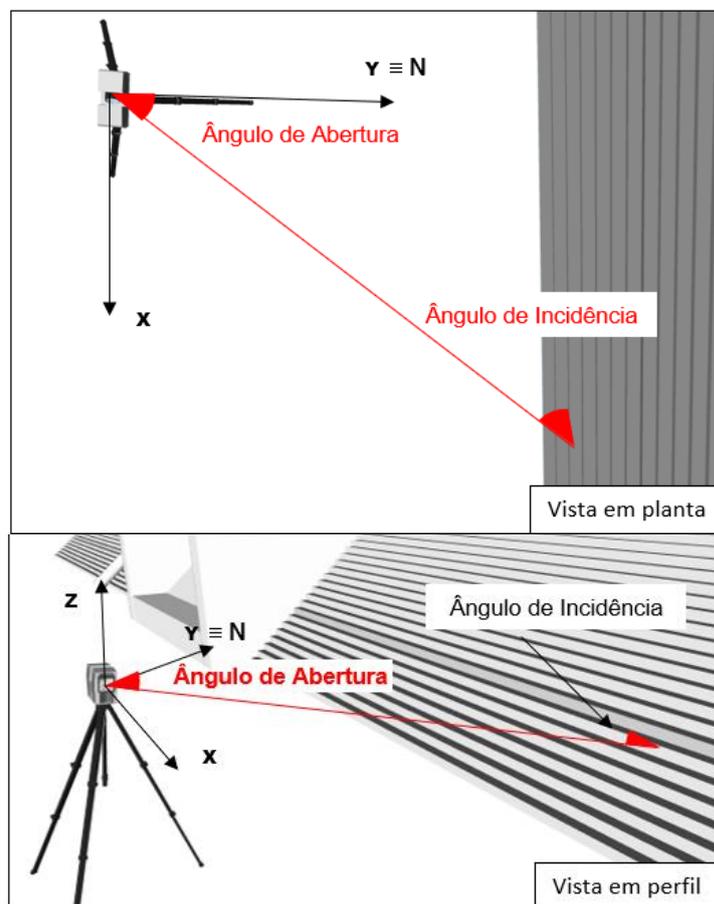
$$Z_p = di \cdot \sin v \quad (3)$$

Essas coordenadas são geralmente tratadas como observáveis, uma vez que na grande maioria dos pacotes de software elas são armazenadas pelo equipamento e não as medidas de distâncias, direções e ângulos

(OGUNDARE, 2015). Logo as análises de qualidade das medições angulares e lineares são derivadas das coordenadas cartesianas de maneira indireta.

A variação angular decorrente da varredura através da rotação dos espelhos gera diferentes ângulos de incidência do feixe laser ao longo do objeto medido. Esta variação tem relação direta com a resolução da nuvem de pontos. Sendo o ângulo de incidência do feixe laser, o ângulo formado entre o feixe e o objeto escaneado, quanto menor ele for maior o espaçamento entre os pontos e, portanto, menor a resolução espacial (Figura 1).

Figura 1 - Ângulos relacionados a incidência do feixe laser no objeto



Fonte: Elaborada pelos autores.

A acurácia angular depende dos erros de posicionamento do dispositivo de rotação e da acurácia do dispositivo de medição angular (COSARCA, JOCEA e SAVU, 2009).

Outro fator que produz uma incerteza inerente na localização angular do ponto é o espalhamento do laser, que aumenta à medida que o ângulo de incidência do feixe se torna menor (LICHTI e GORDON, 2004).

Lenartovicz et al. (2014), Lichti e Gordon (2004), apontam o fato de que ao se afastar do centro da nuvem há um aumento considerável da distância entre os pontos coletas e do diâmetro do feixe laser. Destacam a importância da escolha da posição do equipamento em relação ao objeto medido, priorizando, sempre que possível, o recobrimento nas regiões centrais da nuvem.

Como nem sempre é possível obter a cobertura total da área ou objeto de interesse a partir de um único ponto, os dados muitas vezes são coletados com mais de uma instalação do equipamento. Cada ponto de coleta de dados gera uma cena do levantamento.

Os locais ideais para a tomada de cada cena devem ser escolhidos visando garantir a cobertura do objeto e as precisões adequadas à aplicação.

A distância entre os pontos de tomada das cenas definirá a taxa de sobreposição dos dados. Grandes áreas de sobreposição podem facilitar a etapa de processamento, principalmente quando este é realizado de forma automatizada.

3 Metodologia

3.1 Experimentos para definição dos parâmetros de coleta de dados com LST

Planejar uma rede geodésica consiste em estabelecer sua geometria ótima. A rede que se pretende projetar tem por finalidade definir pontos no entorno da barragem viabilizando o levantamento com LST. Garantindo o recobrimento necessário em duas ou mais campanhas e definindo uma

geometria que conduza a melhor qualidade de dados aplicados ao monitoramento da estrutura.

A princípio pode-se pensar que a melhor alternativa para a definição desses pontos, seria o mais próximo possível do objeto e em campo utilizar a maior resolução disponível no equipamento. No entanto, quanto mais próximo da barragem menor o campo de recobrimento e, portanto, mais ocupações seriam necessárias, além de aumentar as oclusões devido aos degraus existentes na barragem em questão.

Utilizar a maior resolução disponível no equipamento demandaria um aumento considerável no tempo de levantamento e principalmente no volume de dados, conseqüentemente na etapa de processamento, o que acarreta também em aumento de custos.

Com isto, primeira etapa desta pesquisa consistiu em analisar diferentes configurações do equipamento disponível. Tendo como variável a distância entre o LST e o objeto medido. Testes controlados foram realizados para a definição de parâmetro baseados nessas configurações, que posteriormente foram aplicados à região de estudo.

O equipamento disponibilizado para realização do projeto é o Laser Scanner modelo Faro Focus 3D 120 da empresa FARO Technologies (Figura 2), com precisões lineares e angulares de ± 4 mm e $\pm 0.009^\circ$ respectivamente. Campo de visão vertical de 300° e horizontal 360° . Velocidade de varredura de 97hz e o alcance de 0,6 a 120 metros.

Figura 2 - Laser Scanner Faro Focus 3D 120



Fonte: FARO Technologies Inc. (2013).

De acordo com Mukupa et al. (2016), os equipamentos utilizados nas técnicas tradicionais de monitoramento (estações totais, por exemplo) têm precisões angulares e lineares superiores a grande maioria dos LSTs. No entanto, a precisão teórica de uma superfície derivada de dados das nuvens de pontos, especialmente densas, é substancialmente mais alta que a precisão de um único ponto, o que torna o Faro Focus 3D 120 adequado a este estudo.

Os testes foram realizados no Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Florianópolis. O local escolhido no campus foi o Ginásio de Esportes 2, com 26,427 metros de comprimento e 9,500 metros de altura.

Foram realizadas várias cenas, com diferentes distâncias entre o instrumento e o objeto. Variando também os parâmetros de levantamento como a resolução espacial, a qualidade e a faixa de varredura, que são os parâmetros utilizados pelo equipamento para armazenamento dos dados.

Dois cenas de mesma configuração foram tomadas a partir de cada posição de varredura, e testadas nove diferentes situações. A primeira varredura de cada situação foi considerada como a primeira época, realizada com o objeto original, sem nenhuma interferência.

Para a segunda cena foi introduzida uma placa de madeira medindo 2 por 1,5 metros e 5 centímetros de espessura. Simulando uma modificação no ambiente. Esta placa foi fixada na parede na região central da estrutura, onde o ângulo de incidência do feixe laser é 90°, dada a posição do equipamento em relação ao objeto.

Os testes buscaram identificar quais parâmetros foram mais adequados para que fosse detectada a variação introduzida na cena, na comparação entre as duas épocas.

Com o LST instalado a uma distância de 30 metros do objeto na região central do ginásio foram levantados os dados dos cenários 1, 2 e 3. Esta distância foi escolhida por ser aplicável a barragem considerando a topografia da região.

Em um segundo momento o equipamento foi movido a uma distância de aproximadamente 20 metros do objeto, de onde foram tomadas cenas correspondentes aos cenários 4, 5 e 6.

Posteriormente, os cenários 7, 8 e 9 mantiveram a mesma distância do objeto, porém, foram introduzidas outras duas placas ao teste. Os parâmetros de configuração do equipamento utilizado em cada cenário encontram-se no quadro 1.

Quadro 1 – Características dos cenários iniciais.

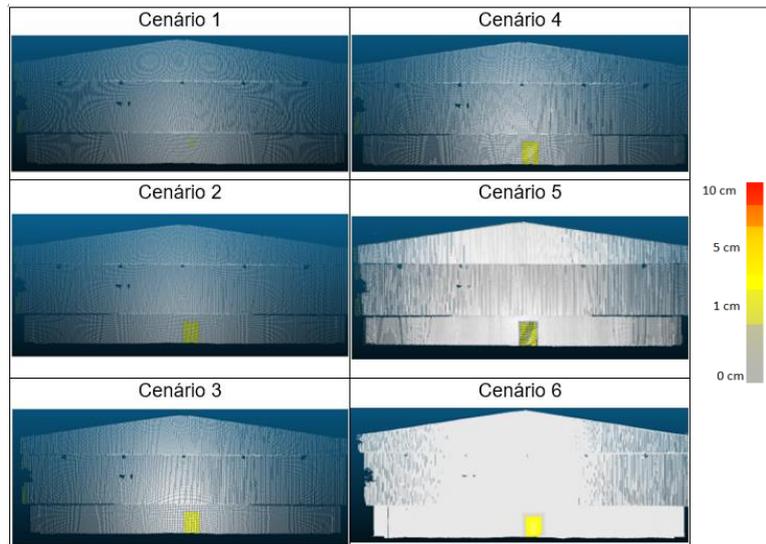
Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
-Distância: 30 metros -Resolução: 30,680 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 2 -Tempo por varredura: 4 min. - Uma única cena por época.	-Distância: 30 metros -Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 4 -Tempo por varredura: 6 min. - Uma única cena por época.	-Distância: 30 metros -Resolução: 3,068 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 6 -Tempo por varredura: 1h 57 min. - Uma única cena por época.
Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
-Distância: 20 metros -Resolução: 30,680 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 2 -Tempo por varredura: 4 min. - Uma única cena por época.	-Distância: 20 metros -Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 4 -Tempo por varredura: 6 min. - Uma única cena por época.	-Distância: 20 metros -Resolução: 3,068 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 6 -Tempo por varredura: 1h 57 min. - Uma única cena por época.
Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9
-Distância: 20 metros -Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 4 -Tempo por varredura: 6 min. - Uma única cena por época.	-Distância: 20 metros -Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 4 -Tempo por varredura: 6 min. - Duas cenas tomadas à 40 metros de distância.	-Distância: 20 metros -Resolução: 12,272 mm de distância pontual (em 10 m) -Qualidade: 4 -Tempo por varredura: 6 min. - Duas cenas tomadas à 20 metros de distância.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma vez realizado o levantamento em campo, o *software* utilizado no processamento foi o *CloudCompare*, com o qual foram comparadas, nuvem a nuvem (*cloud to cloud*), as consideradas primeiras e segundas épocas em cada cenário proposto (Figura 3). A identificação de *outliers* (entendido aqui como

ruídos da nuvem de pontos) foi realizada visualmente e extraído o objeto de interesse da nuvem também no *CloudCompare*.

Figura 3 – Comparação de dados nuvem a nuvem nos cenários 1 a 6.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por se tratar de um ambiente controlado, esperava-se a detecção total da placa de madeira. As distâncias representando as diferenças entre a primeira e segunda nuvem de pontos deveria corresponder à espessura placa (5 cm). Estes dados são provenientes do relatório de processamento e comparação de nuvens gerado pelo próprio *CloudCompare*, que utiliza como padrão o cálculo de distancias entre pontos pelo algoritmo do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*) para identificar mudanças entre as nuvens comparadas.

Nos cenários propostos pode ser observado que a 30 metros do objeto é necessário utilizar a mais alta resolução disponível no equipamento (Cenário 3), para que a placa de madeira fosse detectada com espessura de 4,5 cm. O que acarreta em um aumento considerável no tempo de execução. Para o cenário 2 a placa foi identificada com apenas 1,0 cm de espessura e no cenário 1, não foi detectada.

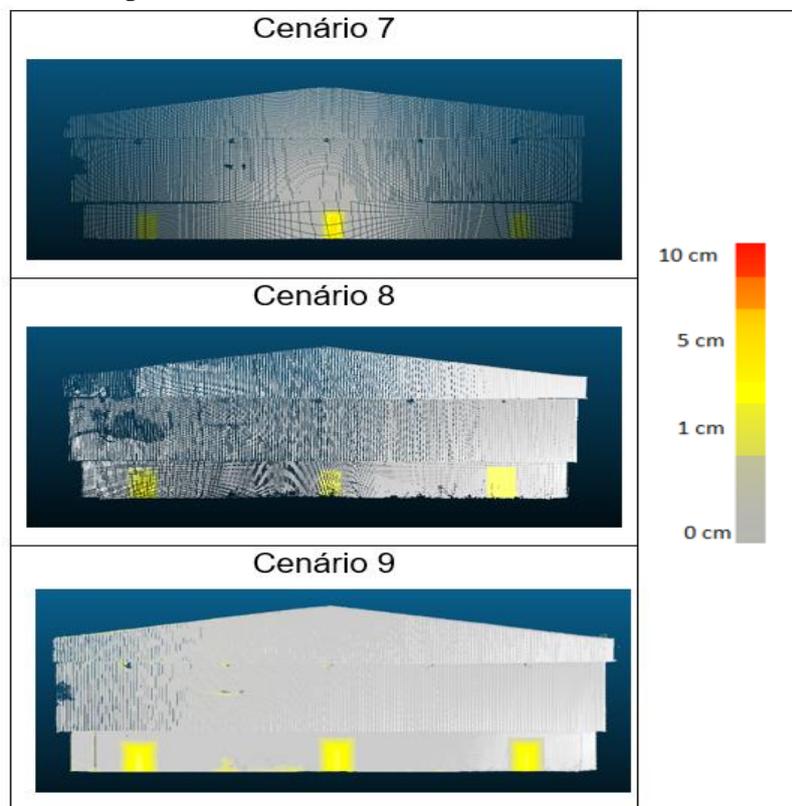
A uma distância de 20 m (cenário 4) obteve-se o valor de 3,5 cm, no cenário 5, de 4,0 cm e no cenário 6 de 5,6 cm para a espessura da placa.

Um novo teste foi realizado para avaliar o efeito do ângulo de incidência do feixe laser na detecção do objeto introduzido na cena.

Para isso, outros três cenários foram propostos, onde três placas de madeira com a mesma dimensão da anteriormente utilizada foram fixadas no objeto para o escaneamento da segunda época. Distribuídas no centro e nas duas extremidades do objeto, possibilitando analisar a detecção de mudanças em diferentes regiões da nuvem de pontos, bem como com diferentes ângulos de incidência do feixe laser.

No cenário 7 o LST permaneceu instalado a uma distância de 20 metros do objeto em uma região central que permitia o total recobrimento com uma única cena. Nos cenários 8 e 9 foram realizadas 2 cenas, com a distância entre os pontos de tomada dos dados de 40 e 20 metros respectivamente, dos quais os resultados podem ser encontrados na figura 4.

Figura 4 - Processamento dos cenários de 7 a 9.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao comparar as nuvens de ponto, pôde-se observar que apenas a placa central foi detectada por completo no cenário 7, com espessura de 4,7 cm. As demais apresentaram espessura de 2,34 cm e 3,02 cm.

No cenário 8, as placas fixadas nas extremidades foram bem capturadas apresentando espessuras de 5,43 cm e 5,56 cm. A placa central, não foi reconhecida com a mesma qualidade chegando a 3,5 cm.

Nos locais em que o ângulo de incidência entre o objeto e feixe laser é menor (nas extremidades da cena), onde foram observados valores menores que 33°, a qualidade da detecção das placas foi diretamente proporcional ao ângulo. Quanto menor o ângulo de incidência pior o desempenho na comparação.

No cenário 9, todas as placas foram identificadas igualmente com espessuras de 5,68 cm, 5,52 cm e 5,62 cm.

A partir dos cenários avaliados, nota-se que as características de coleta de dados com o Faro Focus 3D 120, que apresentaram maior eficácia no que diz respeito aos resultados das comparações e, portanto, melhor atendem aos objetivos do projeto, foram: distância média 20 metros tanto entre o objeto e o ponto de instalação do LST como entre a tomada das cenas, resolução mínima de 12,272 mm de distância pontual (em 10m) e qualidade 4.

3.2 Projeto da rede de monitoramento geodésico para a barragem em estudo

A Usina Hidrelétrica de Mauá está situada entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, nos Campos Gerais do estado do Paraná, mais especificamente, no Salto Mauá, considerado a porção média do rio Tibagi. A UHE Mauá é composta de uma barragem de CCR (Concreto Compactado a Rolo) de aproximadamente 85 m de altura máxima, 745 m de comprimento de crista. Com reservatório que atinge no nível máximo normal, uma área de 83,9 km². Geram cerca de 360 MW de potência instalada e mais 11 MW gerados pela usina complementar (PARANÁ, 2013).

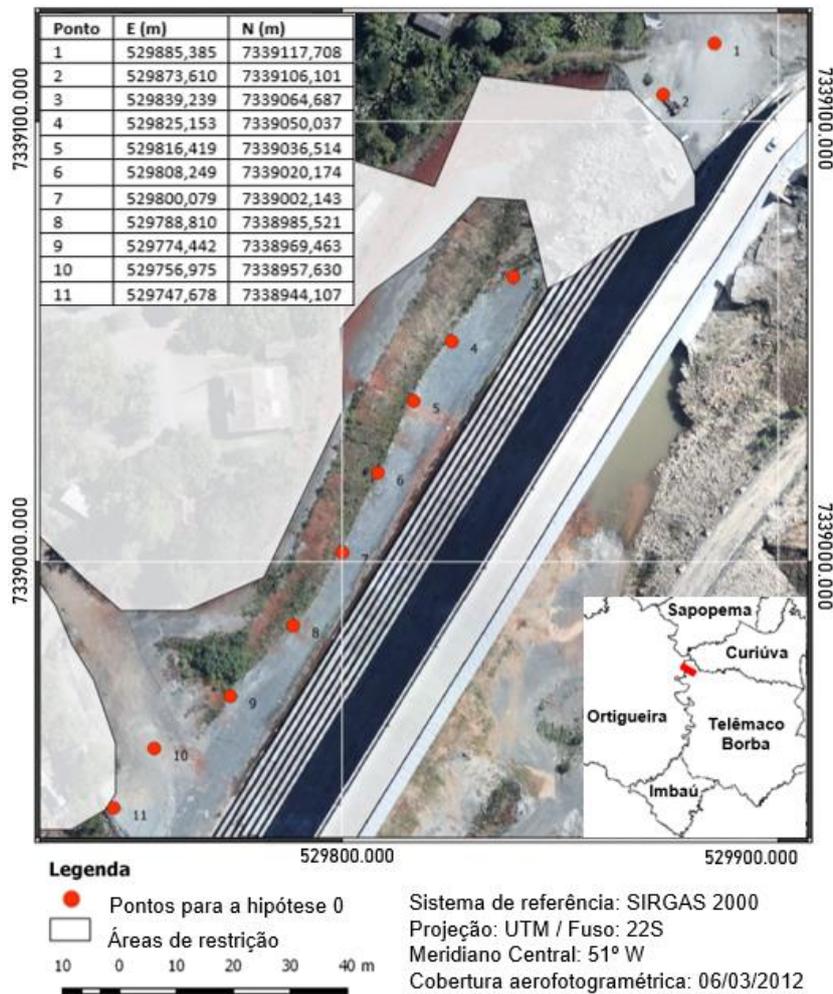
Foi definido que o planejamento da rede contemplasse unicamente a região que compreende ao lado direito das comportas da barragem a jusante, podendo futuramente ser expandido para todo o barramento. Nesta região existem alguns obstáculos que impedem e/ou dificultam a instalação do equipamento de medida.

A primeira etapa do projeto da rede foi identificar sobre uma ortoimagem os locais onde não seria possível a implantação de pontos. As ortomagens na escala 1:1000, foram geradas pela empresa Fiducial Engenharia e Aerolevanteamento em 2012 em convênio com a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

A partir deste ponto, levando em consideração os parâmetros determinados nos testes apresentados no item 3.1, foram projetadas 3 diferentes configurações de rede de pontos de apoio.

Na primeira configuração (hipótese 0), as distâncias entre os pontos foram de aproximadamente 20 metros (Figura 5), desconsiderando os pontos 2 e 3, que devido a área de restrição distam 50 metros um do outro. Entre a barragem e os pontos a distância máxima também é 20 metros.

Figura 5 – Localização dos pontos da rede na Hipótese 0

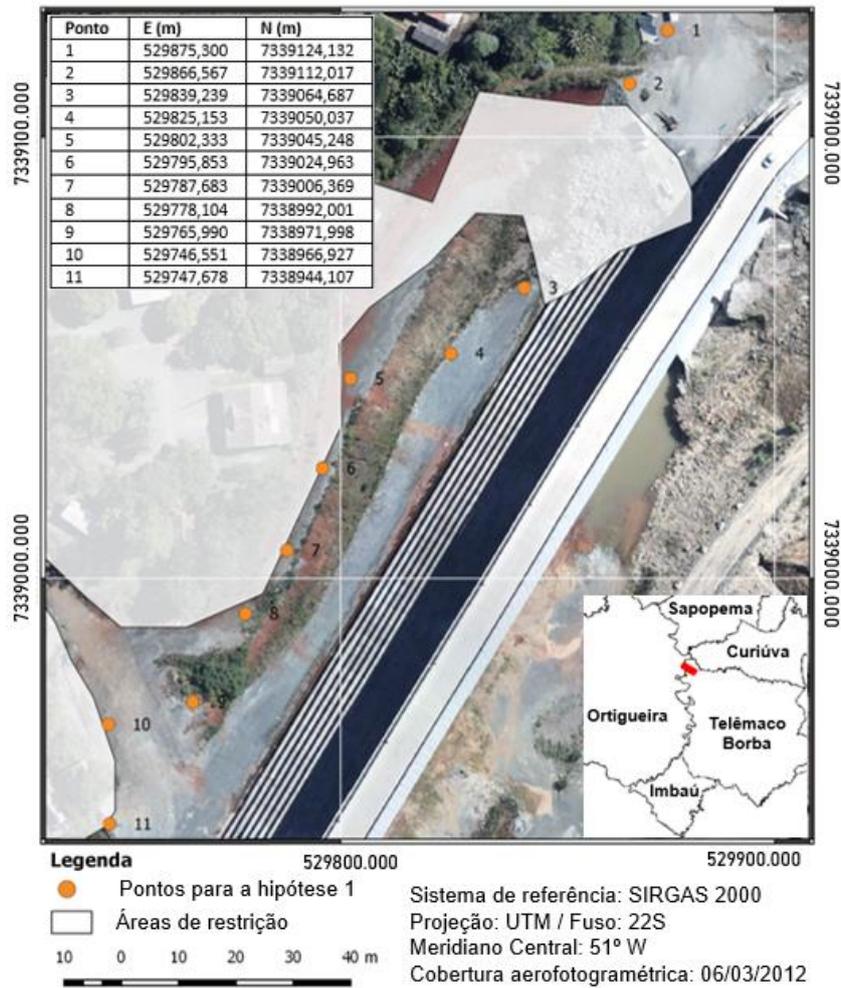


Fonte: Elaborada pelos autores.

Na hipótese 1 procurou-se avaliar as possibilidades de implantação de pontos o mais distante do objeto possível. Aumentando o campo de visão e reduzindo possíveis oclusões (Figura 6). Neste caso, a média de distância entre os pontos e a barragem é de 30 metros, tendo sido modificadas as posições dos pontos 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10 em relação à hipótese 0.

A comparação entre dados entre duas ou mais campanhas com esta configuração, demanda um aumento na resolução da varredura para 3,068 mm de distância pontual (em 10m) e conseqüentemente o tempo de execução passa a ser de aproximadamente 40 min. por cena.

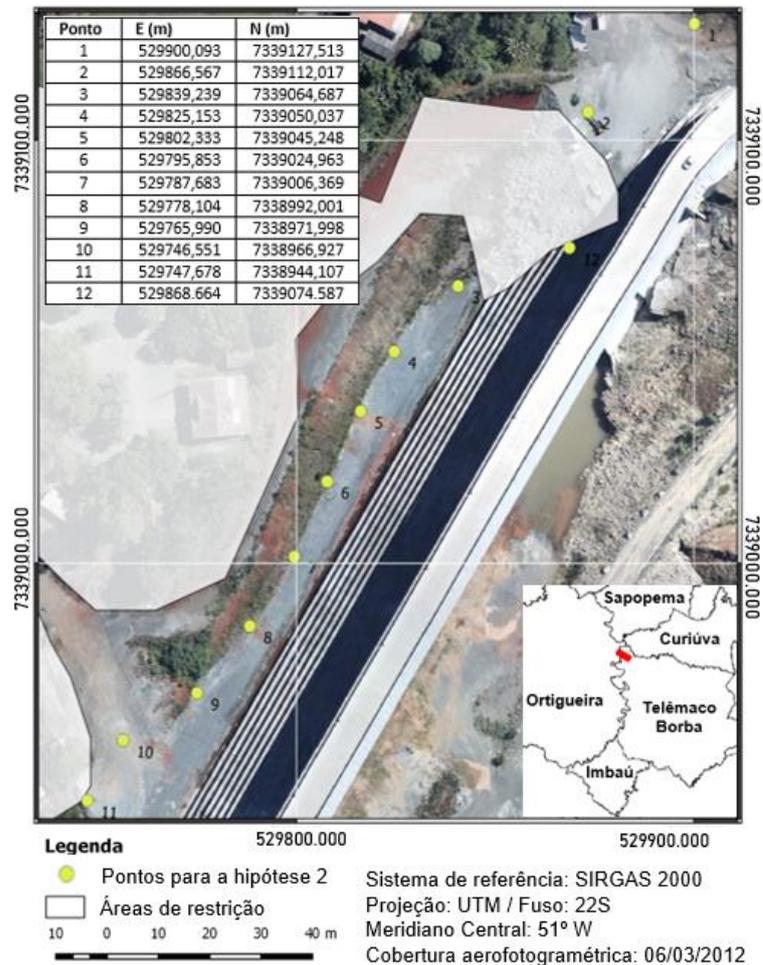
Figura 6 – Localização dos pontos da rede na Hipótese 1



Fonte: Elaborada pelos autores.

A hipótese 2 tenta suprir as possíveis dificuldades das duas propostas anteriores. Para tal, tomou-se como base os pontos da hipótese 0, por ter o tempo de execução é consideravelmente menor. Modificando apenas o ponto 1, que foi deslocado para a direita, se afastando da área de maior trânsito de veículos. Além disso, foi adicionado um ponto, chamado 12, sobre os degraus da barragem na região de maior distanciamento os pontos (Figura 7).

Figura 7 – Localização dos pontos da rede na Hipótese 2



Fonte: Elaborada pelos autores.

3.2.1 Simulação dos dados para pré-análise

A posição do instrumento de medida e sua precisão nominal, juntamente com o modelo matemático empregado no método de levantamento, vão permitir estimar a precisão dos pontos medidos na estrutura. Para realizar a propagação de erros e estimar esses valores de precisão é necessário, conhecer as observações a serem medidas em cada uma das estações de monitoramento.

Estes valores foram gerados em um modelo tridimensional da UHE, desenvolvido neste estudo, exclusivamente para este fim. A modelagem foi

exequível por haverem dados de campo disponíveis referentes a esta área, levantados em campanhas anteriores com técnicas de poligonação e irradiação com estação total.

Sobre o modelo 3D criou-se para cada ponto da rede uma amostra de pontos objeto na face da barragem, dos quais foram simulados os valores das observações das direções horizontais, distância inclinada e ângulo vertical.

Os desvios padrões de cada ponto simulado foram calculados através das equações de pré-análise com o modelo matemático onde a distância, o ângulo vertical e o ângulo horizontal compõem as coordenadas polares (di, v, Hz) que são transformadas em coordenadas cartesianas (X, Y, Z).

Às equações de propagação de variância e covariância tiveram como resultado um conjunto de precisões para as coordenadas dos pontos amostrados (equação 5). À essas precisões foram somadas a largura de feixe laser correspondente em cada ponto, como um parâmetro complementar que afeta a análise da qualidade dos dados, por ser uma incerteza inerente na localização angular (equação 6).

Na equação (4), w é o raio do feixe, w_0 é o raio mínimo do feixe e ρ_w é o intervalo em relação ao local de saída do feixe e o objeto (LICHTI e GORDON, 2004).

$$w(\rho_w) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \rho_w}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (4)$$

$$\sum y = D \cdot \sum X D^T \quad (5)$$

$$(\sum Y_{i=j})^{1/2} + w(\rho_{w=i}) = \text{Incerteza nos pontos objeto} \quad (6)$$

Onde D é a matriz jacobiana formada pelas derivadas parciais do modelo matemático e $\sum y$ e $\sum X$ são as matrizes variância-covariância.

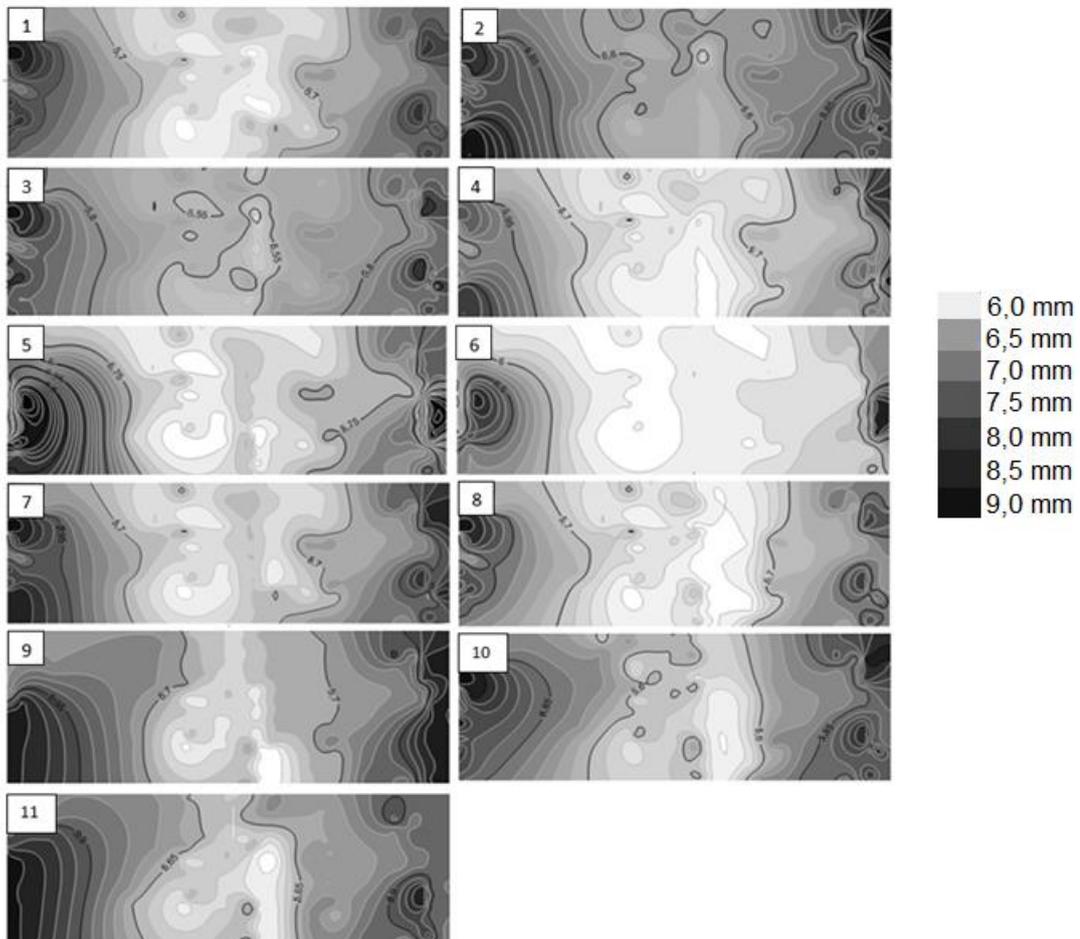
4 Resultados

Com as incertezas posicionais dos pontos objeto para cada uma das cenas planejadas, foram geradas isolinhas, interpoladas com a triangulação de Delaunay, a partir da componente resultante de cada um deles.

Amostras de pontos foram simuladas considerando um ângulo de incidência mínimo entre o raio laser e objeto de 20 graus, incrementados em 15 graus horizontal e verticalmente. Gerando cerca de 400 observações em cada um dos pontos das três hipóteses. Em todas as cenas avaliadas as incertezas foram, crescentes do centro da cena para as extremidades (Figuras 8, 9 e 10).

Analisando a hipótese 0, o desvio padrão médio foi de 6 mm. Na região central da nuvem de pontos, tanto as distâncias quanto o diâmetro do raio laser são menores e apresentaram em todos os 11 pontos da rede valores de incertezas entre 5 e 6 mm, aumentando gradativamente para 7 e 8 mm as extremidades. Caso sejam extrapolados os limites de incidência do raio estes valores tornam-se ainda maiores.

Figura 8 - Isolinhas das incertezas esperadas nos pontos objeto da hipótese 0



Fonte: Elaborada pelos autores.

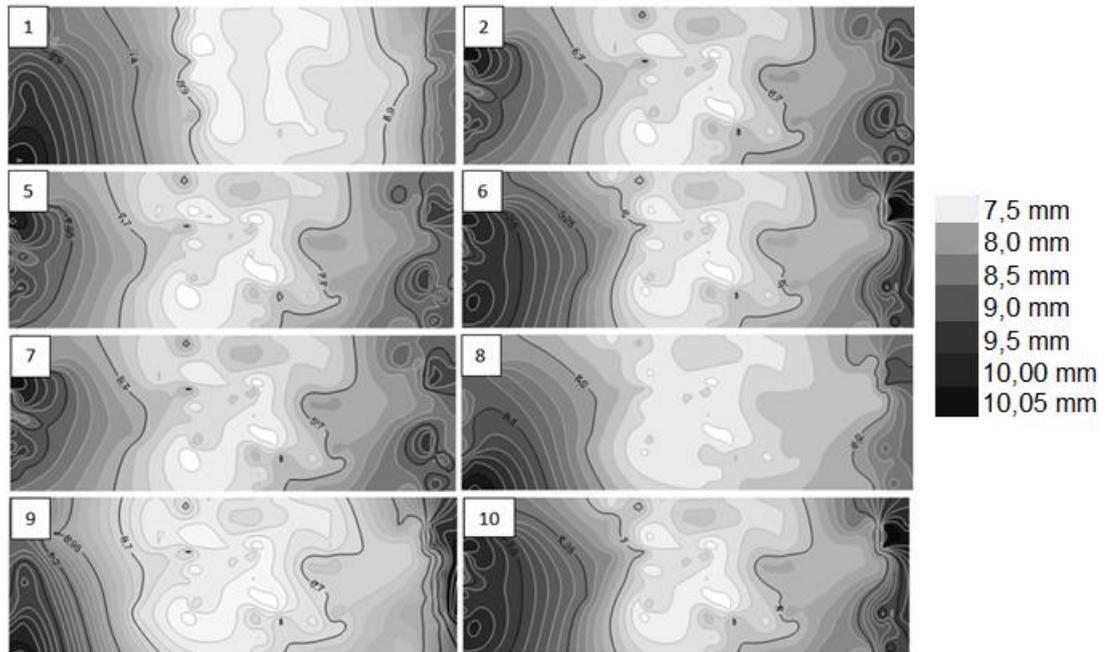
Os pontos 2 e 3, por estarem mais distantes entre si, mostram regiões de sobreposição em que as incertezas em ambas as cenas são superiores a 7 mm.

Para a hipótese 1 foram modificadas as posições dos pontos 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, e 10, e, portanto, recalculados os dados brutos simulados no modelo seguindo os mesmos padrões da hipótese 0. Bem como as propagações de erros e as isolinhas para as novas incertezas estimadas (Figura 9).

Verifica-se que essas mudanças realizadas resultaram em incertezas médias em torno de 7 mm. Tendo sido maiores nos pontos 5 e 10 por estarem mais distantes e contemplarem ângulos de incidência menores entre o feixe e a barragem, que os demais pontos propostos nesta hipótese. Neste caso os

valores de incerteza se mostram superiores nos pontos modificados, chegando a 9 mm, em regiões abrangidas pelos a serem coletados nos pontos 5, 6, 9, e 10.

Figura 9 - Isolinhas das incertezas esperadas nos pontos objeto da hipótese 1

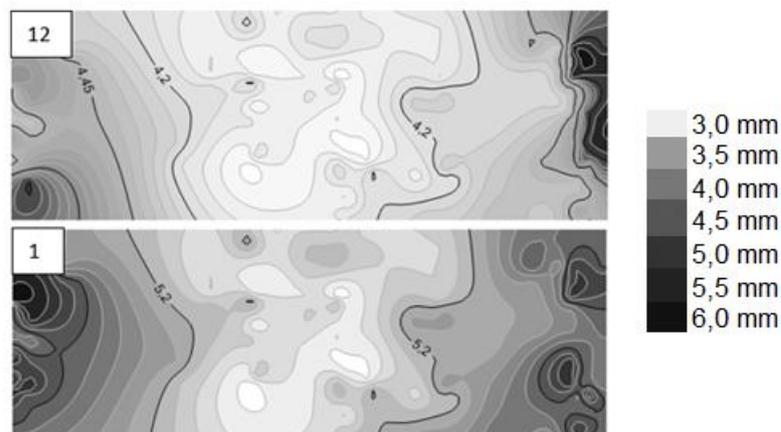


Fonte: Elaborada pelos autores

Como já visto, a hipótese 2 foi realizada para suprimir os eventuais problemas encontrados nas duas configurações anteriores. Utilizando os pontos e configurações do equipamento da hipótese 0, modificando o ponto 1 e acrescentando um ponto, chamado 12. Logo, foram gerados novos dados e interpolações de isolinhas apenas para essas modificações (Figura 10).

O ponto 1 foi apenas deslocado para a direita do objeto ficando mais distante do ponto 2 e tornando mais segura sua ocupação devido a característica da região. Manteve, portanto, o comportamento das incertezas similar ao visto na hipótese 1. No ponto 12, esses valores variam entre 4 e 6 mm.

Figura 10 - Isolinhas das incertezas esperadas nos pontos objeto na hipótese 2



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a hipótese 0 o tempo médio de coleta de dados em cada cena gira em torno de 15 minutos. O tempo total do levantamento será de no mínimo 2h e 45 minutos, sem considerar o deslocamento do operador entre cada ponto e os processos intermediários como instalação do instrumento. Já na hipótese 1, os pontos estão mais distantes da barragem necessitando o aumento da densidade de pontos e da qualidade do levantamento, acarretando um aumento no tempo mínimo para 10 horas.

Levando em conta a adição do ponto 12, para o levantamento completo da hipótese 2 o tempo estimado será de aproximadamente 3 horas e 15 minutos. Consideravelmente menor quando comparado a hipótese 1.

É importante salientar que as estimativas de tempo foram baseadas nos levantamentos sem utilizar a cor real. Em situações que exijam imagens utilizadas para pigmentação real na nuvem de pontos, o tempo estimado será ainda maior.

As incertezas médias dos dados da pré-análise em cada ponto proposto são maiores para hipótese 1. Nos pontos 2, 4 e 11 as médias se mantiveram nas três propostas. Entre as hipóteses 0 e 2 os resultados são semelhantes.

Por conseguinte, a hipótese 2 mostra-se mais eficiente. A hipótese 1 tornou-se inviável, tanto do ponto de vista das incertezas (se comparada as

demais) como pelo tempo de execução que é substancialmente maior. Além do aumento excessivo no número de dados e conseqüentemente no tamanho do arquivo.

5 Considerações

Experimentos realizados no IFSC permitiram a definição de alguns critérios que puderam ser posteriormente adotados na concepção da rede de monitoramento para a UHE de Mauá. Corroborando, a hipótese de que o planejamento da posição do LST no levantamento dos objetos monitorados podem trazer significativas melhoras na exequibilidade dos projetos.

Os testes levaram ao entendimento de que para este estudo de caso, a distância ideal entre os pontos de estação com o LST é de 20 metros, entre e si e também em relação ao objeto. Nestas condições a configuração que mostrou melhor desempenho na comparação de dados levantados com o Faro Focus 3D foi a resolução mínima de 12,272 mm de distância pontual (em 10m) e qualidade 4.

Na segunda etapa do projeto com o auxílio das ortofotos da UHE de Mauá. Foram identificadas as áreas que poderiam ser ocupadas por esses pontos, considerando a topografia do entorno da barragem e então propostas três diferentes de geometrias para rede buscando, sempre que possível, atender os critérios definidos nos testes anteriores.

Na hipótese 0, foram escolhidos 11 pontos para compor a rede, com distância média de 20 metros, que resulta em um tempo de execução por cena de cerca de 15 min. com as configurações exigidas. No primeiro cenário alternativo (hipótese 2) procurou-se avaliar as possibilidades de implantação de pontos o mais distante do objeto aumentando o campo de visão, no entanto, as configurações necessárias para se alcançar os resultados esperados geraram a necessidade de um aumento na qualidade e na resolução do levantamento, conseqüentemente o tempo de execução por cena passa a ser

três vezes maior. Por fim, a hipótese 2, foi baseada na adição de um ponto na hipótese 0, a fim de suprir as deficiências das duas primeiras propostas.

A caracterização da influência dos efeitos de espalhamento do feixe laser bem como as técnicas de pré-análise permitiram modelar uma superfície isolinhas que demonstraram o comportamento das incertezas dos pontos objeto para as três hipóteses. Os valores de incertezas médio das hipóteses 0, 1 e 2, foram de 5 mm, 7,5 mm e 6 mm, respectivamente.

Tais resultados, apontam para a escolha da hipótese 2 como melhor configuração posicional para os pontos na UHE Mauá empregando o Laser Scanner Terrestre Faro Focus 3D 120.

Contribuição dos autores

O presente artigo é consequência direta da dissertação de Mestrado da autora Évelin Moreira Gonçalves. A dissertação teve orientação direta do Professor Luís Augusto Koenig Veiga. Durante a execução do artigo, coube a autora Évelin Moreira Gonçalves fazer o recorte e a formatação nas regras do periódico. Ao Professor Luis Augusto Koenig Veiga coube a função de verificar a fluidez do texto e realizar sua revisão.

Referências

- ALBA, M.; FREGONESE, L.; PRANDI, F.; SCAIONI, M.; VALGOI, P. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. 36, Issue 5, 2006. pp. 1-6.
- BENITO-CALVO, A.; GUTIÉRREZ, F.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, A.; CARBONEL, D.; KARAMPAGLIDIS, T.; DESIR, G.; SEVIL, J.; GUERRERO, J.; FABREGAT, I.; GARCÍA-ARNAY, Á. 4D Monitoring of Active Sinkholes with a Terrestrial Laser Scanner (TLS): A Case Study in the Evaporite Karst of the Ebro Valley, NE Spain. *Remote Sensing*. Vol. 10, Issue 4, 2018. pp. 571.

- BORGES, A.; JUNIOR, E. S. F.; CINTRA J. P.; JUNIOR J. B.; Avaliação da precisão posicional de um Sistema Laser Scanner Terrestre AM-CW a partir de uma placa de esferas 3D. *Revista Brasileira de Cartografia*. Vol. 70, No. 3., 2018. p. 906-931.
- CINTRA, J. P.; GONÇALVES, R.; Tunnel surveying with scanner: a case study terrestrial laser. *BCG - Boletim de Ciências Geodésicas - On-Line version*, sec. Artigos, Curitiba, Vol. 23, No 1, 2017. p.115 – 133.
- COSARCA, C.; JOCEA, A.; SAVU, A. Analysis of errors sources in terrestrial laser scanner. *Journal of Geodesy and Cadastre*, 2009. p. 115-124.
- FARO TECHNOLOGIES Inc.<https://faro.blob.core.windows.net/sitefinity/3d-app-center-downloads/e1531_faro_scan_localizer_user_manual_en.pdf>, acessado em agosto de 2018.
- FAGGION, P. L.; SOARES, M. A.; NADAL. C. A.; VEIGA, L. A. K. **Monitoramento Geodésico**. Relatório Técnico 01-2012 Projeto Pd6491-0227/2011-. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- FERRAZ, S.; SOUZA, S. F.; REIS, M. L. L. Laser Scanner Terrestre: teoria, aplicações e prática. *Revista Brasileira de Geomática*, vol.4, n.2, 2016. pp. 99-109.
- GONZÁLEZ-AGUILERA D.; GOMEZ-LAHOZ, J.; SANCHEZ, J. A new approach for structural monitoring of large dams with a threedimensional laser scanner. *Sensors*, Vol. 8, Issue 9, 2008. pp. 5866–5883.
- KLEIN, I. **Proposta de um novo método para o planejamento de redes geodésicas**. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. 148 p.
- KUANG, E. P. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and application**, Michigan: Ann Arbour Press Inc. USA, 1996. pp. 347-360.
- LENARTOVICZ I. R., VEIGA L. A. K., FAGGION P. L., NADAL C. A. , SOARES M. A. Potential evaluation of the Terrestrial Laser Scanner in structural monitoring: case study Maua HPP. *Revista Brasileira de Cartografia*. Vol. 66, No. 7, 2014. pp. 1505-1515.
- LICHTI, D. D.; GORDON, S. J. Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. In: Fig Working Week, *Atenas*. 2004. pp. 22– 27.

- LUO, L.; MA, W.; ZHANG, Z.; ZHUANG, Y.; ZHANG, Y.; YANG, J.; CAO, X.; LIANG, S.; MU, Y. Freeze/Thaw-Induced Deformation Monitoring and Assessment of the Slope in Permafrost Based on Terrestrial Laser Scanner and GNSS. **Remote Sensing**, Vol. 9, Issue 3. 2017. pp.198.
- MUKUPA, W.; ROBERTS, G. W.; HANCOCK C. M.; AL-MANASIR, K. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. **Survey Review**. Vol. 49, No. 353, 2016. pp. 99-116 DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.
- OGUNDARE, J. O. **Precision surveying: the principles and geomatics practice**. Wiley, Hoboken. NJ, USA. 2015. 648p.
- PARANÁ. CONSÓRCIO ENERGÉTICO CRUZEIRO DO SUL. **Usina Hidrelétrica Mauá**. Relatório Técnico, Curitiba, 2013. 27p.
- SHEN, Y.; LINDENBERGH, R.; WANG, J. Change Analysis in Structural Laser Scanning Point Clouds: The Baseline Method. **Sensors**, Vol. 17, Issue 12, 2016. 26p.
- SIGUEL, A., FAGGION, P., VEIGA, L., NADAL, C., MATTOS, M., SOARES, M. Aplicação do método de irradiação tridimensional no monitoramento de barragens. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Vol. 19, No. 3, 2013. pp.391-406.
- SILVA, R.M., VERONEZ, M.R., SILVEIRA, L.G., TOGNOLI, F.M., SOUZA, M.K., INOCENCIO, L.C. 3-D Reconstruction Of Digital Outcrop Model Based On Multiple View Images And Terrestrial Laser Scanning. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 6, 2016. pp. 1203-1210.
- SILVA, R. N. F.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K. Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, leap-frog, no monitoramento de recalques em barragem de concreto de médio porte. **Revista Brasileira de Cartografia**, Vol. 66, No. 1, 11, 2013. pp. 45-57.
- TORGE, W. **Geodaesie**, 2. Aufage, de Gruyter Lehrbuch. Berlin, 2003. 416 p.
- VAN GENECHTEN B., QUINTERO M. S., DE BRUYNE M., POELMAN R., HANKAR M., BARNES S., CANER H., BUDEI L., HEINE E., REINER H., GARCIA J. L. L., TARONGER J. M. B. **Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications**. Universidad Politecnica de Valencia Editorial. 2008. p. 3-6.