

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**IGOR RIBEIRO LENARTOVICZ**

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DO LASER SCANNER TERRESTRE NO  
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO UHE MAUÁ**

**CURITIBA  
2013**

IGOR RIBEIRO LENARTOVICZ

AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DO LASER SCANNER TERRESTRE NO  
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO UHE MAUÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Área de concentração em Geodésia, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

Co-orientador: Prof. Dr. Luís A. Koenig Veiga

CURITIBA  
2013

---

L563a      Lenartovicz, Igor Ribeiro  
Avaliação da potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas: estudo de caso UHE Mauá [manuscrito] / Igor Ribeiro Lenartovicz. – Curitiba, 2013.  
123f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2013.

Orientador: Pedro Luis Faggion -- Co-orientador: Luis A. Koenig Veiga

1. Geodésica. 2. Sistema de varredura. 3. Usinas hidroelétricas – uso do laser scanner terrestre. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luis. III. Koenig, Luis A. Veiga. IV. Título.

CDD: 526.9

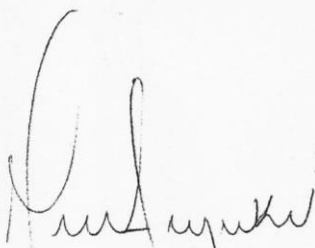
---

## TERMO DE APROVAÇÃO

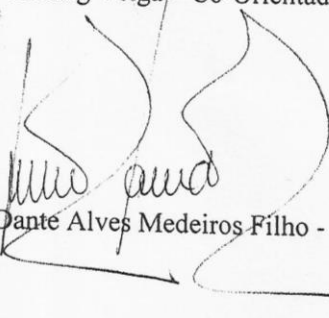
IGOR RIBEIRO LENARTOVICZ

**"AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DO LASER SCANNER TERRESTRE NO  
MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO UHE MAUÁ"**

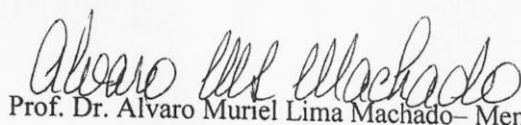
Dissertação nº 266 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga - Co-Orientador e Presidente(UFPR)



Prof. Dr. Dante Alves Medeiros Filho - Membro (UEM)



Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado - Membro (UFPR)

Curitiba, 28 de junho de 2013.

*Dedico este trabalho a minha mãe, Catarina,  
que tanto lutou para que eu pudesse estar aqui.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo o que Ele me proporcionou.

A minha mãe, Catarina, e minha irmã, Mariana, que sempre me apoiam em todos os momentos, mesmo quando eu não mereci.

A meu pai, Ivo, pelo exemplo de vida e ensinamentos que sempre me acompanharão.

A todos meus familiares, pela presença e carinho, e especialmente a meu primo e amigo Tiago D. Martins, pelo seu companheirismo.

Aos amigos que fiz durante o curso de graduação em Engenharia Cartográfica, especialmente Brunno Bonacin, Diogo Fernandes, Ezequiel Corato, Gustavo Gruscoski, Hamilton Vendrame, João Becker e Jonas César por me acompanharem por todo esse caminho e me fazerem ver que valeu a pena.

Aos meus amigos irmãos Leonardo Monteiro e Pablo Wovst, que sempre estão ao meu lado.

A todos os amigos do CPGCG que auxiliaram durante o desenvolvimento desta pesquisa, e especialmente ao amigo Adeliton Oliveira por sua presença e bom humor.

A bibliotecária Vilma Machado e os demais funcionários da Biblioteca de Ciência e Tecnologia da UFPR.

Aos Profs. Drs. Pedro L. Faggion e Luís A. Koenig Veiga, pelas orientações e contribuições para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A Bruno Damas, Bryam dos Santos e Renata Brasil, funcionários da empresa Manfra, pela disposição e auxílio.

A Universidade Federal do Paraná pela oportunidade e a disponibilização de instalações e equipamentos que forem indispensáveis para a conclusão desta pesquisa.

*“Disciplina é liberdade. Compaixão é fortaleza.  
Ter bondade é ter coragem.”*

*Renato Russo*

## RESUMO

Com o objetivo principal de avaliar a potencialidade da utilização de um LST (Laser Scanner Terrestre) no monitoramento de barragens, com estudo de caso na UHE Mauá localizada no rio Tibagi, na divisa entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, foram realizados escaneamentos a jusante da estrutura da barragem em duas diferentes épocas, antes e depois da formação de seu reservatório. As nuvens de pontos do laser foram integradas aos dados de um levantamento com estação total, através do software Cyclone, para referenciar todos os resultados a um mesmo sistema topográfico. Todos os dados foram processados utilizando dois diferentes softwares que permitem a detecção de deslocamentos através da comparação entre os escaneamentos. Cada software apresenta diferentes métodos de comparação. O 3DReshaper necessita da criação de uma malha a partir da nuvem de pontos levantados, enquanto o CloudCompare realiza um modelamento local nos pontos da nuvem. Após a criação de malhas foram efetuadas comparações entre escaneamentos em pontos iguais de épocas distintas, entre o escaneamento em um ponto e a estrutura total da barragem, e entre os escaneamentos de toda a estrutura em ambas as épocas. Os resultados mostram uma grande dependência dos cálculos ao processo de criação de malhas, mas, nas áreas de maior densidade de pontos, foi possível observar uma maior precisão da malha e uma melhor definição dos deslocamentos.

Palavras-chave: Laser scanner terrestre, barragem, monitoramento de estruturas, levantamentos geodésicos.



## **ABSTRACT**

With the purpose of evaluating the potential of using a terrestrial laser scanner in the monitoring of dams, with case study in the Power Plant Maua located in the Tibagi River, on the border between the cities of Ortigueira and Telêmaco Borba, scans were performed in the field in two different times, before and after the formation of its reservoir. The laser point clouds were integrated with data from a survey of robotic total station, through the Cyclone software, to refer all results to the same local topographic system. All data were processed using two different software that allow the detection of displacements by comparing the scans. Each software has different methods of comparison. The 3DReshaper requires the creation of a mesh from the point cloud surveyed, while the CloudCompare performs a local modeling on the cloud points. After the mesh creation some comparison procedures were performed: between the scans of equal points in different periods, between the scans of a point and the dam's overall structure, and between the scans of the overall structure in the different periods. The results show a large dependence of the calculation with the meshing process, but in areas of highest density of points, we observed a higher precision of the mesh and a better definition of displacements.

Key words: terrestrial laser scanner, dam, monitoring structures, geodesic surveys.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DE UM LASER.....	19
FIGURA 2 – PRINCÍPIO TIME-OF-FLIGHT.....	21
FIGURA 3 – ESBOÇO DE UM DISTANCIÔMETRO LASER.....	21
FIGURA 4 – ATIVAÇÃO DO CONTROLADOR DE TEMPO.....	22
FIGURA 5 – MODULAÇÃO DE AMPLITUDE.....	23
FIGURA 6 – DIFERENÇA DE FASE.....	23
FIGURA 7 – SISTEMA LASER POR TRIANGULAÇÃO.....	25
FIGURA 8 – TRIANGULAÇÃO.....	25
FIGURA 9 – RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS.....	26
FIGURA 10 – PERFILAMENTO A LASER.....	27
FIGURA 11 – ESCANEAMENTO A LASER.....	28
FIGURA 12 – FUNCIONAMENTO DO LASER SCANNER TERRESTRE.....	29
FIGURA 13 – ESQUEMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA LASER SCANNER.....	30
FIGURA 14 – COMPOSIÇÃO DE UM LASER SCANNER.....	31
FIGURA 15 – CLASSES DE LASER SCANNER TERRESTRE.....	32
FIGURA 16 – APLICAÇÕES DE UM LST.....	33
FIGURA 17 – EIXOS MECÂNICOS DE UM LST E SEUS ERROS.....	37
FIGURA 18 – BARRAGEM DE CONCRETO.....	39
FIGURA 19 – BARRAGEM DE ATERRO.....	40
FIGURA 20 – ITAIPÚ BINACIONAL.....	41
FIGURA 21 – BARRAGEM SACO.....	42
FIGURA 22 – MÉTODO TRADICIONAL DE APLICAÇÃO DE CCR.....	44
FIGURA 23 – MÉTODO RAMPADO DE APLICAÇÃO DE CCR.....	44
FIGURA 24 – LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.....	45
FIGURA 25 – BARRAGEM UHE MAUÁ.....	46
FIGURA 26 – ESQUEMATIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.....	47
FIGURA 27 - ÁREA DE INFLUÊNCIA DIRETA DA UHE MAUÁ.....	48
FIGURA 28 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI.....	50
FIGURA 29 – SITUAÇÃO GEOLÓGICA NO LOCAL DA UHE MAUÁ.....	51
FIGURA 30 – SCANSTATION C10.....	55
FIGURA 31 – TCRA1205.....	57

FIGURA 32 – JUSANTE DA BARRAGEM DA UHE MAUÁ .....	58
FIGURA 33 – EXEMPLO DE POLIGONAL DE ESCANEAMENTO .....	60
FIGURA 34 – EXEMPLO DE PARES DE PONTOS DE ESCANEAMENTO.....	60
FIGURA 35 – IMAGEM AÉREA COM ÁREAS DE INTERESSE PARA PONTOS DE ESCANEAMENTO DA PRIMEIRA ÉPOCA.....	61
FIGURA 36 – LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DOS PONTOS DO LEVANTAMENTO LST.....	62
FIGURA 37 – NUVENS DE PONTOS DO LST (PONTOS 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).....	63
FIGURA 38 – SISTEMA DE COORDENADAS DO LEVANTAMENTO COM ESTAÇÃO TOTAL.....	64
FIGURA 39 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS EMPREGADOS NO LEVANTAMENTO COM ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA DA PRIMEIRA ÉPOCA....	65
FIGURA 40 - IMAGEM AÉREA COM ÁREAS DE INTERESSE PARA PONTOS DE ESCANEAMENTO DA SEGUNDA ÉPOCA .....	66
FIGURA 41 – LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DO LST DO LEVANTAMENTO DA SEGUNDA ÉPOCA .....	67
FIGURA 42 – LEVANTAMENTO DA BARRAGEM REALIZADO NA SEGUNDA ÉPOCA.....	68
FIGURA 43 – REPRESENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO COM ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA DA SEGUNDA ÉPOCA.....	69
FIGURA 44 – UNIÃO DE NUVENS.....	71
FIGURA 45 – ALGORÍTIMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO .....	72
FIGURA 46 – MODELAGEM LOCAL DE SUPERFÍCIES .....	73
FIGURA 47 – MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS PARA CRIAÇÃO DE MALHAS.....	75
FIGURA 48 – REMODELAMENTO DA MALHA 3D .....	76
FIGURA 49 – COMPARAÇÃO ENTRE MALHAS .....	77
FIGURA 50 – ESQUEMATIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO PULSO LASER.....	78
FIGURA 51 – REGIÕES PARA AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO DO LST .....	79
FIGURA 52 – REGIÃO “A” .....	80
FIGURA 53 – REGIÃO “B” .....	80
FIGURA 54 - REGIÃO "C".....	81

FIGURA 55 – REGIÃO “D” .....	81
FIGURA 56 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO PELO SOFTWARE 3DRESHAPER (PONTO E2).....	85
FIGURA 57 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE (PONTO E2).....	86
FIGURA 58 – COMPARAÇÃO FINAL NO SOFTWARE 3DRESHAPER .....	88
FIGURA 59 – COMPARAÇÃO FINAL PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE.....	89
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO DE UM PONTO E TODA A ESTRUTURA (PONTO A2).....	91
FIGURA 61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS ESCANEAMENTOS DE TODA ESTRUTURA EM AMBAS AS ÉPOCAS .....	92
FIGURA 62 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E1 (NUVEM X MALHA) .....	103
FIGURA 63 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E1 (NUVEM X NUVEM) .....	104
FIGURA 64 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E1 (NUVEM X MALHA) .....	105
FIGURA 65 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E1 (NUVEM X NUVEM).....	106
FIGURA 66 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E2 (NUVEM X MALHA) .....	107
FIGURA 67 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E2 (NUVEM X NUVEM) .....	108
FIGURA 68 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E2 (NUVEM X MALHA) .....	109

FIGURA 69 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E2 (NUVEM X NUVEM).....	110
FIGURA 70 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E3 (NUVEM X MALHA) .....	111
FIGURA 71 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E3 (NUVEM X NUVEM) .....	112
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E3 (NUVEM X MALHA) .....	113
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E3 (NUVEM X NUVEM).....	114
FIGURA 74 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO A2 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA).....	116
FIGURA 75 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO A3 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA).....	117
FIGURA 76 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO A4 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA).....	118
FIGURA 77 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO E1 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA).....	119
FIGURA 78 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO E2 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA).....	120
FIGURA 79 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO E3 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA).....	121

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS UHE MAUÁ .....	47
TABELA 2 – ÁREAS MUNICIPAIS INUNDADAS.....	49
TABELA 3 – PROPRIEDADES AFETADAS .....	49
TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES SCANSTATION C10 .....	56
TABELA 5 – VALORES DA RESOLUÇÃO DO SCANNER.....	82

## GLOSSÁRIO

3D – Que possui três dimensões

CC – Concreto Convencional

CAD – *Computer Aided Design*

CCD – *Charge-Coupled Device*

CCR – Concreto Compactado com Rolo

CMOS – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

CNEC – Empresa CNEC WorleyParsons Engenharia S.A.

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

INS – *Inertial Navigation System*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LST – Laser Scanner Terrestre

Malha – Superfície de representação tridimensional de uma estrutura

PSD – *Position Sensing Detector*

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UHE – Usina Hidrelétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
1.1.1	Objetivo Geral .....	16
1.1.2	Objetivos Específicos .....	16
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	17
<b>1.3</b>	<b>Estruturação</b> .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Tecnologia laser</b> .....	18
2.1.1	Princípio de Funcionamento .....	19
2.1.2	Mensuração de distância a laser .....	20
2.1.2.	Intervalo de Tempo (Time-of-Flight) .....	20
2.1.2.2	Diferença de Fase .....	22
2.1.2.3	Triangulação .....	24
2.1.3	Perfilamento a laser .....	26
2.1.4	Escaneamento a laser .....	27
<b>2.2</b>	<b>Sistema laser scanner terrestre</b> .....	28
2.2.1	Composição .....	30
2.2.2	Classificação .....	31
2.2.3	Aplicações .....	33
2.2.4	Erros no LST .....	33
2.2.4.1	Erros Instrumentais .....	34
2.2.4.2	Erros Relacionados aos Objeto .....	37
2.2.4.3	Erros Ambientais .....	38
2.2.4.4	Erros Metodológicos .....	38
<b>2.3</b>	<b>Barragens</b> .....	38
2.3.1	Barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR) .....	40
2.3.1.1	Propriedades do CCR .....	42
2.3.1.2	Métodos de aplicação de CCR .....	43
2.3.1.3	Vantagens da utilização de CCR .....	44
<b>2.4</b>	<b>Caracterização da área de estudo</b> .....	45
2.4.1	Localização .....	45



2.4.2	Estrutura .....	46
2.4.3	Impacto Socioambienta .....	47
2.4.4	Aspectos Ambientais .....	49
2.4.4.1	Meio Físico .....	49
2.4.4.2	Geologia Local da UHE Mauá .....	50
<b>2.5</b>	<b>Estado da arte .....</b>	<b>51</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>Laser Scanner Terrestre .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>Estação Total .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3</b>	<b>Materiais Complementares .....</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>Pré-Planejamento .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Reconhecimento da área .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3</b>	<b>Planejamento de pontos da primeira época (anterior a formação do reservatório) .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Levantamento com LST da primeira época .....</b>	<b>61</b>
<b>4.5</b>	<b>Levantamento com Estação Total Robotizada da primeira época .....</b>	<b>64</b>
<b>4.6</b>	<b>Planejamento de pontos da segunda época (posterior à formação do reservatório) .....</b>	<b>65</b>
<b>4.7</b>	<b>Levantamento com LST da segunda época .....</b>	<b>67</b>
<b>4.8</b>	<b>Levantamento com Estação Total Robotizada segunda época .....</b>	<b>69</b>
<b>4.9</b>	<b>Processamento de Dados .....</b>	<b>69</b>
4.9.1	Estação Total Robotizada .....	69
4.9.2	Laser Scanner Terrestre .....	70
<b>4.10</b>	<b>Métodos de comparação de dados LST .....</b>	<b>72</b>
4.10.1	Software CloudCompare .....	72
4.10.2	Software 3DReshaper .....	74
<b>4.11</b>	<b>Testes para criação de malhas (modelos) .....</b>	<b>76</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1</b>	<b>Comparação entre escaneamentos em pontos iguais de épocas distintas .....</b>	<b>84</b>

5.1.1	Comparações preliminares .....	84
5.1.2	Comparações finais .....	87
5.2	<b>Comparação entre o escaneamento em um ponto e a estrutura total da barragem .....</b>	90
5.3	<b>Comparação entre os escaneamentos de toda estrutura em ambas as épocas .....</b>	92
6	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	93
6.1	<b>Conclusões .....</b>	93
6.2	<b>Recomendações .....</b>	97
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	98
	<b>APÊNDICE I - Imagens complementares das comparações entre escaneamentos em pontos iguais em épocas distintas .....</b>	102
	<b>APÊNDICE II - Imagens complementares das comparações entre escaneamentos em um ponto e escaneamentos da estrutura total da barragem .....</b>	115

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas de grande porte faz-se importante visto o potencial de risco agregado a tais obras, que gera a necessidade de levantamentos contínuos de informações que auxiliem na prevenção de acidentes, preservação da segurança dos trabalhadores e pessoas ligadas indiretamente a essas estruturas, e também a preservação do meio ambiente das áreas diretamente influenciadas. Para tal é necessária a execução de diferentes técnicas de monitoramento, além da possibilidade de estudos sobre métodos e instrumentos mais adequados para tais tarefas.

Atualmente são aplicados diferentes métodos no monitoramento de estruturas, dentro dos quais encontra-se o método geodésico que utiliza técnicas de levantamento de pontos como triangulação, trilateração e posicionamento por satélite, realizadas com o emprego de instrumentos específicos. Assim, a avaliação de novos instrumentos de mensuração faz-se necessária para atualizar os métodos, visando a redução de custos, do tempo de execução, e o aumento de acurácia dos dados gerados com os levantamentos realizados nessas estruturas.

Através desse contexto surge o tema de monitoramento de uma barragem através do uso de diferentes tipos de equipamentos que possibilitem o levantamento dimensional de um objeto, e dentre esses o laser scanner terrestre desponta por sua funcionalidade. Trata-se de um sistema usado para a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos de uma superfície e destaca-se como um dos instrumentos que oferece inúmeros benefícios de medição, incluindo captura de dados com ou sem alvo, e que permite o escaneamento<sup>1</sup> de milhares de pontos em um tempo reduzido de levantamento. O LST já é utilizado em mapeamentos de patrimônio, levantamentos as-built e levantamentos topográficos (GORDON, LICHTI, FRANKE, STEWART 2004), porém são poucas as pesquisas realizadas sobre sua utilização para os fins de monitoramento.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o emprego de um laser scanner terrestre para monitoramento de estruturas, o que será realizado através da comparação entre dois escaneamentos da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá efetuados em épocas distintas, avaliando assim deslocamentos que possam surgir devido à formação de

---

<sup>1</sup> Escaneamento: mensuração de distâncias e coordenadas de uma série de pontos em uma determinada feição.

seu reservatório e à diferentes forças que atuam na estrutura. Para essa análise serão aplicados métodos que permitam a avaliação de determinadas regiões da barragem e também da estrutura como um todo, e não ponto a ponto como é feito com instrumentos como estações totais, níveis digitais e GNSS.

Nessa dissertação serão abordados os princípios de funcionamento da tecnologia laser, as características de um sistema laser scanner terrestre e as particularidades sobre barragens de usinas hidrelétricas. Também serão discutidos os métodos utilizados na pesquisa e os resultados encontrados através das comparações entre os levantamentos de campo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Averiguar o emprego de um laser scanner terrestre para o monitoramento de barragens através do estudo do levantamento a ser realizado na Usina Hidrelétrica de Mauá em duas diferentes épocas durante a formação do reservatório.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Planejar os pontos de instalação de equipamento necessários para o levantamento LST da primeira época;
- Processar e integrar os dados do LST e da estação total da primeira época;
- Planejar os pontos de instalação de equipamento necessários para o levantamento LST da segunda época;
- Processar e integrar os dados do LST e da estação total da segunda época;
- Comparar os dados obtidos nas diferentes épocas de levantamento;
- Analisar os resultados encontrados.

## 1.2 Justificativa

Levando em consideração a magnitude da construção de uma usina hidrelétrica, tanto seu planejamento como seu monitoramento necessitam as mais avançadas metodologias disponíveis nas áreas de engenharia. Através do monitoramento é possível levantar informações que serão utilizadas por projetistas e responsáveis pela segurança da obra, no sentido de compreender o comportamento dimensional da estrutura. Assim, o estudo da utilização de diferentes tipos de equipamentos e técnicas para o monitoramento de uma barragem é essencial para a obtenção de tais informações, fornecendo importantes dados para a tomada de decisões nas diferentes situações que possam ocorrer.

Dentre os diferentes tipos de equipamentos que permitem o levantamento de um objeto, o laser scanner terrestre apresenta a possibilidade de uma coleta de dados em grande escala e em um curto período de tempo, que juntamente à constante evolução de sua construção e funcionamento, que permitem o alcance de maiores precisões, são características do LST que já consagraram sua utilização em diferentes áreas da engenharia e arquitetura.

Tais aspectos, e pesquisas como as realizadas por Boeler et al. (2001), Gordon et al. (2004) e Van Genechten et al. (2008), justificam o estudo de sua utilização para diversas áreas. Dentro dessas inclui-se o monitoramento de estruturas proposto nesta pesquisa, que é um dos primeiros experimentos sobre o tema a ser realizado no Brasil.

## 1.3 Estruturação

Esta pesquisa está dividida em sete capítulos. O primeiro apresenta o tema proposto, objetivos e justificativa. O segundo apresenta uma fundamentação teórica sobre o tema, expondo as principais características da tecnologia laser, do sistema laser scanner terrestre e de barragens de usinas hidrelétricas, a caracterização da área de estudo e uma revisão do estado da arte. O quarto capítulo contém uma descrição dos materiais envolvidos na pesquisa. O quinto apresenta a metodologia envolvida na pesquisa, descrevendo os planejamentos e levantamentos realizados. O sexto apresenta os resultados encontrados da pesquisa. O sétimo e último apresenta as conclusões e recomendações.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresentará uma revisão sobre os assuntos mais importantes envolvidos nesta pesquisa. No primeiro item são apresentados os fundamentos da tecnologia LASER, descrevendo suas principais características e métodos de funcionamento. No segundo item é discutido o Sistema Laser Scanner Terrestre, apresentando sua composição, classificações e as principais fontes de erro do sistema. O terceiro item refere-se a barragens, dando ênfase às barragens construídas com concreto compactado a rolo (CCR) e às particularidades deste material. O quarto item engloba algumas das pesquisas desenvolvidas sobre monitoramento de deformações de estruturas com a utilização de Laser Scanner Terrestre (LST).

### 2.1 Tecnologia laser

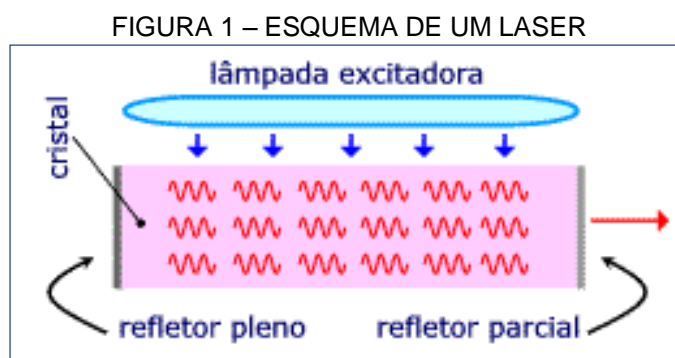
A palavra laser é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificação de luz por emissão estimulada de radiação). Basicamente, um laser é um dispositivo óptico que produz e emite um feixe ou pulso de radiação monocromática quando ativado por uma fonte de energia externa (LASER, 2007).

Como apontado por Toth et al.(2008), todo laser é constituído de três principais elementos:

- (i) Material de ativação, cujos elétrons serão excitados e elevados a um nível de energia mais alto, através da utilização de uma fonte de energia. Este material pode ser sólido, líquido, gasoso ou semicondutor;
- (ii) Fonte de energia, que fornece a energia para iniciar e manter a emissão do laser. Como exemplos podem ser citadas fontes ópticas e unidades de energia elétrica;
- (iii) Conjunto de dois espelhos, composto de um espelho totalmente refletor e outro semi-refletor (exemplo: parcialmente transmissivo).

### 2.1.1 Princípio de Funcionamento

O processo de funcionamento do laser é demonstrado na FIGURA 1, que apresenta um dos primeiros modelos construídos, onde uma barra de cristal de rubi é excitada por uma lâmpada a gás. Numa das extremidades há um espelho parcialmente refletor e na outra, um com 100% de reflexão. “A reflexão mútua provoca o alinhamento dos fótons na direção longitudinal e, através do refletor parcial, é emitido um feixe de luz altamente concentrado e monocromático” (MSPC. Informações Técnicas, 2007).



FONTE: (MSPC. Informações Técnicas. Laser: princípios básicos de funcionamento. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/ELETRN/LASER110.SHTML>. nov. 2007. Acesso em: 10 abr. 2012.).

Os diferentes tipos de laser existentes podem ser classificados geralmente segundo o tipo de material usado como fonte da radiação. Os tipos mais comuns são (WESCHLER, 2012):

- Lasers a gás;
- Lasers de estado sólido;
- Laser semicondutor;
- Laser Excimer; e
- Laser de corantes.

Nas operações de mensuração de distância, perfilamento e escaneamento a laser, onde altos níveis de energia são utilizados para as medições em longas distâncias, apenas alguns tipos de laser de estado sólido (Granada de ítrio e alumínio) e semicondutores (Arsenieto de Gálio) são empregados (SHAN e TOTH, 2008).

Embora a invenção do laser date da década de 1960, a falta de tecnologias para pesquisas impediu sua exploração no campo de mapeamento. Mas graças à introdução de tecnologias de georreferenciamento e com os avanços na área de computação, os sistemas topográficos de escaneamento laser tiveram um grande desenvolvimento nos últimos anos e tornaram-se uma das mais importantes tecnologias de aquisição de dados geoespaciais desde o último milênio. Uma das características desses sistemas, que garante essa importância a eles referida, é a possibilidade de coleta de dados 3D em larga escala em uma acurácia nunca vista (SHAN e TOTH, 2008).

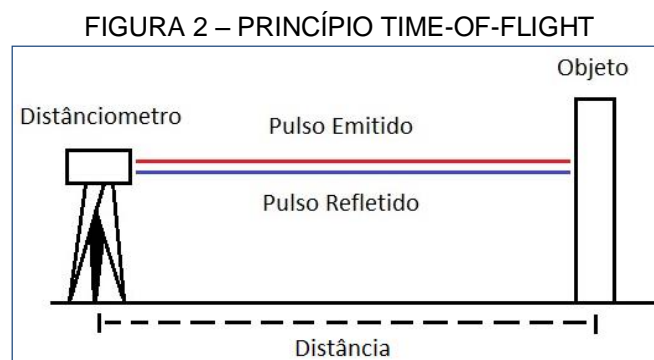
### 2.1.2 Mensuração de distância a laser

Todas as operações de medição, perfilamento e escaneamento a laser baseiam-se no uso de algum tipo de instrumento de medição de distância a laser. O distanciômetro laser (*laser ranger*) é o dispositivo responsável por essa mensuração de distâncias entre o sensor e objetos refletivos. Para tal, existem diferentes princípios de funcionamento do dispositivo, dentre os quais podem ser citados como principais: método do intervalo de tempo (*time-of-flight*), onde a distância é calculada através da medição precisa do tempo entre a emissão e o retorno do pulso; método da diferença de fase, onde a distância é calculada através da diferença de fase da onda modulada; e o método da triangulação simples, com equipamentos utilizando câmeras CCD (*Charge-Coupled Device*) (BOEHLER et al., 2001; SHAN e TOTH, 2008).

#### 2.1.2.1 Intervalo de Tempo (Time-of-Flight)

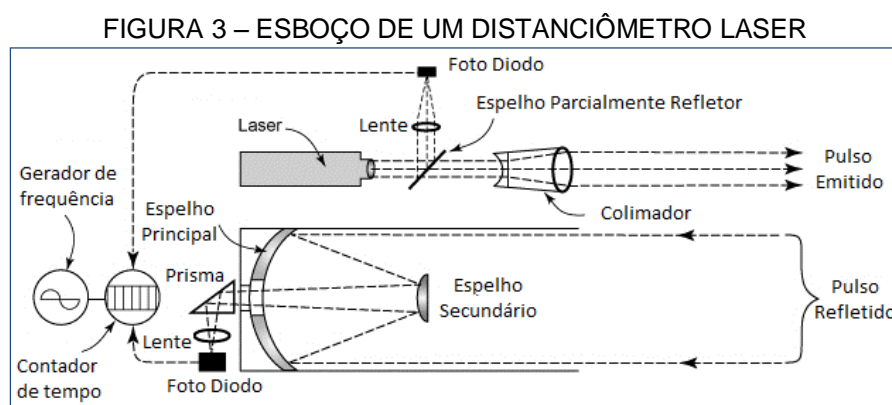
O princípio do cálculo da distância através do intervalo de tempo envolve a mensuração do tempo decorrido entre a emissão de um pulso, sua reflexão em um objeto, e seu retorno ao sensor. Ele é utilizado principalmente para medidas de longa distância, tanto para equipamentos terrestres e aerotransportados. Este princípio de funcionamento é apresentado na FIGURA 2.





FONTE: O AUTOR.

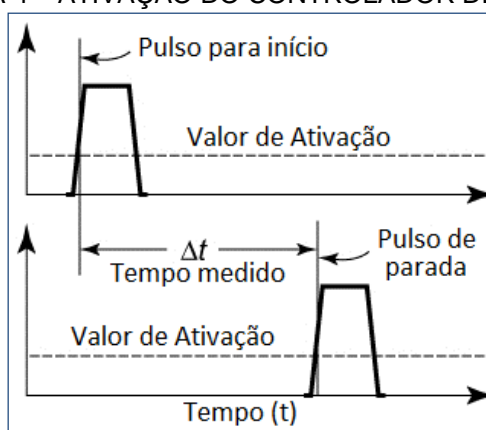
Um exemplo de distânciômetro laser que atua por este método é apresentado na FIGURA 3.



FONTE: ADAPTADO DE SHAN e TOTH, 2008.

A mensuração do intervalo de tempo entre emissão e recepção do pulso pode ocorrer da seguinte forma. Quando o laser emite um pulso, parte de sua energia é desviada por um espelho para um fotodiodo, que emite um sinal e aciona um dispositivo de contagem de tempo. Este acionamento é realizado quando o pulso atinge um valor de ativação (*threshold value*). Após o retorno do pulso, refletido por algum objeto, parte de sua energia é desviada para outro fotodiodo, que envia um sinal e cessa a contagem (SHAN; TOTH, 2008). Esse processo de ativação do contador de tempo pode ser contemplado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – ATIVAÇÃO DO CONTROLADOR DE TEMPO



FONTE: ADAPTADO DE SHAN e TOTH, 2008.

Como visto em Shan e Toth (2008) o cálculo da distância ( $d$ ), utilizando o intervalo de tempo ( $t$ ) e a velocidade da luz ( $c$ ), é feito pela aplicação da Equação 1.

$$d = c \cdot \frac{t}{2} \quad (1)$$

Da Equação 1 pode-se derivar a Equação 2:

$$\Delta d = \Delta c \cdot \frac{t}{2} + c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2)$$

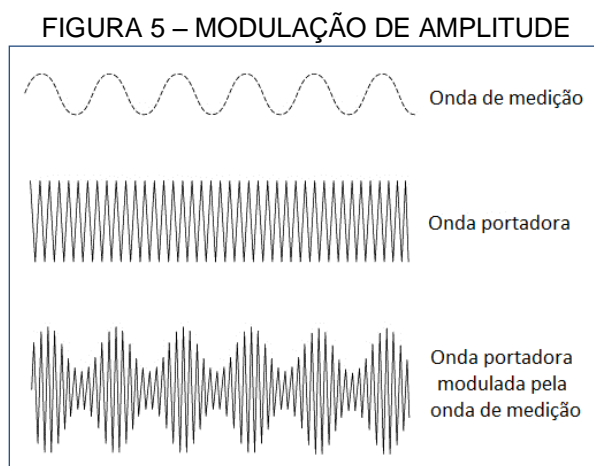
onde  $\Delta d$  representa a precisão da distância;  $\Delta c$  a precisão da velocidade; e  $\Delta t$  a precisão da mensuração de tempo. Como a precisão da velocidade da luz é conhecida, a precisão da distância é determinada pela precisão da mensuração de tempo.

#### 2.1.2.2 Diferença de Fase

Neste método, a distância é calculada pela determinação precisa da diferença de fase entre a onda transmitida e recebida.

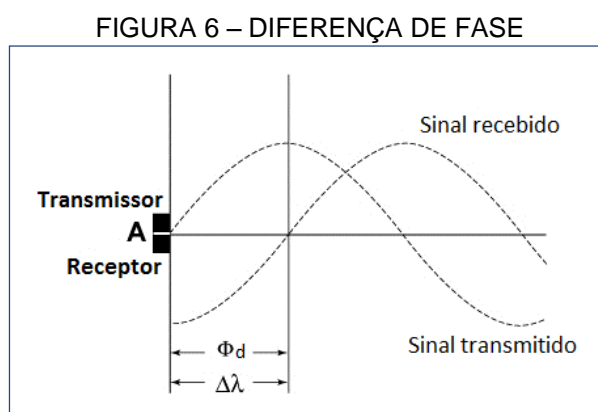
Este princípio de funcionamento é utilizado em equipamentos onde a radiação do laser é emitida como um feixe contínuo. É principalmente utilizado para medidas em curta distância (menores de 100 metros) em aplicações terrestre. Nestes equipamentos o feixe transmitido compreende um sinal portador (laser) no qual um

sinal modulador foi sobreposto para controlar a amplitude da onda portadora, um processo chamado modulação de amplitude, FIGURA 5. Este sinal modulador ou onda de medição é emitido, e mantido em um valor constante, por um oscilador de frequência (SHAN e TOTH, 2008).



FONTE: ADAPTADO DE SHAN e TOTH, 2008.

A reflexão de um sinal de onda contínua é similar a do sinal de pulso. O feixe atinge um objeto e uma parte do sinal é refletida de volta ao instrumento, onde é detectada por um foto diodo de silício. Este sinal passa então por um processo de demodulação, onde ocorre a separação das ondas portadora e de medição. Então, a diferença de fase, ou ângulo de fase ( $\phi$ ), entre o sinal refletido e o sinal do feixe transmitido original é medida, FIGURA 6. Ela representa uma fração ( $\Delta\lambda$ ) da distância total (SHAN e TOTH, 2008).



FONTE: ADAPTADO DE SHAN E TOTH, 2008.

O número total de comprimentos de onda ( $M$ ) não pode ser determinado por essa única medição. O processo de sua determinação é conhecido como problema da resolução de ambiguidade. Um dos métodos para essa resolução é pela mudança do padrão de modulação da onda, alterando seu comprimento ( $\lambda$ ) e sua frequência ( $f$ ) diversas vezes sequencialmente. As medições resultantes da série de diferenças de fase geram um sistema de equações, na forma da Equação 3 (SHAN e TOTH, 2008).

$$D = M_n * \frac{\lambda_n}{2} + \frac{\varphi_n}{2\pi} * \frac{\lambda_n}{2} \quad (3)$$

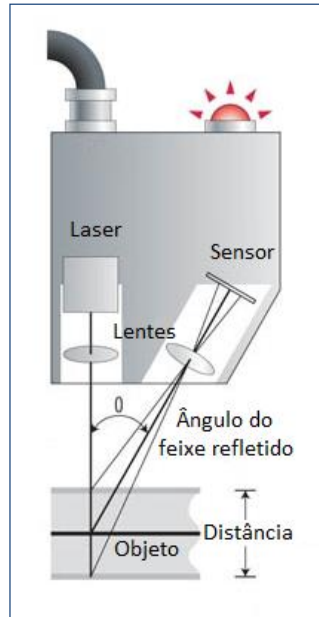
Onde  $n$  é o número de diferentes frequências empregadas. Através da resolução do sistema de equações é determinado valor total da distância ( $D$ ).

É importante salientar que a precisão da determinação da distância, quando utilizado um feixe laser modulado, é determinada pelas características do sinal modulador, incluindo o comprimento de onda e a solução da medição de fase. A menor frequência, associada ao maior comprimento de onda, determinará o maior valor de distância que poderá ser medido. Da mesma forma, a maior frequência, associada ao menor comprimento de onda, determinará o menor valor de distância que poderá ser medido (SHAN e TOTH, 2008).

### 2.1.2.3 Triangulação

Neste método a distância é determinada através do princípio da triangulação simples. Os sensores laser por triangulação são compostos por uma fonte laser de estado sólido e um sensor CCD, CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) ou PSD (*Position Sensing Detector*). Um feixe laser é emitido pelo sistema, com o ângulo de emissão conhecido, em direção ao objeto a ser medido. Uma porção do feixe é então refletida pelo objeto na direção de um ou mais sensores do sistema. Dependendo da distância do objeto o feixe refletido atinge o sensor em diferentes ângulos, e esses são registrados pelo sistema, FIGURA 7.

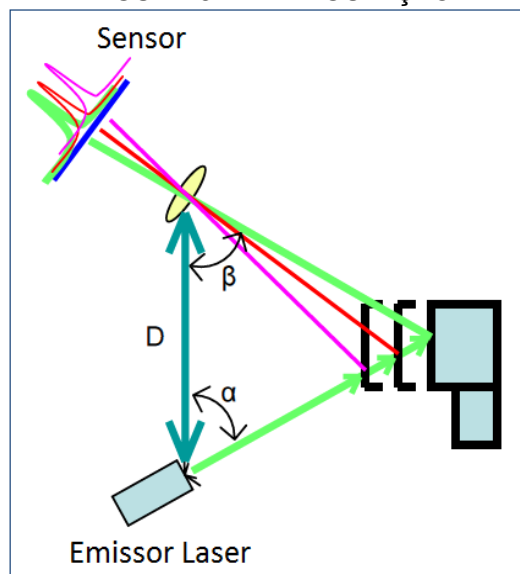
FIGURA 7 – SISTEMA LASER POR TRIANGULAÇÃO



FONTE: Adaptado de (MTI Instruments. Disponível em: <http://www.mtiinstruments.com/PRODUCTS/LASERTRIANGULATION.ASPX>. Acesso em: 20 abr. 2012.)

Como a geometria do sistema é conhecida, o valor de base ( $D$ ) entre o emissor laser e o sensor é determinado através de processos de calibração. A distância entre o objeto e o instrumento é então geometricamente determinada com a utilização dos ângulos de emissão ( $\alpha$ ) e recepção ( $\beta$ ), e o comprimento de base, FIGURA 8.

FIGURA 8 – TRIANGULAÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE VAN GENECHTEN *ET AL.*, 2008

Este tipo de instrumento atinge valores de desvio padrão de pontos 3D menores que um milímetro a curtas distâncias (menores que dois metros). A acurácia do método depende diretamente da distância do objeto e do valor do comprimento de base do instrumento. Como normalmente a base do instrumento é fixa, o desvio padrão da distância medida irá aumentar em proporção do quadrado da distância (BOEHLER et al., 2001).

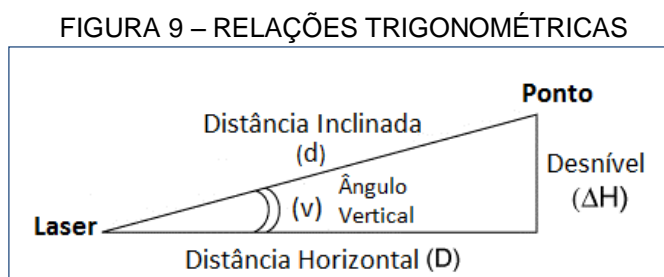
### 2.1.3 Perfilamento a laser

Perfilamento a laser é a mensuração de distâncias de uma série de pontos localizados um ao lado do outro ao longo de uma linha no terreno, formando um perfil bidimensional que mostra as elevações do terreno ao longo desta linha.

Para sistemas laser scanner terrestre, o levantamento do perfil do terreno é feito através de várias mediadas de distância inclinada ( $d$ ) e ângulos verticais ( $v$ ) para cada ponto que será armazenado digitalmente. A distância horizontal ( $D$ ) e o desnível ( $\Delta H$ ) entre o equipamento e os pontos no terreno são determinados utilizando os dados levantados e empregando as Equações 4 e 5 respectivamente, derivadas de relações trigonométricas do triângulo retângulo, FIGURA 9 (SHAN e TOTH, 2008).

$$D = d \cdot \cos(v) \quad (4)$$

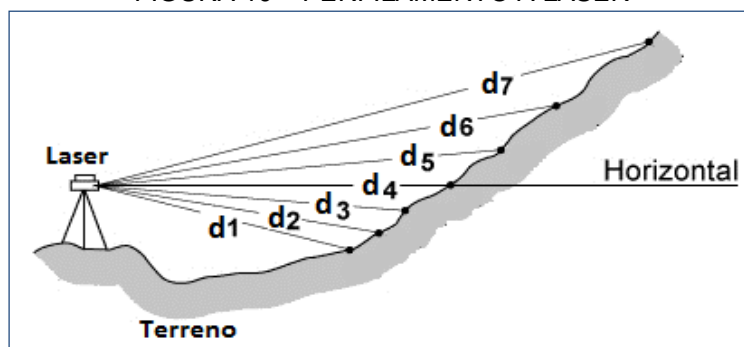
$$\Delta H = d \cdot \sin(v) \quad (5)$$



FONTE: O AUTOR.

A FIGURA 10 exemplifica um perfilamento realizado com laser terrestre, representando as distâncias inclinadas ( $d$ ) entre o equipamento e os pontos do terreno.

FIGURA 10 – PERFILAMENTO A LASER



FONTE: ADAPTADO DE SHAN E TOTH, 2008.

#### 2.1.4 Escaneamento a laser

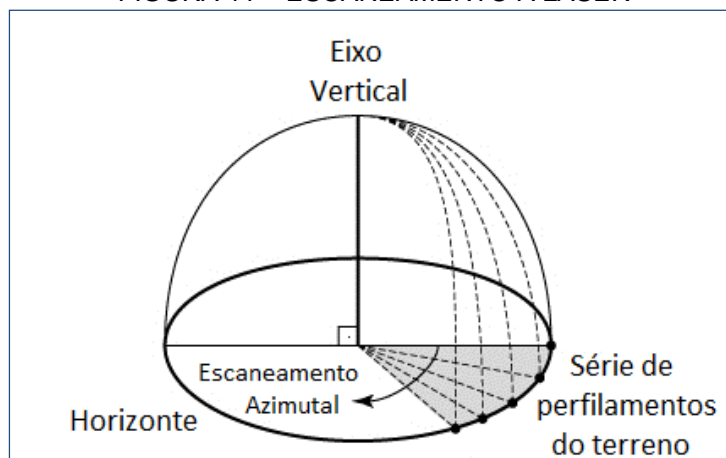
Segundo Shan e Toth (2008), o escaneamento a laser trata-se de uma evolução da tecnologia de mensuração a laser, feita através da adição de um espelho ou prisma rotativo aos instrumentos de perfilamento a laser tanto aéreos como terrestres. Assim o equipamento passa a realizar medições de feições topográficas de áreas em vez de simplesmente determinar valores de elevação de uma linha.

Os autores comentam que, para tal tipo de mensuração, faz-se necessária a movimentação da emissão laser em duas direções. Além do movimento vertical gerado pelos espelhos ou prismas, também é adicionada uma movimentação controlada na direção azimutal, geralmente implementada através da utilização de um motor, permitindo a realização de uma série de perfilamentos em torno do eixo vertical do instrumento. Assim torna-se possível o levantamento de um conjunto de pontos, ou nuvem (*cloud*) de pontos, com informações de posição (x,y) e elevação (z), possibilitando a formação posterior de um modelo tridimensional do terreno e de objetos presentes na área ao redor do laser scanner (SHAN e TOTH, 2008).

Esta metodologia é representada na

FIGURA 11.

FIGURA 11 – ESCANEAMENTO A LASER



FONTE: Adaptado de (SHAN; TOTH, 2008).

A tecnologia de escaneamento laser pode ser dividida em duas categorias: escaneamento estático e dinâmico. O escaneamento estático compreende a utilização de um sistema laser scanner mantido em uma posição fixa (laser scanner terrestre). As vantagens dessa metodologia são sua alta precisão e densidade de pontos adquiridos. Por sua vez, o escaneamento dinâmico inclui o emprego de um sistema laser scanner instalado em uma plataforma móvel: avião (laser scanner aerotransportado), carro em movimento e veículos aéreos não tripulados. Essa metodologia é mais cara e complexa, uma vez que requer sistemas de posicionamento adicionais como INS e GNSS (VAN GENECHTEN *et al.*, 2008).

Nesta pesquisa foi utilizada a tecnologia de escaneamento estática com o emprego de um sistema laser scanner terrestre, cujas principais características são apresentadas no item seguinte.

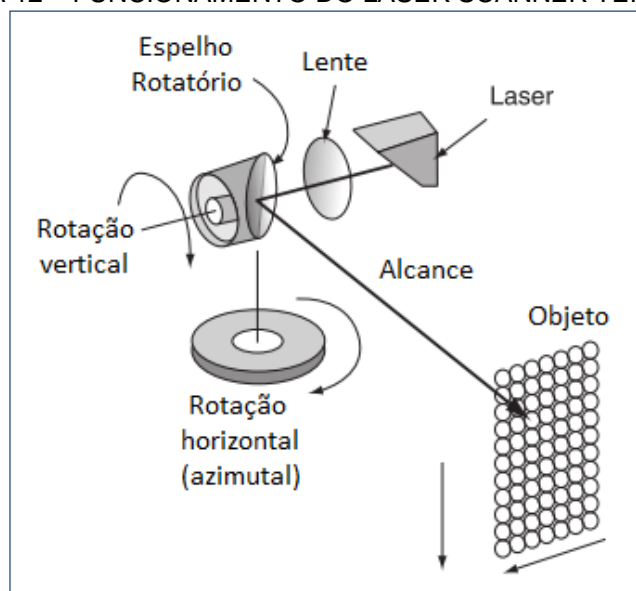
## 2.2 Sistema laser scanner terrestre

O laser scanner é um sistema usado para a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos de uma superfície. Seu funcionamento baseia-se na geração de pulsos de laser que são emitidos na direção aos objetos. Como mencionado previamente, esses pulsos são direcionados ao ambiente com auxílio de um espelho, ou prisma, e também um motor que gera a rotação horizontal (azimutal) em torno do eixo vertical do instrumento, como visto na FIGURA 12. Ao atingir o objeto os pulsos são refletidos, e parte de sua energia volta na direção do sistema. Tendo



esses dados o sistema determina a distância entre o sensor e o objeto através da medição do intervalo de tempo decorrido desde a emissão até o retorno do pulso, como dito nos itens anteriores (DALMOLIN e SANTOS, 2004; SHAN e TOTH, 2008).

FIGURA 12 – FUNCIONAMENTO DO LASER SCANNER TERRESTRE



FONTES: ADAPTADO DE SHAN E TOTH, 2008.

Algumas das características importantes do laser scanner são:

É um método ativo que não depende da luz visível refletida, embora alguns modelos de scanners apresentem comportamento inadequado na ausência total de iluminação;

Operação remota, o que significa que o objeto não precisa ser tocado;

O princípio geométrico de cálculo das coordenadas pode ser a triangulação, o intervalo de tempo ou a diferença de fase, dependendo do modelo, mas em todos os casos a varredura pode ser feita com apenas uma estação por visada;

A resposta está disponível em tempo real, após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, estando apto a fornecer respostas sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies;

Alta densidade de pontos coletados e, conseqüentemente, altíssima redundância na descrição discreta dos objetos;

É possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, caso necessário;

Operação simples e flexível; basta um operador para posicionar e operar o sistema;

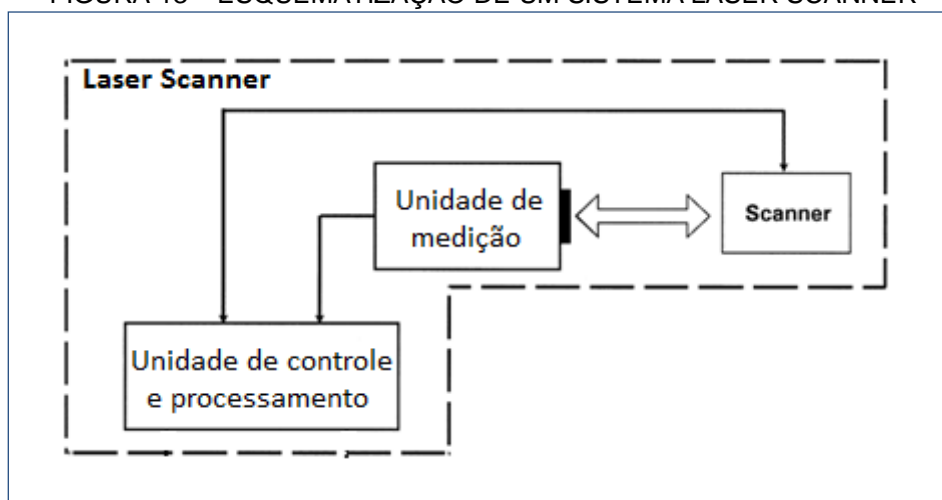
É possível combinar vários modelos numéricos gerados de diferentes posições, o que permite cobrir quase toda superfície visível dos objetos;

Alguns sistemas possuem software para a obtenção de descrições paramétricas dos objetos por ajuste à nuvem de pontos, o que permite uma acurácia ainda maior que a dos pontos isolados; além disto, devido à alta densidade de pontos as ferramentas automáticas de alguns sistemas fazem a busca pelos pontos pertencentes aos mesmos objetos ou superfícies com pouca interação com o operador, o que aumenta substancialmente a produtividade. (TOMMASELLI, 2003 *apud* WUTKE, 2006).

### 2.2.1 Composição

De acordo com Werh e Lohr (1999), um sistema laser scanner é composto de três unidades: uma unidade de medição laser, que compreende a emissão e recepção do sinal laser, um scanner óptico e uma unidade de controle e processamento. Essa subdivisão é mostrada na FIGURA 13.

FIGURA 13 – ESQUEMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA LASER SCANNER



FONTE: ADAPTADO DE WERH e LOHR, 1999.

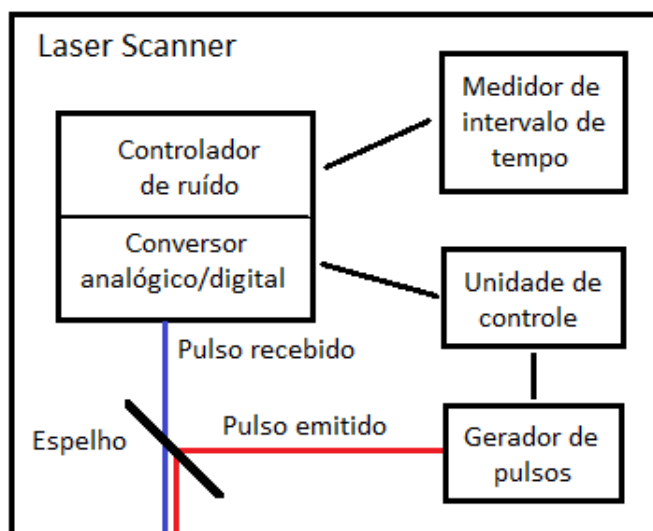
Outra abordagem sobre a composição do sistema laser scanner, segundo Brandalize (2002, *apud* DALMOLIN; SANTOS, 2004), define os seguintes componentes essenciais: gerador de pulsos; conjunto ótico de transmissão e recepção do pulso, e detector de sinais.

Componente principal do sensor laser, o gerador de pulso é responsável pela emissão do pulso, que ocorre devido a um estímulo realizado por um cristal sintético excitado por um diodo semiconductor. A maior parte dos sistemas laser funciona entre 0.8 a 1.6  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético, que possui propriedades físicas como pulsos curtos, espectro ótico estreito e alto poder de energia. Após a geração, o pulso é orientado através de tubos de flash para um espelho de varredura (deflector de pulsos). Juntamente com um conjunto de lentes, os espelhos orientam os pulsos em direção ao ambiente em direção aos objetos. Este conjunto ótico também é responsável pelo recebimento do sinal de retorno, vindo da reflexão dos objetos, e pelo seu direcionamento para o receptor. Este recebe um sinal analógico como retorno do ambiente e o converte para digital. O sinal digital passa então por um filtro de

suavização, onde ocorre a verificação de sua intensidade. Assim é comparada essa intensidade à intensidade do sinal emitido (DALMOLIN E SANTOS 2004).

Esta composição pode ser observada na FIGURA 14.

FIGURA 14 – COMPOSIÇÃO DE UM LASER SCANNER



FONTE: Adaptado de (DALMOLIN; SANTOS, 2004).

### 2.2.2 Classificação

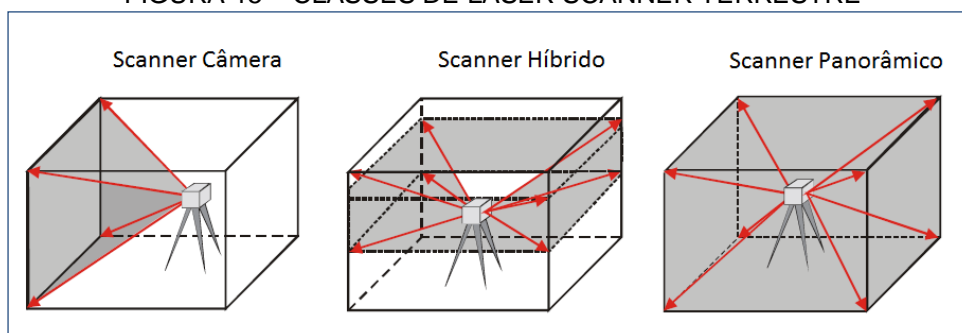
A principal classificação aplicada a sistemas LST diferencia os instrumentos segundo o método de coleta de dados utilizado para medir distâncias. Como previamente comentado, estes são: tempo de voo, diferença de fase e triangulação.

Porém, segundo Shan e Tooth (2008), esta classificação segundo o método de coleta não leva em consideração a técnica de escaneamento angular que é utilizada para proporcionar a devida cobertura do terreno e dos objetos presentes. Assim, seria essencial um segundo tipo de classificação que considere tanto o método de coleta como o padrão ou cobertura que o instrumento realiza.

A classificação indicada por Staiger (2003) abrange esse conceito, e distingue os instrumentos em três classes: scanner câmera (a), scanner híbrido (b) e scanner panorâmico (c), FIGURA 15. Como apontado por Shan e Tooth (2008), essas classes possuem as seguintes características:

- a) Os scanners do tipo câmera realizam as medições de distância e ângulos em uma limitada variação angular e em um específico campo de visada (Field of view – FOV). O recobrimento angular desses equipamentos é de  $40^\circ \times 40^\circ$ , podendo ser comparado ao de uma câmera fotográfica. Este tipo de instrumento é recomendado para o levantamento do objeto a partir de uma visão externa.
- b) No tipo de scanners híbridos o movimento de escaneamento em torno de um dos eixos de rotação é livre (geralmente o movimento horizontal na direção azimutal ao redor do eixo vertical do instrumento), enquanto o movimento em torno do outro eixo (horizontal) é limitado, podendo variar de  $50^\circ$  a  $60^\circ$ . Estes equipamentos são indicados para situações onde não é necessário o levantamento de objetos em ângulos abruptos, como em interiores de prédios.
- c) O escaneamento realizado pelos scanners panorâmicos é realizado em um padrão sistemático que permite um recobrimento angular de  $360^\circ$  sobre o plano horizontal que passa pelo centro do instrumento, e um recobrimento de no mínimo  $180^\circ$  sobre o plano vertical, perpendicular ao plano horizontal. Este campo de visada vertical pode chegar ao valor de  $320^\circ$ , o que possibilita um maior recobrimento. Para estes equipamentos o único vazio do levantamento de dados é a área de sua base. Esta classe de scanners é altamente aplicada em diversas áreas de levantamentos, como mapeamento topográfico, levantamentos industriais, arquitetônicos e para mineração.

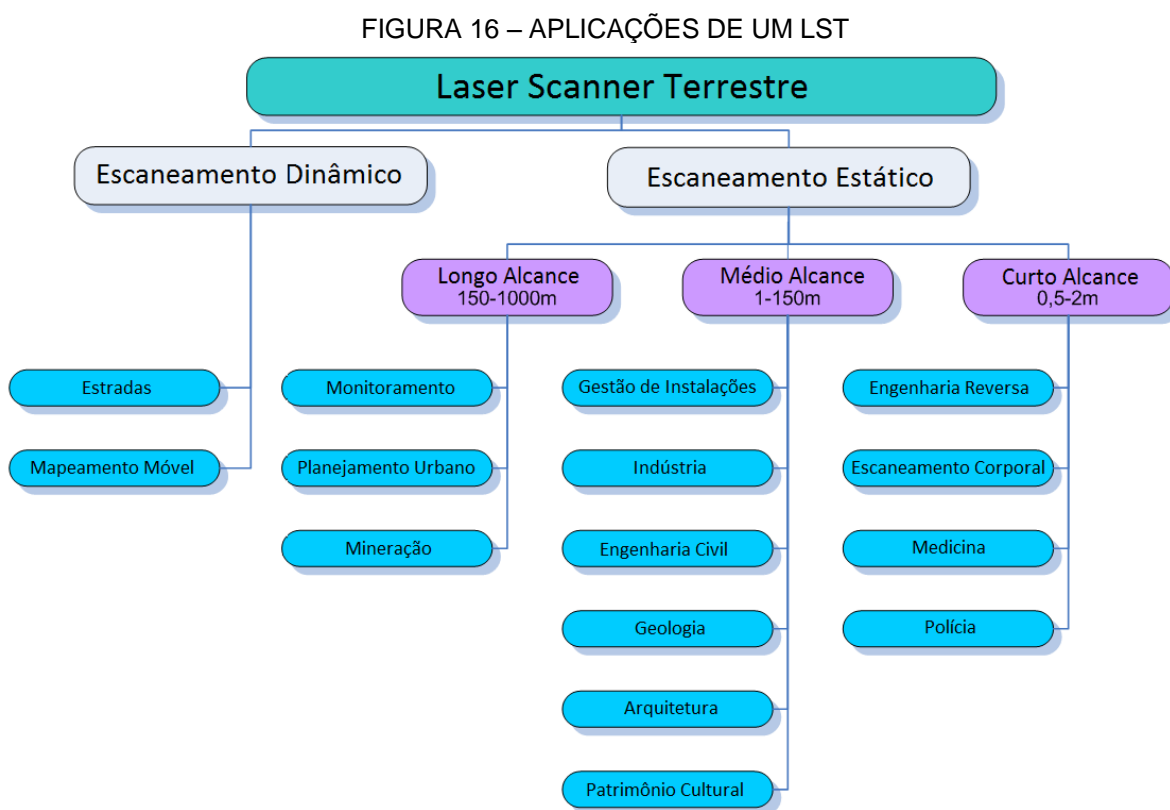
FIGURA 15 – CLASSES DE LASER SCANNER TERRESTRE



FONTE: Adaptado de (STAIGER, 2003).

### 2.2.3 Aplicações

Inicialmente o escaneamento a laser era de curto alcance e aplicado principalmente em projetos industriais e automobilísticos, para auxiliar nos procedimentos de CAD (*Computer Aided Design*). Com a evolução da tecnologia, scanners de médio alcance foram desenvolvidos para a indústria petroquímica, possibilitando o levantamento 3D de suas complexas instalações. Atualmente, devido às vantagens de sua utilização, diversas outras áreas empregam o escaneamento a laser (FIGURA 16): levantamento de patrimônio cultural, arquitetura, urbanismo, levantamentos forense, entre outras (VAN GENECHTEN *et al.*, 2008).



FONTE: Adaptado de (VAN GENECHTEN *et al.*, 2008)

## 2.2.4 Erros no LST

Como apontado por Reshetyuk (2006) a investigação das fontes de erros no LST é bastante complicada, visto que muitos são os fatores que influenciam neste estudo: acurácia, precisão, resolução, variação de *designs* dos instrumentos, operação em diferentes comprimentos de onda, utilização de deflectores de pulsos (espelhos ou prismas) distintos e diferentes metodologias de levantamento. Em função desses aspectos, o autor adota uma classificação baseada parcialmente em Staiger (2005), dividindo os erros no LST em 4 tipos:

- 1) Instrumentais;
- 2) Relacionados aos objetos;
- 3) Ambientais; e
- 4) Metodológicos.

### 2.2.4.1 Erros Instrumentais

Os erros instrumentais são aqueles atribuídos ao design e especificações técnicas do LST. Eles podem exercer influencia aleatória ou sistemática nos levantamentos laser, sendo assim seu conhecimento essencial para a utilização do LST (SANTIBAÑEZ, 2010).

Segundo Hebert e Krotkov (1992, citado por Reshetyuk, 2006) esses erros podem ser divididos em duas classes, fundamentais e específicos. Os erros fundamentais são aqueles referentes à física do distanciômetro laser e do deflector de pulsos, e são devidos às limitações do sistema, não podendo ser minimizados ou removidos. Na outra classe, os erros específicos dos componentes do scanner, incluindo erros do distanciômetro laser (a), do deflector de pulsos (b) e dos eixos (c). Estes erros podem ser minimizados ou removidos por processo de calibração para a componente linear, e verificados e retificados para a componente angular.

#### a) Erros do distanciômetro laser

Os erros que podem afetar os distanciômetros podem ser divididos em aleatórios e sistemáticos.

Os erros aleatórios determinam a precisão da medida da distância ( $\sigma_r$ ) feita pelo distanciômetro, que pode ser descrita pela Equação 6 (RESHETYUK, 2006):

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{0.35}{B \cdot SNR \sqrt{n}} \quad (6)$$

Onde  $c$  representa a velocidade da luz,  $B$  a largura da faixa do canal receptor,  $SNR$  a proporção de sinal ruído da detecção do pulso e  $n$  o número de medições independentes utilizados no cálculo da distância.

Como apontado por Reshetyuk (2006), e também pode ser observado na Equação 6, a precisão da medida da distância é influenciada pelo  $SNR$ , que é ligado diretamente a fatores como a força do pulso recebido (que determina a confiabilidade da distância medida) e às características do receptor de pulsos. O autor comenta que, além do  $SNR$ , a precisão da medição da distância também é influenciada por outros fatores como o tempo de ascensão do pulso, largura do pulso, sensibilidade do detector de contagem de tempo, número de mensurações independentes de pulsos e a reflexão que ocorre no feixe recebido, resultante da reflexão causada pela proteção de vidro da janela de escaneamento.

Os erros sistemáticos que afetam a acurácia na medida da distância são: não linearidade do distanciômetro laser, erro do discriminador de tempo, mudanças de temperatura nos instrumentos de mensuração de tempo, discrepância entre as posições zero eletrônica e mecânica no scanner, erro de escala na medida de distância e mistura de pulsos, que provocam deslocamentos nas distâncias medidas nas bordas de objetos. Estes erros sistemáticos são os mesmos dos distanciômetros eletrônicos citados por Faggion (2001).

#### b) Erros do deflector de pulsos

Estes erros influenciam na acurácia e precisão das medidas angulares dos scanners. Segundo Reshetyuk (2006), alguns dos erros comuns a todos os tipos de deflectores são:

- A qualidade dos sensores de posição angular que limitam a acurácia angular de um laser scanner;
- Erro de zero (correspondente ao erro de índice vertical de uma estação total);
- Erro de escala.

O autor apresenta uma descrição completa desses erros e também dos erros distintos de cada tipo de deflector.

### (c) Erros dos eixos

Conforme visto em Santibañez (2010), o laser scanner é composto de três diferentes eixos, que são os mesmos utilizados na construção de teodolitos e estações totais:

- 1) Eixo vertical (principal): nos scanners panorâmicos esse é o eixo de rotação da cabeça do scanner, que se situa no plano de escaneamento vertical. Para os scanners câmera esse é o eixo ortogonal aos eixos dos espelhos oscilantes;
- 2) Eixo de colimação (linha de visada): o eixo passante pelo centro do espelho escaneador e pelo centro do ponto laser no objeto. Grosseiramente, este eixo coincide com o feixe laser;
- 3) Eixo secundário (horizontal): eixo de rotação do espelho escaneador.

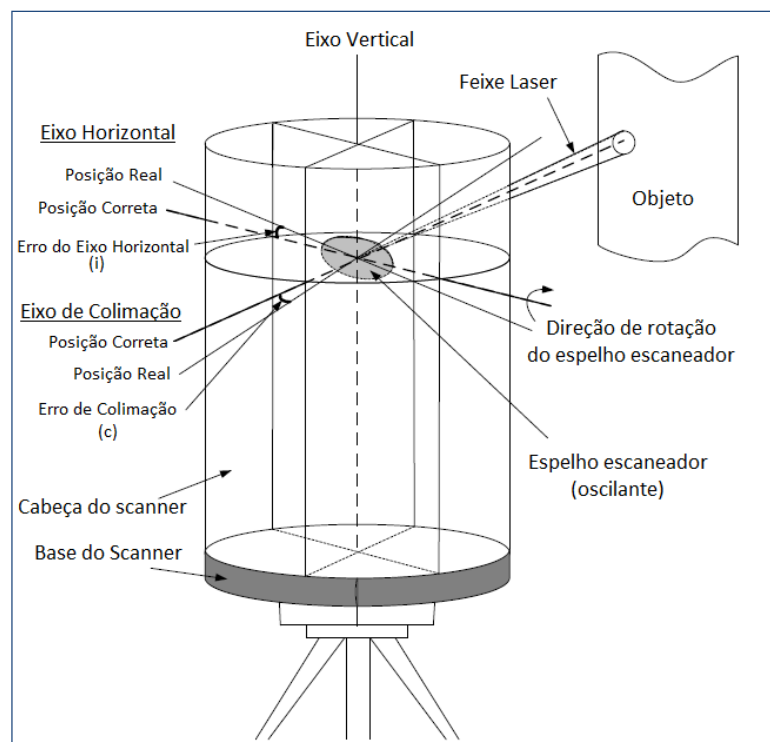
Reshetyuk (2006) aponta os seguintes erros devidos às tolerâncias de fabricação que causam o alinhamento imperfeito dos eixos que compõe o laser scanner:

- Erro de colimação (c): o ângulo entre o eixo de colimação e a normal ao eixo horizontal, medido no plano que contém os eixos horizontal e de colimação;
- Erro do eixo horizontal (i): o ângulo entre o eixo horizontal e a normal ao eixo vertical, medido no plano que contém os eixos horizontal e vertical.

Estes erros podem ser observados na FIGURA 17.



FIGURA 17 – EIXOS MECÂNICOS DE UM LST E SEUS ERROS



FONTE: Adaptado de (RESHETYUK, 2006)

#### 2.2.4.2 Erros Relacionados aos Objetos

Estes erros estão relacionados com os objetos que são escaneados. Dentre os efeitos que influenciam os escaneamentos podem ser citados: refletância, tamanho, curvatura e orientação dos objetos. Segundo Santibañez (2006) o principal destes efeitos é a refletância, que é diretamente ligada a diversos fatores:

- Propriedades materiais do objeto;
- Cor da superfície;
- Comprimento de onda do laser;
- Ângulo de incidência do feixe laser;
- Rugosidade da superfície;
- Temperatura da superfície; e
- Umidade da superfície.

#### 2.2.4.3 Erros Ambientais

Os efeitos ambientais também contribuem para os erros de mensuração, introduzindo variáveis de difícil controle. Dentre esses principais fatores Reshetyuk (2006) cita:

- Propagação do feixe laser na atmosfera, que causa distorções no formato do pulso que retorna ao sensor e redução na sua intensidade;
- Erros causados pela influência das condições atmosféricas;
- Influência de condições meteorológicas adversas;
- Interferência de radiação de fontes de iluminação externas; e
- Erros causados pela instabilidade do scanner.

#### 2.2.4.4 Erros Metodológicos

Estes erros são relacionados às metodologias de levantamento escolhidas. Algumas das fontes desses erros são: a resolução do scanner, distância até o objeto, e o método de georreferenciamento aplicado.

### 2.3 Barragens

“As barragens são estruturas artificiais construídas no leito de um rio [...] para acumular as águas para diversas funções. Em geral, elas são utilizadas para o abastecimento de água [...], produção de energia elétrica e prevenção de enchentes” (DEINFRA, 2012).

Segundo Zingano (2012) as barragens podem ser classificadas em dois principais tipos: barragens de concreto e de aterro. As barragens de concreto são assim denominadas devido ao material utilizado em sua construção, e o autor as subdivide em três categorias:

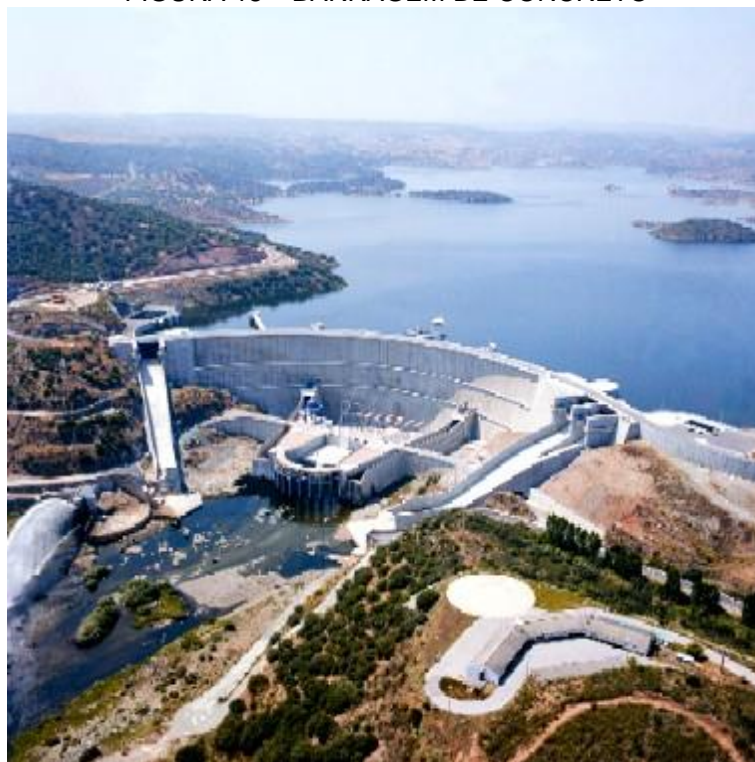
- Barragem de concreto gravidade;
- Barragens em arco; e
- Barragens de contraforte.

As barragens de aterro são como o nome indica um aterro, ou seja, uma barreira de terra e/ou rochas. O autor subdivide essas estruturas em:

- Barragens de terra; e
- Barragens de enrocamento.

Exemplos de barragens de concreto (arco) e de aterro (enrocamento), são exibidos na FIGURA 18 e FIGURA 19, respectivamente.

FIGURA 18 – BARRAGEM DE CONCRETO



FONTE: (Mundo das Energias. Disponível em: <http://mundodasenergias.blogspot.com.br/2007/10/iberdrola-e-endesa-interessadas-nas.html>. Acesso em: 21 abr.).

FIGURA 19 – BARRAGEM DE ATERRO



FONTE: ( ENGENHARIA Civil: engenharia civil na Internet. Disponível em: <http://www.engenhariacivil.com/simulacao-numerica-comportamento-barragens-aterro.html> . Acesso em: 13 abr. 2012.).

Uma vez que os levantamentos de campo desta pesquisa serão realizados na Usina Hidrelétrica de Mauá, que possui uma barragem de concreto compactado com rolo, as principais características da metodologia de utilização de tal material nas construções de barragens serão apresentadas no item a seguir.

### 2.3.1 Barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR)

Segundo Oliveira e Salles (1995, citado por MILANI FILHO, 2003), o concreto compactado com rolo (CCR) é um concreto de consistência seca, aspecto arenoso com propriedades próprias, que é transportado, espalhado e compactado de forma contínua, através de maquinários usualmente aplicados em obras de terra e enrocamento.

O CCR é um material cujo principal uso é a construção de barragens e pavimentos. Trata-se de um concreto seco, consolidado por compactação externa, realizada geralmente por compressores vibratórios, frequentemente empregados na compactação de solos (RIBEIRO et al. 2000, citado por ABREU e FIGUEIREDO, 2003).

As primeiras utilizações de CCR na construção de barragens datam da década de 60, destacando-se a barragem de Shimen, em Taipei, onde o concreto foi utilizado como núcleo impermeável da estrutura, e a barragem de Alpe Gera, na Itália (WENDLER, 2010).

A primeira aplicação de CCR em barragens no Brasil ocorreu no canteiro de obras na barragem Itaipu Binacional (FIGURA 20). Na mesma obra, em 1978, foi aplicado um volume de 26.000 m<sup>3</sup> na rampa de acesso às fundações da estrutura de desvio. Neste mesmo ano, foram lançados 40.000 m<sup>3</sup> de CCR na barragem de São Simões, em Goiás, para o preenchimento das galerias de desvio, na parede de concreto e na regularização (SILVA, 2012; WENDLER, 2010).

FIGURA 20 – ITAIPÚ BINACIONAL



FONTE: (USINAS hidrelétricas e seus impactos ambientais. Disponível em: <  
<http://projetononame.blogspot.com.br/>. Acesso em: 12 abr. 2012.).

Segundo Adriolo (1998, *apud* SILVA, 2012) e Kuperman (1996), em 1986 no Brasil, estado da Paraíba, ocorreu uma importante aplicação de CCR com a construção da barragem Saco de Nova Olinda (FIGURA 21). A estrutura possui 56m de altura e 135.000 m<sup>3</sup> de concreto, com pico de concretagem máximo de 2.500 m<sup>3</sup>/dia, e foi a primeira barragem de CCR com eixo longitudinal em curva (arco) construída no mundo, e também a primeira barragem totalmente construída em CCR no país.



FIGURA 21 – BARRAGEM SACO



FONTE: (Vale Vila Verde. Disponível em: <http://valevivaverde.blogspot.com.br/2012/02/barragem-saco-municipio-de-nova-olinda.html>. Acesso em: 10 abr. 2012.)

#### 2.3.1.1 Propriedades do CCR

As propriedades significativas do concreto compactado com rolo são praticamente as mesmas do concreto convencional (CC), uma vez que as diversas propriedades dos dois tipos de concreto têm apresentado valores análogos. Certas diferenças podem surgir devido à dosagem efetuada, pois o CC possui um maior teor de água e de pasta que o CCR (MILANI FILHO, 2003).

Segundo Andriolo (1989, citado por MILANI FILHO, 2003), a diferença entre os processos de uso de concreto convencional e CCR é o adensamento. Assim, a falta de similaridade entre eles pode ser atribuída à diferença na granulometria, dosagem e índice de vazios.

Outras características do CCR apontadas por Milani Filho (2003) são apresentadas a seguir:

- Massa específica – ligeiramente superior à do CC, devido ao menor teor de água e de pasta da mistura e da maior energia de compactação;
- Resistência à compressão – aproximadamente 15% a 30% mais elevada do que o CC, e é afetada principalmente pela relação água/aglomerante e pela energia de compactação;

- Resistência à tração – similar à do concreto convencional;
- Resistência ao cisalhamento – valores nas mesmas proporções do concreto convencional;
- Módulo de deformação – menor que o do CC nas baixas idades quando usado baixo teor de água. A partir da idade de 90 dias este módulo tende a ter valores semelhantes.
- Módulo de elasticidade – na idade de sete dias os valores são menores que o do CC;
- Coeficientes de Poisson – não apresenta diferenças significativas à do concreto convencional vidrado;
- Deformação lenta (fluência) – valores significativamente vantajosos em relação aos valores de coeficiente de fluência obtidos para no CC;
- Variação de volume devido à perda de água – menor do que a do concreto convencional, devido ao menor teor de água e cimento do CCR;
- Variação de volume devido a fatores térmicos – menor que a do CC, pois o CCR tem menor teor de cimento para um mesmo nível de resistência;

Uma descrição mais aprofundada dessas características pode ser encontrada em Milani Filho (2003).

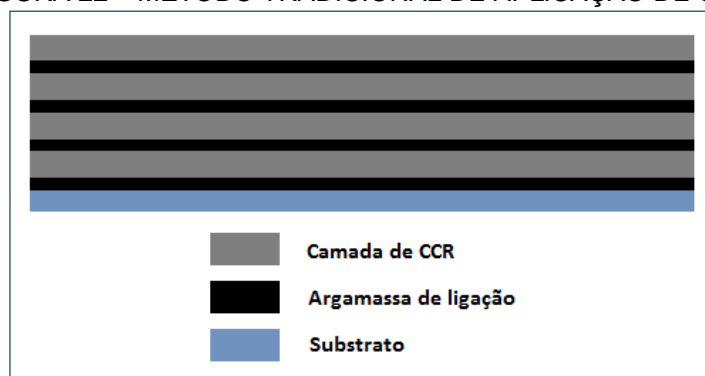
#### 2.3.1.2 Métodos de aplicação de CCR

Existem duas metodologias para a construção de barragens com CCR, o método tradicional, onde o concreto é lançado em camadas horizontais, e método rampado, onde o concreto é lançado para formar uma rampa (SILVA, 2012).

No método tradicional existe a necessidade de exposição de cada camada de concreto por um período de 12 horas antes de sua cobertura pela camada seguinte. Após esta exposição é necessária a aplicação de uma argamassa de ligação sobre a camada de concreto e, em alguns casos, até tratamento de junta (BATISTA et al. 2002).

Um exemplo dessa metodologia pode ser observado na FIGURA 22.

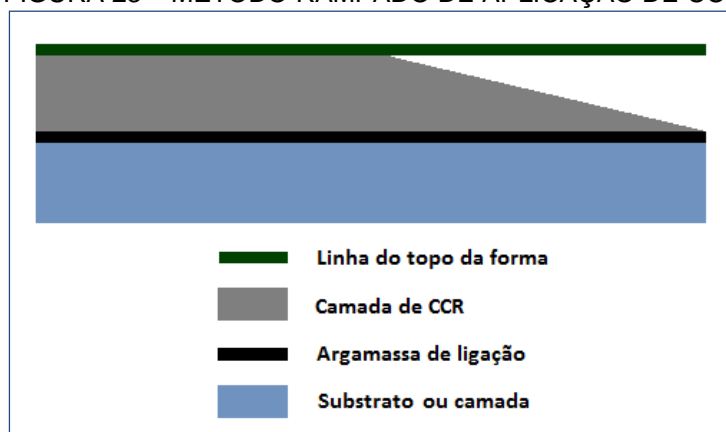
FIGURA 22 – MÉTODO TRADICIONAL DE APLICAÇÃO DE CCR



FONTE: Adaptado de (BATISTA, 2002).

Já no método rampado as camadas de concreto são executadas em rampa, variando sua altura entre 1,80 a 3 metros, com subcamadas de 30 a 35 cm de altura. Tais subcamadas são realizadas em rampas com declividade variando entre 7 e 10%, resultando em uma superfície de exposição reduzida, o que possibilita a cobertura total da frente de concretagem em no máximo 4 horas. Isso torna dispensável a aplicação de argamassa de ligação entre subcamadas, sendo aplicada apenas no trecho onde a camada rampada encontra-se em contato com a camada anterior. Esta metodologia é exemplificada na FIGURA 23.

FIGURA 23 – MÉTODO RAMPADO DE APLICAÇÃO DE CCR



FONTE: Adaptado de (BATISTA, 2002).

### 2.3.1.3 Vantagens da utilização de CCR

Algumas das vantagens da utilização de CCR na construção de barragens, segundo Milani Filho (2003) e Wendler (2010) são:

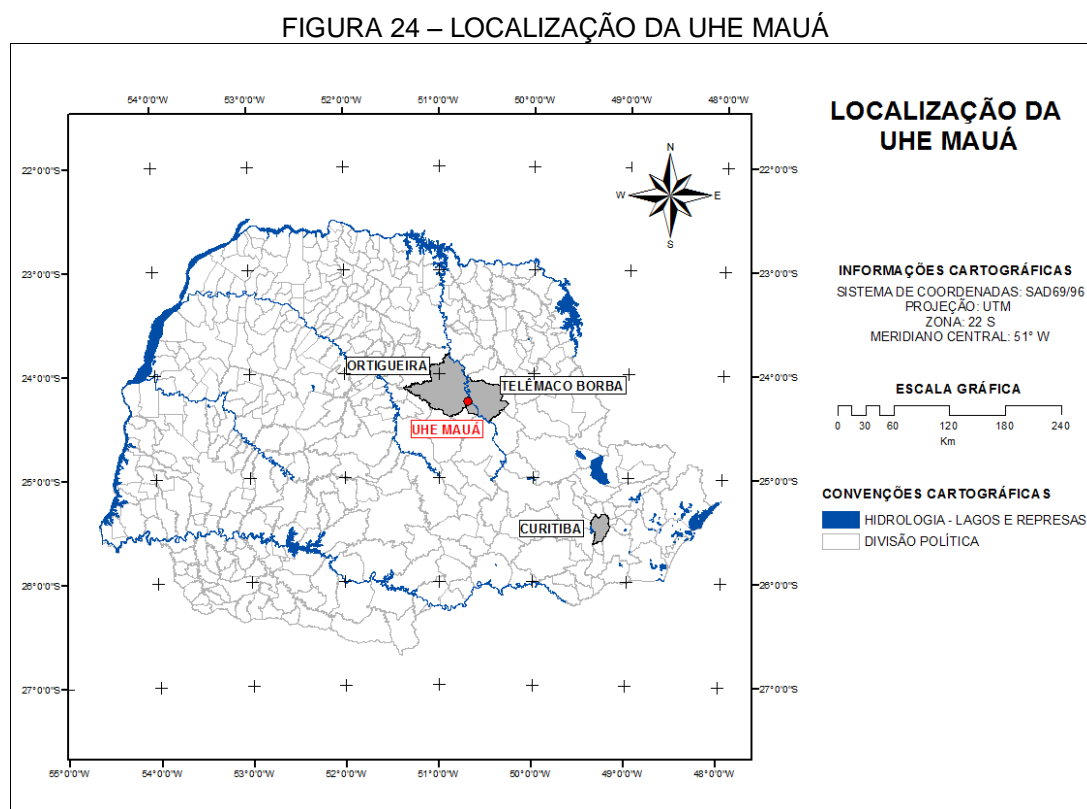


- Utilização de equipamentos de grande produção;
- Produtividade superior;
- Sensível redução do consumo de materiais de custo elevado;
- Redução no uso de formas;
- Menor probabilidade de fissuras térmicas;
- Modernização dos processos executivos;
- Menor interferência de condições climáticas;
- Manutenção da qualidade final da obra com infraestrutura final de apoio simplificada e reduzida.

## 2.4 Caracterização da área de estudo

### 2.4.1 Localização

A Usina Hidrelétrica de Mauá situa-se na porção média do rio Tibagi, região centro-leste do estado do Paraná, na divisa dos municípios Ortigueira e Telêmaco Borba próximo ao Salto Mauá (FIGURA 24).



FONTE: (SILVA, 2012).

### 2.4.2 Estrutura

A barragem desta UHE tem seção típica de enrocamento, impermeabilizada com laje de concreto no talude de montante. A largura de sua crista é de 8 m e possui taludes de montante e jusante com inclinações de 1:1,35 (Vertical:Horizontal). Seu eixo é retilíneo medindo aproximadamente 700 m em sua extensão. A altura máxima desta barragem é de 88 m, e possui crista na altitude 645,50 m. Seu vertedouro possui quatro vãos controlados por comportas segmento e está posicionado na ombreira esquerda, a aproximadamente 350 m a jusante de seu eixo (CNEC, 2004). A barragem é apresentada na FIGURA 25.

FIGURA 25 – BARRAGEM UHE MAUÁ



FONTE: O AUTOR

O reservatório formado tem cerca de 80 km de extensão, situando-se entre os arredores do Salto Mauá e a cidade de Telêmaco Borba. A barragem proporciona a formação de um reservatório cujo volume será cerca de  $2,824 \times 10^6 \text{m}^3$ , inundando uma área aproximada de  $99,3 \text{km}^2$  (CNEC, 2004).

Segundo o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) da CNEC WorleyParsons Engenharia S.A., as principais características resultantes dos estudos e dimensionamentos hidráulicos são apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS UHE MAUÁ

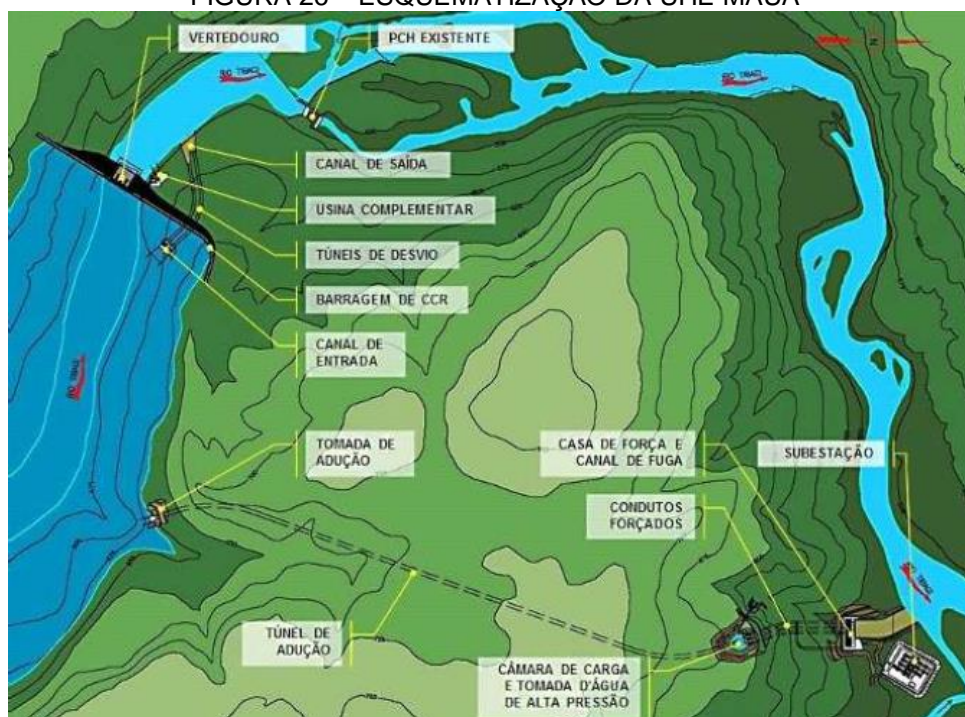
<b>Reservatório</b>	
Nível d'água máximo normal	642,5 m
Nível d'água máximo maximorum	643,9 m
Capacidade máxima (nível d'água máximo normal)	6.326 m <sup>3</sup> /s
Capacidade máxima (nível d'água máximo maximorum)	7.100 m <sup>3</sup> /s
<b>Nível d'água máximo maximorum de Jusante</b>	573 m
<b>Elevação da crista da soleira vertente</b>	625,5 m

FONTE: CNEC, 2004

A casa de força principal tem três unidades geradoras do tipo Francis (turbina hidráulica de reação com fluxo radial), com potência unitária de 123,3 MW, totalizando 370 MW de potência instalada. A subestação que interligará a UHE ao sistema de transmissão será do tipo convencional, na tensão de 230 kV, e ficará localizada a montante da casa de força (CNEC, 2004).

A FIGURA 26 apresenta a esquematização geral em planta da estrutura da UHE Mauá.

FIGURA 26 – ESQUEMATIZAÇÃO DA UHE MAUÁ



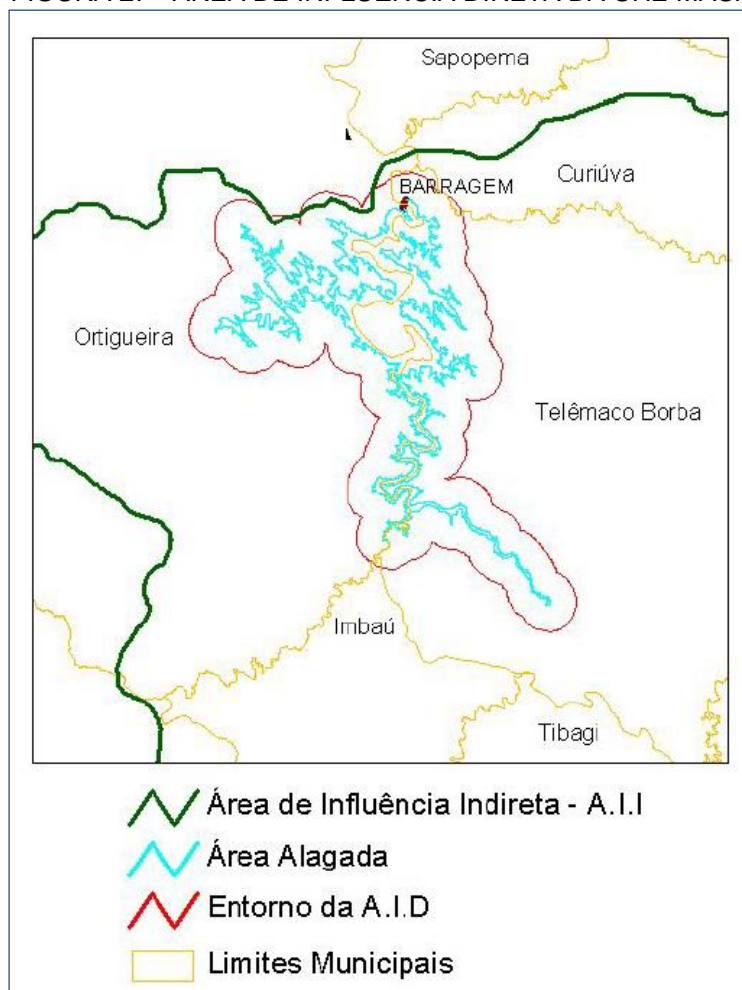
FONTE: WENDLER, 2010

### 2.4.3 Impacto Socioambiental

Conforme o RIMA da CNEC (2004), para o meio socioeconômico, a Área de Influência Indireta (AII) engloba os seguintes municípios da bacia hidrográfica do rio

Tibagi: Curiúva, Imbaú, Reserva, Tibagi e Ventania. Já a Área de Influência Direta (AID) abrange os municípios Ortigueira e Telêmaco Borba (FIGURA 27). Para o meio sócio econômico a AII tem como limites o primeiro afluyente significativo a jusante e os limites das sub-bacias de drenagem que compõe o rio Tibagi até a barragem.

FIGURA 27 - ÁREA DE INFLUÊNCIA DIRETA DA UHE MAUÁ



FONTE: ADAPTADO DE CNEC, 2004

Uma vez formado o reservatório da UHE Mauá, este afetará diretamente as áreas dos Municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba. A área necessária para sua formação, em relação à área total de cada município é apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 – ÁREAS MUNICIPAIS INUNDADAS

Municípios	Área Total do Município (ha)	Área de Reservatório no Município (ha)		Porcentagem de Área Afetada no Município (%)	
		No N.A. Máximo Normal	No N.A. Máximo Maximorum	No N.A. Máximo Normal	No N.A. Máximo Maximorum
Ortigueira (ME)	243.032	5.115	5.273	2,10	2,17
Telêmaco Borba	ME	12.000	289	0,24	0,27
	MD	110.823	4.526	3,68	3,75
	Subtotal	122.823	4.815	3,92	4,02
Total	365.855	9.930	10.210	2,71	2,79

OBS: ME – Margem esquerda, MD – Margem direita

FONTE: CNEC, 2004

A TABELA 3 apresentada uma quantificação das propriedades que serão afetadas pelo reservatório da UHE Mauá.

TABELA 3 – PROPRIEDADES AFETADAS

Municípios		Propriedades			
		Número		Área (ha)	
		Rural	Urbana	Rural	Urbana
Ortigueira (ME)		166	-	4.408	-
Telêmaco	ME	27	30	104	40
Borba	MD	1	-	3.498	-
Total		194	30	8.010	40

OBS: ME – Margem esquerda, MD – Margem direita

FONTE: CNEC, 2004

#### 2.4.4 Aspectos Ambientais

##### 2.4.4.1 Meio Físico

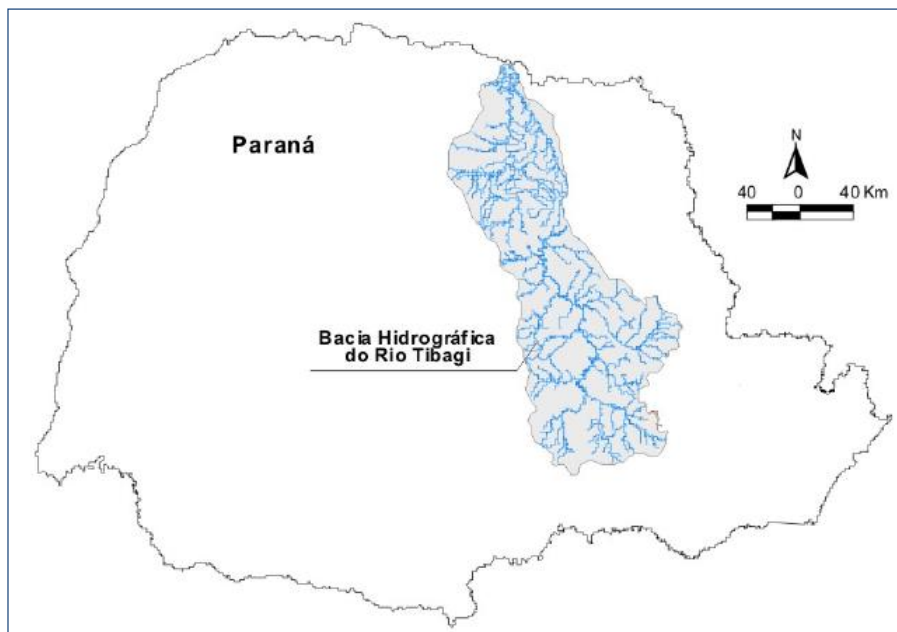
“O Rio Tibagi tem no reverso da Escarpa Devoniana as nascentes situadas nas altitudes mais elevadas do relevo e vem a percorrer aproximados 550 quilômetros até sua foz na margem esquerda do Rio Paranapanema.” (Martins, 2012).

Sua área de drenagem é de aproximadamente 24.712 m<sup>2</sup> e corresponde a 13% da superfície do estado do Paraná. O rio possui uma bacia hidrográfica bastante heterogênea nos aspectos geológicos (CNEC 2004). Esta se estende pelos três planaltos do estado, com predominância no Segundo Planalto, e integra parcialmente 41 municípios (Martins, 2012).



A Bacia (FIGURA 28) é limitada, em termos hidrográficos, pelas bacias do Rio Paranapanema ao norte, do Rio Pirapó a noroeste, do Rio Ivaí a oeste, do Rio Iguaçu ao sul e do Rio Ribeira a leste (CNEC, 2004).

FIGURA 28 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIBAGI



FONTE: ADAPTADO DE MARTINS, 2012.

#### 2.4.4.2 Geologia Local da UHE Mauá

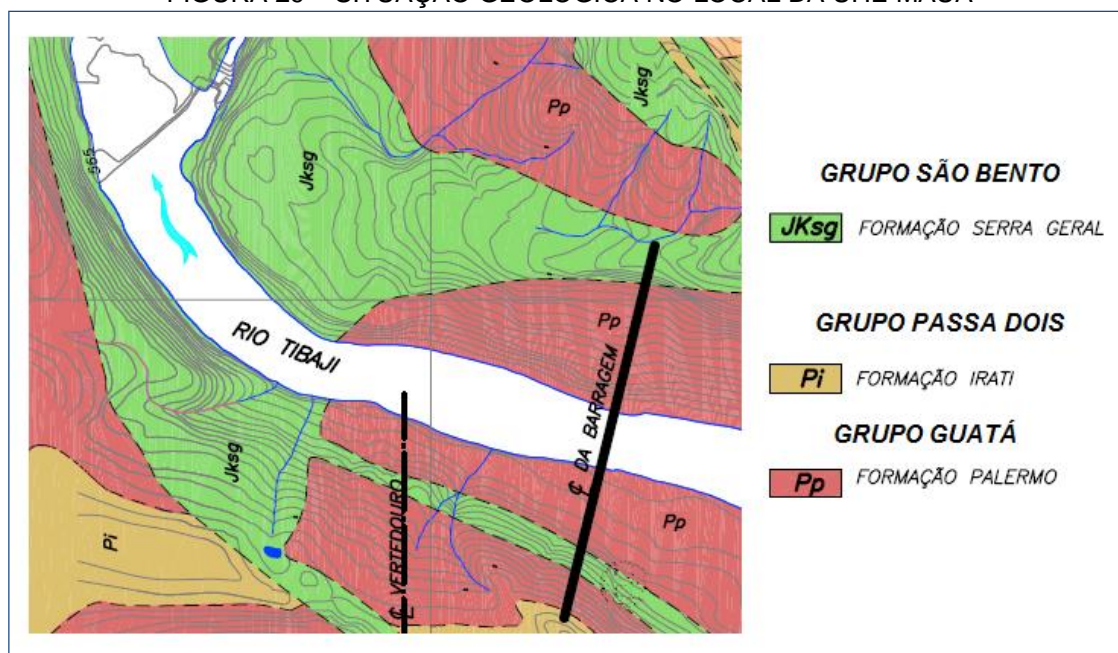
“A geologia local constitui-se de um empilhamento estratigráfico muitas vezes truncado pelas intrusões, tanto horizontais quanto verticais, do magma basáltico [...]” (CNEC, 2004).

As unidades estratigráficas que afloram na AID da UHE Mauá pertencem às formações Rio Bonito e Palermo (Grupo Guatá), Irati e Serra Alta (Grupo Passa Dois) e Serra Geral (Grupo São Bento).

A Formação Rio Bonito é caracterizada pela alternância de bancos de arenitos finos, siltitos e margas. Já a Formação Palermo é distinguida por pacotes de arenitos e arenito-sílticos cinza esverdeados e esbranquiçados, e constitui as escarpas da região da fundação do barramento e da implantação da tomada d’água e de grande parte do túnel de adução. Por sua vez, a Formação Irati é distinguida pela existência de argilitos cinza escuros e folhelhos. A Formação Serra Alta é caracterizada por siltitos cinza, maciços e com fraturas conchoidais. Finalmente, a Formação Serra Geral é representada por diques e soleiras (sills) de diabásio (CNEC, 2004).

A situação geológica do local da UHE Mauá é apresentada na FIGURA 29.

FIGURA 29 – SITUAÇÃO GEOLÓGICA NO LOCAL DA UHE MAUÁ



FONTE: ADAPTADO DE CNEC, 2004

## 2.5 Estado da arte

Boehler et al. (2001) estudaram o potencial de LST para levantamento de patrimônios culturais, utilizando um laser scanner que funciona pelo método da triangulação, apresentando os resultados do levantamento e as várias complexidades encontradas. Os autores concluem que o laser scanner é um novo método valioso para o levantamento de patrimônios culturais, e que pode substituir alguns métodos existentes.

Gordon, Lichti e Stewart (2001) efetuaram experimentos utilizando LST de alta resolução para o monitoramento de deformações. O trabalho se inicia com estudos sobre a calibração do instrumento, seguido de análises sobre a detecção de deformações. Isto foi realizado através do levantamento de um prédio em diferentes épocas: duas iniciais para controle, onde o LST estava fixo; e três finais, onde foram feitas induções de deslocamento no sentido vertical no LST em cada uma das ocasiões. A avaliação dos resultados obtidos demonstrou movimentações na mesma magnitude dos deslocamentos induzidos ao LST no sentido vertical, e um erro

sistemático no sentido horizontal provavelmente ocasionado pela não verticalidade do instrumento.

Gordon *et al* (2004) realizaram um estudo avaliando a utilização de LST na mensuração de deformações de estruturas e investigando seu potencial na metrologia em tarefas com observações remotas. Três experimentos foram efetuados onde, em cada um, uma carga controlada foi induzida à estrutura. Durante cada teste o LST foi utilizado para fazer levantamentos em determinados intervalos de tempo, com o intuito de avaliar a sensibilidade do LST na mensuração de deformações verticais, através da comparação dos dados obtidos e referencias fotogramétricas. Como resultados concluíram que as vantagens do uso do LST são a representação total da estrutura e um conjunto geométrico único que não possui uma dimensão inerentemente fraca, que ocorre com a fotogrametria.

Granemann (2005) estudou o estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas na usina hidrelétrica de Salto Caxias, com a aplicação de diferentes técnicas de levantamento: triangulações, trilaterações, nivelamento geométrico de 1ª ordem e rastreamento GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Assim, foi estabelecida uma rede com seis pontos de controle com coordenadas definidas em épocas distintas, aplicando ajustamento pelo método de Variação de Coordenadas e teste de *Data Snooping* aos dados coletados.

Martini (2005) analisou a calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva e de acrílico, e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas. Os estudos foram realizados em laboratórios da UFPR e a avaliação do uso de tais prismas foi realizada na usina hidrelétrica de Salto Caxias.

Roderik Lindenbergh, Norbert Pfeifer e Tahir Rabbani (2005) efetuaram uma análise da acurácia de um LST e a viabilidade de sua aplicação em monitoramentos de deformação de túneis. A acurácia foi testada em relação ao alcance e ângulo de incidência do instrumento, e a combinação dos dados de diferentes posições do scanner resultou em erros sistemáticos de 2mm e desvio padrão menor que 6mm. Das análises quanto à viabilidade para monitoramento, realizadas utilizando a segmentação dos dados obtidos com LST para a escolha dos pontos mais adequados ao estudo, concluíram que é possível prever a densidade de mensuração em um determinado alcance, unir dados de diferentes épocas e posições do LST em método de análise de deformação, e que para alcançar o máximo benefício da alta



redundância da altimetria do LST o método de análise de deformação deve ser baseado em modelos de superfícies suavizadas.

Zocolotti Filho (2005) analisou a utilização de técnicas de poligonização de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção na usina hidrelétrica de Salto Caxias, objetivando desenvolver uma metodologia para tal monitoramento, bem como o desenvolvimento instrumental voltado para esta aplicação.

Alba *et al.* (2006) realizaram uma experiência de levantamento com LST em uma barragem de grande porte localizada em Alta Valtellina (Itália) no lago Cancano. O projeto teve por finalidade gerar um modelo 3D para servir como base geométrica para o modelamento de elementos finitos do comportamento estático e dinâmico da estrutura, e também obter subprodutos como mapas planimétricos, seções transversais e ortoprojeções.

Van Gosliga, Lindenberg e Pfeifer (2006) executaram uma análise de deformação em um túnel utilizando o LST. Primeiramente o modelo tridimensional do túnel é ajustado as nuvens de ponto resultantes dos diversos levantamentos com LST, utilizando uma aproximação linear iterativa por mínimos quadrados, resultando em valores aproximados para o modelo do túnel. Com isso, foram determinadas as deformações em relação a esse modelo do túnel, ou entre épocas, através de testes estatísticos. Os resultados demonstraram que o túnel não é oval como um todo, como seria o esperado, mas sim que os segmentos do túnel mostram diferentes padrões de desvio.

Nadal (2008) avaliou o controle e operação de estações totais robotizadas voltado à auscultação geodésica, apresentando conceitos de transmissão de dados e o desenvolvimento de programas que permitem o envio e recebimento de dados entre a estação total robotizada e o computador. Para tal diversas interfaces de comunicação foram testadas. O foco principal da pesquisa foi o desenvolvimento de um software que permita o controle de uma estação total.

Neves (2008) estudou o monitoramento de estruturas com finalidade de determinar se existem deslocamentos de pontos localizados em blocos da barragem da usina hidrelétrica de Salto Caxias, utilizando uma rede geodésica composta de quatro pilares com sistema de centragem forçada. Observações em diferentes épocas foram realizadas, e a elas métodos de ajustamento foram aplicados. O autor conclui

que não houve deslocamentos significativos ao longo do tempo nos blocos que formam a barragem.

Van Genechten *et al.* (2008) publicaram um material para treinamento sobre LST baseado em aplicações práticas, preparado pelo projeto “*Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness*”. O conteúdo é baseado em experiências práticas e pesquisas científicas sobre a aplicação de LST para o levantamento de feições. Além da apresentação dos princípios e das práticas do LST, também abordaram a gestão de dados e três importantes estudos de caso da aplicação do LST: patrimônios culturais, indústrias e infraestrutura civil (monitoramento de deformações de uma usina de hidrelétrica).

Boavida *et al.* (2009) apresentam estudos sobre monitoramento de barragens utilizando sistemas de imageamento terrestre combinados. Os equipamentos utilizados nos levantamentos foram um LST em conjunto a uma câmera digital fotogramétrica. As metodologias aplicadas vêm sendo desenvolvidas desde o ano de 2003, com foco no monitoramento posicional para barragens de aterro e na inspeção visual assistida para barragens de concreto. O projeto apresenta três estudos de caso das metodologias desenvolvidas: dois sobre barragens de concreto (Alta Ceira, Portugal, e Cahora Bassa, Moçambique) e um sobre barragem de aterro (Lapão, Portugal).

Van Genechten *et al.* (2009) estudaram a utilização do LST em análises de deformação em patrimônios culturais. O trabalho engloba o escaneamento com LST, em diferentes épocas, de um arco de alvenaria passando por deformação artificial. Com isso foram feitos testes sobre a influência de diferentes resoluções de escaneamento na acurácia do instrumento, e sobre a detectabilidade de deformações na estrutura. Segundo o autor os principais fatores que influenciam a acurácia dos resultados são a configuração da campanha e a resolução adequada do LST.

### 3 MATERIAIS

Neste capítulo serão exibidos os materiais utilizados no levantamento de campo realizado na barragem de Mauá, descrevendo suas principais características e especificações.

#### 3.1 Laser Scanner Terrestre

As principais características que influenciaram para a escolha do equipamento LST foram o alcance máximo de varredura e a acurácia na mensuração. Estes dois fatores são importantes visto que as dimensões da estrutura a ser levantada inviabilizam a utilização de LST de curto alcance, uma vez que em alguns pontos a distância entre o instrumento e o alvo pode chegar a mais de 150 metros, e a proposta de realização de um monitoramento da barragem gera a necessidade de levantamento de pontos com a máxima acurácia.

Tendo esses atributos essenciais em mente foi realizada uma pesquisa sobre qual LST poderia ser empregado na realização do levantamento, e dentro dos equipamentos disponíveis foi selecionado a ScanStation C10 (FIGURA 30) da marca Leica, locado através da empresa Manfra localizada na cidade de Curitiba.

FIGURA 30 – SCANSTATION C10



FONTE: LEICA GEOSYSTEMS. **Leica ScanStation C10 User Manual**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>. Acesso em: 08 abr. 2012.

A ScanStation C10 é um laser scanner terrestre da classe dos scanners panorâmicos, com compensação biaxial, alta velocidade de escaneamento e câmera

digital de alta resolução acoplada. É um dos mais novos LST disponíveis no mercado e é o único equipamento deste tipo que possui interface de estação total, simplificando sua utilização.

Além de feições de estação total este equipamento também possibilita a construção de poligonais em campo, recurso que é utilizado para referenciar os diferentes pontos de escaneamento, que simplifica o procedimento e aumenta a precisão na junção das diferentes nuvens de pontos realizadas. Este processo também pode ser realizado através da utilização de alvos ou por métodos de georreferenciamento.

As principais características da ScanStation são apresentada na TABELA 4.

TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES SCANSTATION C10

<b>Acurácia de uma única medida (1-50m)</b>	
Posição	6 mm
Distância	4 mm
Ângulo (horizontal/vertical)	60 $\mu$ rad / 60 $\mu$ rad (12"/12")
<b>Precisão da superfície modelada</b>	2 mm
<b>Aquisição de alvos</b>	2 mm desvio padrão
<b>Compensador Biaxial</b>	
Resolução	1"
Dynamic Range	(+/-) 5'
Acurácia	1,5"
<b>Tipo de laser</b>	Pulso
<b>Cor do laser</b>	Verde (visível)
<b>Classe do laser</b>	3R (IEC 60825-1)
<b>Alcance com 90% de reflexão</b>	300 m
<b>Alcance com 18% reflexão</b>	134 m
<b>Taxa de escaneamento</b>	50.000 pontos/segundo
<b>Resolução de escaneamento</b>	
Tamanho do feixe	De 0 a 50 m: 4,5 mm (FWHH) 7 mm (Gaussian)
Espaçamento de pontos	Totalmente selecionável (h/v) Mínimo de 1 mm
<b>Campo de visão</b>	
Horizontal	360° (máximo)
Vertical	270° (máximo)

FONTE: LEICA GEOSYSTEMS. **Leica ScanStation C10 User Manual**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>. Acesso em: 08 abr. 2012.

### 3.2 Estação Total

Segundo o planejamento realizado previamente aos trabalhos de campo, a utilização de uma estação total é necessária para o levantamento dos pontos ocupados pelo LST. Assim, tais pontos terão coordenadas conhecidas facilitando o processo de junção de nuvem de pontos.

Durante os levantamentos foi utilizada uma estação total robotizada pertencente a UFPR, a estação TCRA1205 (FIGURA 31) da marca Leica, com precisão angular de  $\pm 5''$  e precisão linear de  $\pm 2\text{mm} + 2\text{ppm}$ .

FIGURA 31 – TCRA1205



FONTE: LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TPS 1200+ User Manual**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>. Acesso em: 08 abr. 2012

### 3.3 Materiais Complementares

Também foram utilizados os seguintes materiais para a realização da pesquisa:

- 01 prisma refletor para estação total;
- 01 alvo para LST;
- 01 bipé;
- 01 haste estendível;
- 01 trena
- 01 estação meteorológica

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo abordará os métodos utilizados no levantamento de campo realizado na barragem de Mauá, descrevendo o pré-planejamento, o processo de reconhecimento da área, o planejamento de pontos para os levantamentos em ambas as épocas, assim como sua execução, o processamento dos dados coletados em campo e as metodologias dos softwares utilizados.

### 4.1 Pré-Planejamento

O primeiro planejamento foi realizado antes da primeira viagem do autor ao local de estudo. Foi definido o levantamento com laser scanner terrestre da face jusante da barragem. Tal monitoramento seria realizado em duas épocas distintas, meses de abril e novembro de 2012, anterior e posteriormente à formação do reservatório da UHE respectivamente, com intuito de comparar os resultados obtidos entre as duas campanhas para avaliar a utilização de um LST no monitoramento de barragens.

### 4.2 Reconhecimento da área

O reconhecimento da área foi realizado no início do mês de abril de 2012 juntamente aos pesquisadores da UFPR vinculados à pesquisa e a dois integrantes da equipe da empresa Manfra, Bruno Damas e Renata Brasil, incumbidos da entrega do equipamento LST e de acompanhar os levantamentos que seriam desenvolvidos. A área de interesse, à jusante da barragem, é ilustrada na FIGURA 32.

FIGURA 32 – JUSANTE DA BARRAGEM DA UHE MAUÁ



FONTE: O AUTOR

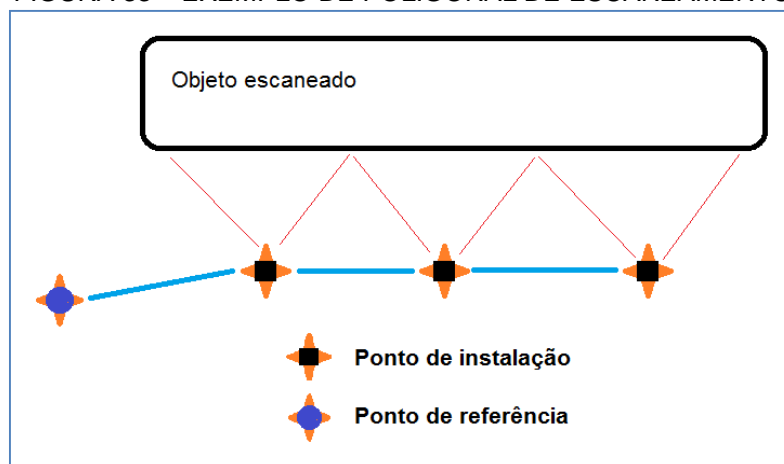
### **4.3 Planejamento de pontos da primeira época (anterior a formação do reservatório)**

Após o reconhecimento da área foram decididos os locais onde o estacionamento do LST permitiria o máximo recobrimento de dados para o levantamento. Devido à topografia ao redor da barragem e à existência de construções próximas a estrutura, foram encontradas algumas limitações para a utilização do LST. Assim, foram escolhidos locais próximos à barragem e por toda sua extensão, tendo em mente as especificações do instrumento.

Segundo a metodologia de funcionamento do LST cada escaneamento necessita de uma referência para definir sua posição no espaço e garantir a junção das nuvens de pontos que são geradas. Isto pode ser realizado através da utilização de alvos bem definidos instalados na área de interesse do levantamento. Assim, a união entre diferentes escaneamentos é efetuada pelo reconhecimento dos alvos homólogos nas cenas. Porém as dimensões da estrutura a ser levantada e a distância que o LST seria instalado inviabilizaria a utilização de alvos na estrutura. Assim um método alternativo para a união seria necessário, a saber.

A ScanStation C10, além do procedimento citado anteriormente, apresenta outra metodologia para o referenciamento e união das nuvens de pontos. Operando similarmente a uma estação total, este LST permite a criação de uma poligonal topográfica utilizando os pontos onde será instalado para o escaneamento. Em cada um desses pontos o LST permite o levantamento da direção horizontal, do ângulo vertical, e da distância de dois pontos de referência: um ponto de ré, para fixar a direção de escaneamento no plano horizontal, e um ponto de vante, que será o próximo ponto de instalação caso queira-se continuar o escaneamento. Se todos os pontos de posicionamento do LST forem separados de uma distância inferior a 100m, cada um deles pode servir de referência (ré) para o próximo ponto, gerando assim uma poligonal de escaneamento (FIGURA 33). As coordenadas dos pontos, da poligonal e da nuvem do escaneamento, serão calculadas com base nas coordenadas do primeiro ponto de instalação, que podem ser levantadas com a utilização de estação total ou GNSS.

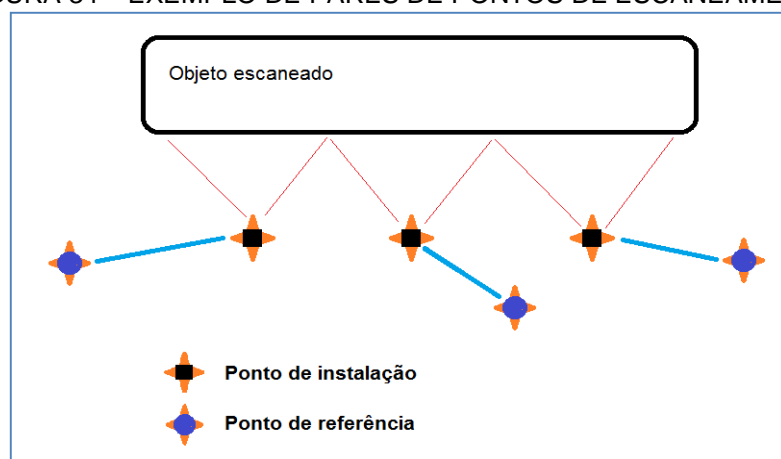
FIGURA 33 – EXEMPLO DE POLIGONAL DE ESCANEAMENTO



FONTE: O AUTOR

Caso os pontos utilizados para os escaneamentos estejam espaçados com mais de 100m de distância faz-se necessária a definição de um ponto de ré a cada instalação, gerando um conjunto de distintos pares de pontos. Nesta hipótese cada par terá como referência as coordenadas de seu ponto de instalação, resultando em escaneamentos desvinculados (FIGURA 34). O referenciamento de todos os pares de pontos a um só sistema de coordenadas pode ser feito através de um levantamento utilizando estação total ou GNSS, definindo as coordenadas de cada ponto existente.

FIGURA 34 – EXEMPLO DE PARES DE PONTOS DE ESCANEAMENTO



FONTE: O AUTOR

Uma vez que todos os pontos utilizados no levantamento com LST tiverem coordenadas referenciadas a um só sistema, independentemente se constituem uma só poligonal, poligonais separadas, ou um conjunto de pares de pontos, a união entre as nuvens de pontos pode então ser realizada em um *software* computacional.



Levando em consideração essa metodologia para referenciamento e união de escaneamentos; a necessidade de que os pontos pudessem ser levantados com estação total posteriormente; a estrutura da barragem a ser levantada; e as características topográficas da área em questão, foi planejada a execução de um conjunto de pares de pontos, constituindo oito pontos para a instalação do equipamento e 8 pontos de referência, totalizando 16 pontos planejados, localizados em diferentes áreas a jusante da estrutura.

Um dos pontos de estacionamento do LST foi planejado em um pilar (PGG01) de concreto localizado na própria barragem, cujas coordenadas são conhecidas devido a levantamentos GNSS realizados para outras pesquisas da UFPR.

A FIGURA 35 apresenta as áreas de maior interesse para a localização de pontos.

FIGURA 35 – IMAGEM AÉREA COM ÁREAS DE INTERESSE PARA PONTOS DE ESCANEAMENTO DA PRIMEIRA ÉPOCA



○ área de interesse para pontos

FONTE: O AUTOR

#### 4.4 Levantamento com LST da primeira época

O levantamento dos pontos foi realizado no mesmo dia do reconhecimento, respeitando os locais planejados, com o acompanhamento da equipe da empresa Manfra. Foram feitos oito escaneamentos da parte jusante da barragem, tentando desta forma garantir a sobreposição de dados e a máxima cobertura da estrutura.

A cada ponto onde o LST foi estacionado realizou-se o levantamento total da área em torno do equipamento ( $360^\circ$  horizontal e  $270^\circ$  vertical), com aproximadamente 30 minutos de levantamento, garantindo a varredura de pontos não apenas da estrutura, mas também do relevo do solo e outras feições presentes na área de abrangência do LST. Além disso, também foi levantado, a cada estacionamento do instrumento, o ponto de ré necessário para o seu referenciamento.

Diferente do planejado foi apenas necessária a definição de seis pontos de referência para os pontos de estacionamento do instrumento, visto que alguns pontos utilizaram a mesma referência de outros, totalizando assim 14 pontos definidos em campo. Todos os pontos foram demarcados com a utilização de piquetes ou de feições reconhecíveis no campo para o levantamento das coordenadas com estação total, porém apenas o ponto definido no pilar de concreto localizado na barragem (PGG01) teve uma materialização adequada. A FIGURA 36 apresenta a localização aproximada dos 8 pontos escolhidos para o levantamento com o LST.

FIGURA 36 – LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DOS PONTOS DO LEVANTAMENTO LST

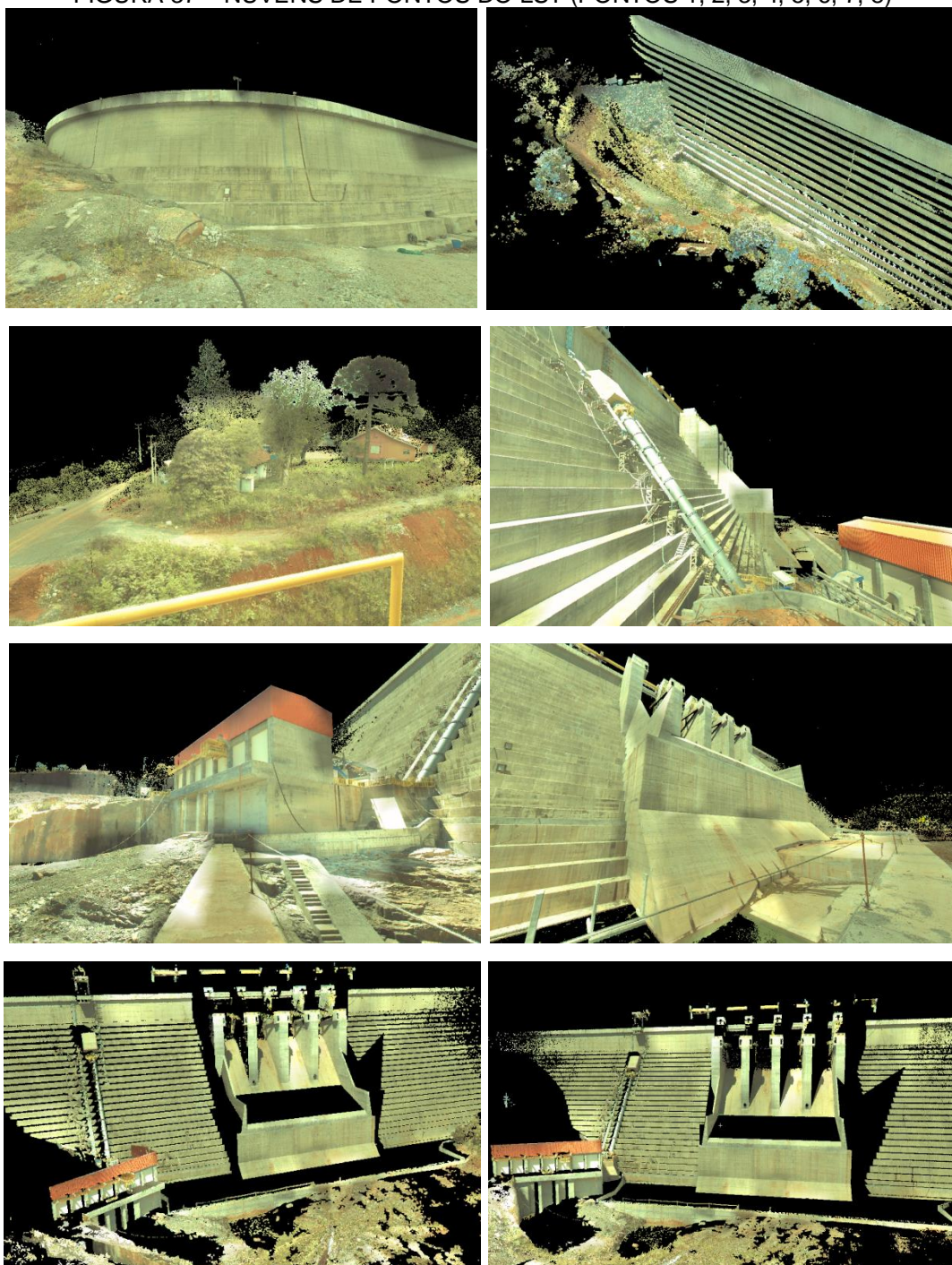


FONTE: O AUTOR

O levantamento com LST resultou nas nuvens de pontos apresentadas na FIGURA 37, respectivamente na ordem de coleta de dados.



FIGURA 37 – NUUVENS DE PONTOS DO LST (PONTOS 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)



FONTE: O AUTOR

#### 4.5 Levantamento com Estação Total Robotizada da primeira época

O levantamento com estação total robotizada possibilita a determinação de coordenadas topográficas, em um único sistema de referência, para todos os pontos de instalação utilizados do levantamento com LST. Assim, com a utilização dessas coordenadas nos softwares de processamento de dados do LST, a união das nuvens de pontos pode ser efetuada.

A técnica de levantamento utilizada foi a de irradiações, que consiste na mensuração de ângulos e distância a partir de uma linha de referência conhecida. A estação total fica estacionada sobre um ponto e efetua-se o levantamento dos demais pontos de interesse.

O ponto de estacionamento do instrumento escolhido foi o pilar geodésico (PGG01) de monitoramento, dotado de sistema de centragem forçada, situado à jusante da barragem, o mesmo ponto utilizado para estacionar o LST em uma de suas varreduras. O pilar tem coordenadas conhecidas definidas por levantamentos GNSS realizados pela UFPR. Como referência (ré) foi levantado um ponto em outro pilar geodésico de monitoramento (P03), também localizado a jusante da barragem e também com coordenadas conhecidas, que define a orientação do sistema de coordenadas tridimensionais utilizado nos levantamentos com estação e LST. Assim, o eixo Y fica orientado na direção do pilar P03, eixo X a  $90^\circ$  no sentido horário do eixo Y, e eixo Z direcionado ao zênite de maneira a formar um sistema dextrogiro (FIGURA 38).

FIGURA 38 – SISTEMA DE COORDENADAS DO LEVANTAMENTO COM ESTAÇÃO TOTAL

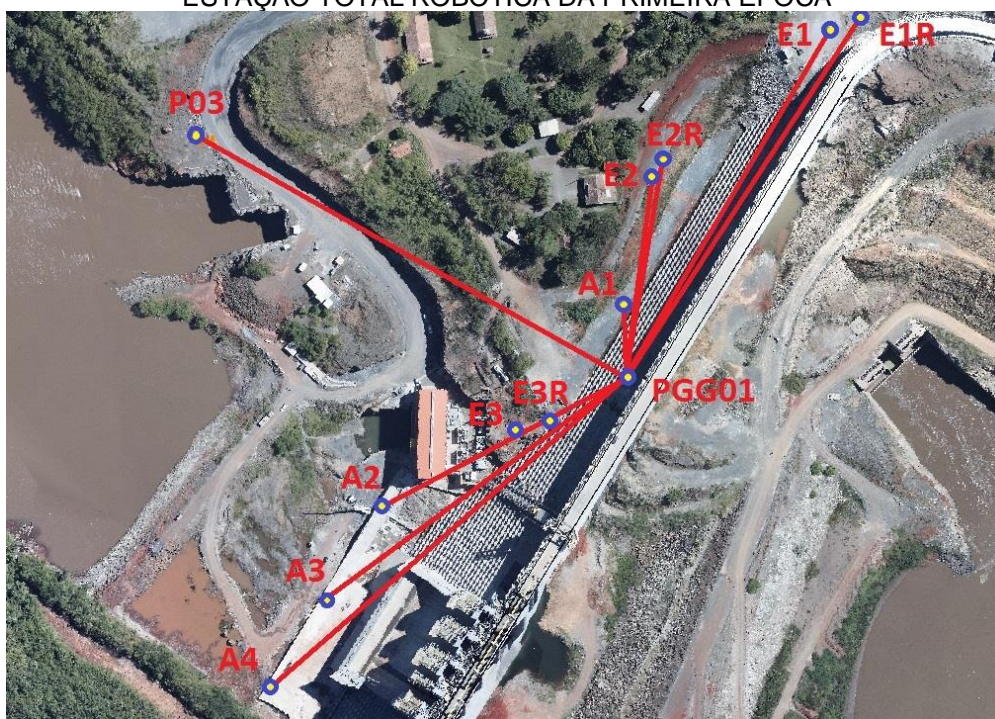


FONTE: O AUTOR



Foram realizadas três séries de medições, com posição direta e inversa da luneta, para cada ponto utilizado no levantamento com LST. Este procedimento possibilita o levantamento de mais observações para cada ponto e também permite eliminar o erro de verticalidade das observações. O levantamento efetuado é representado na FIGURA 39.

FIGURA 39 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS EMPREGADOS NO LEVANTAMENTO COM ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA DA PRIMEIRA ÉPOCA



FONTE: O AUTOR

A nomenclatura dos pontos representados na FIGURA 39 é explanada posteriormente no item 5.7.

#### **4.6 Planejamento de pontos da segunda época (posterior à formação do reservatório)**

O planejamento dos pontos a serem utilizados nos levantamentos da segunda época da pesquisa foi discutido desde o fim dos trabalhos da primeira época, levando em consideração todos os aspectos já abordados nesta etapa inicial (metodologia de funcionamento dos equipamentos empregados e aspectos da região da barragem). Inicialmente foi decidida a utilização das mesmas áreas de interesse do primeiro planejamento (FIGURA 35) para tentar manter as condições de trabalho e garantir a

comparação de escaneamentos feitos a partir de posicionamentos similares entre os levantamentos com LST. Porém a abertura das comportas da barragem, devido à formação do reservatório, impediu o acesso a alguns dos pontos utilizados na primeira época. Portanto, a área da barragem a ser levantada foi reduzida, tendo como limite o início da estrutura dos vertedouros.

Devido a esse fato foi determinada a realização de mais instalações do LST em novas áreas, visando uma cobertura maior entre as áreas de interesse definidas na primeira época, para representar de forma mais acurada a estrutura da barragem (FIGURA 40). Ao todo foram planejados seis pontos para instalação do instrumento. Quatro destes poderiam ser parte de uma única poligonal, dado o espaçamento que os separariam (menor que 100m) e dois teriam de ter pontos de referência próprios. Assim foram definidas uma poligonal, composta de quatro pontos de instalação e um ponto de ré, e dois pares de pontos, compostos por um ponto de instalação e um ponto de referência, totalizando nove pontos planejados dispostos nas áreas utilizadas previamente na primeira época e nas novas áreas definidas.

FIGURA 40 - IMAGEM AÉREA COM ÁREAS DE INTERESSE PARA PONTOS DE ESCANEAMENTO DA SEGUNDA ÉPOCA



- Áreas de interesse para pontos da primeira época
- Áreas de interesse para novos pontos na segunda época

FONTE: O AUTOR

#### 4.7 Levantamento com LST da segunda época

O levantamento com LST da segunda época foi realizado em novembro de 2012 seguindo o planejamento prévio, porém definindo apenas oito pontos em campo, seis pontos de instalação do LST e dois pontos de referência (ré) (FIGURA 41). Todo levantamento foi acompanhado por dois membros da empresa Manfra, Brayam C. S. dos Santos e Orismar N. dos Santos, incumbidos da operação do equipamento locado para os trabalhos da segunda época.

FIGURA 41 – LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DO LST DO LEVANTAMENTO DA SEGUNDA ÉPOCA



FONTE: O AUTOR

Como definido no planejamento procurou-se manter as condições do levantamento em ambas as épocas, assim os pontos empregados para instalação do equipamento na primeira época que estavam na nova área definida foram reutilizados na segunda época. Dos pontos da poligonal realizada em campo, três eram pontos da época inicial, um de referência e dois pontos de instalação. Dos demais pontos definidos apenas um pertencia à primeira época. Os novos pontos foram escolhidos para dar continuidade a poligonal e para ampliar recobrimento da área escaneada. Novamente, a cada ponto onde o LST foi estacionado realizou-se o levantamento total da área em torno do equipamento (360° horizontal e 270° vertical) com aproximadamente 30 minutos de escaneamento.



Essa condição de reocupações induziu a nomenclatura utilizada para os pontos nessa pesquisa, assim os pontos reocupados foram nomeados com o prefixo E, e os pontos únicos de cada campanha com o prefixo A. Os pontos de referência (ré) possuem a mesma nomenclatura dos pontos de instalação do equipamento com a adição do sufixo R. Para as poligonais apenas o primeiro ponto de ré possui nomenclatura própria, visto que os demais pontos de referência são os pontos de instalação do equipamento.

O levantamento total da estrutura realizado na segunda época é apresentado na FIGURA 42.

FIGURA 42 – LEVANTAMENTO DA BARRAGEM REALIZADO NA SEGUNDA ÉPOCA



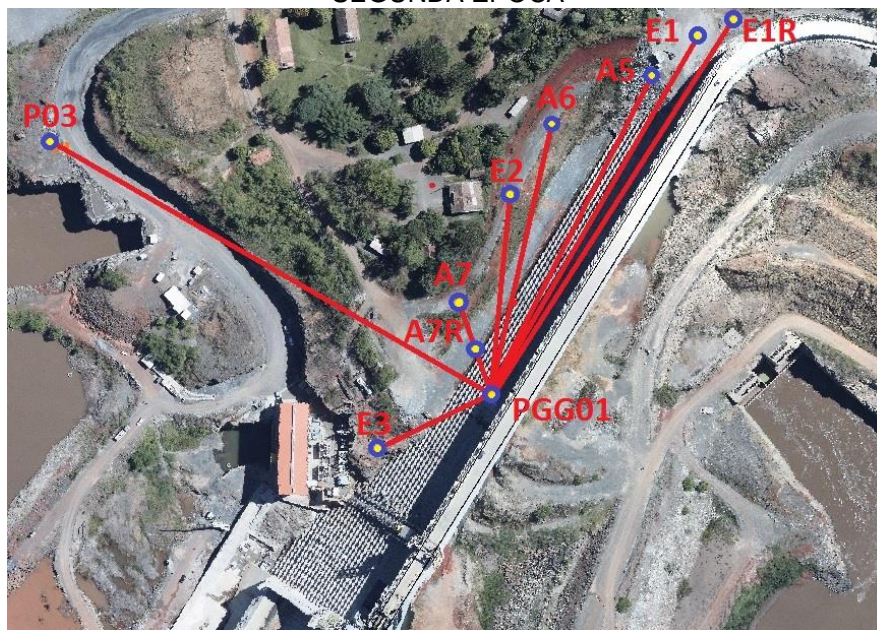
FONTE: O AUTOR

#### 4.8 Levantamento com Estação Total Robotizada da segunda época

Como com o LST, no levantamento com estação total robotizada procurou-se a manutenção das condições de trabalho da época inicial, empregando a mesma técnica utilizada previamente (irradiações), o mesmo ponto de instalação (pilar geodésico PGG01) e o mesmo ponto de ré (pilar geodésico P03). Todos os pontos utilizados para o escaneamento com LST puderam ser levantados sem complicações e são representados na FIGURA 43.



FIGURA 43 – REPRESENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO COM ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA DA SEGUNDA ÉPOCA



FONTE: O AUTOR

## 4.9 Processamento de Dados

### 4.9.1 Estação Total Robotizada

O processamento dos dados oriundos dos levantamentos com estação total robotizada, tanto para primeira e segunda época da pesquisa, constitui a etapa inicial para a integração com os dados dos levantamentos com LST, possibilitando posteriormente a união de nuvens e comparação entre os levantamentos das diferentes épocas. Tal processamento foi realizado com o software Posição da empresa Manfra com licença cedida gratuitamente para a UFPR. Visto que as coordenadas obtidas com GNSS não modificariam o resultado dos modelos gerados, optou-se pela utilização de coordenadas topográficas para o processamento.

Ambos levantamentos realizados tiveram resultados coerentes às especificações do equipamento, garantindo a confiabilidade na acurácia dos dados gerados.

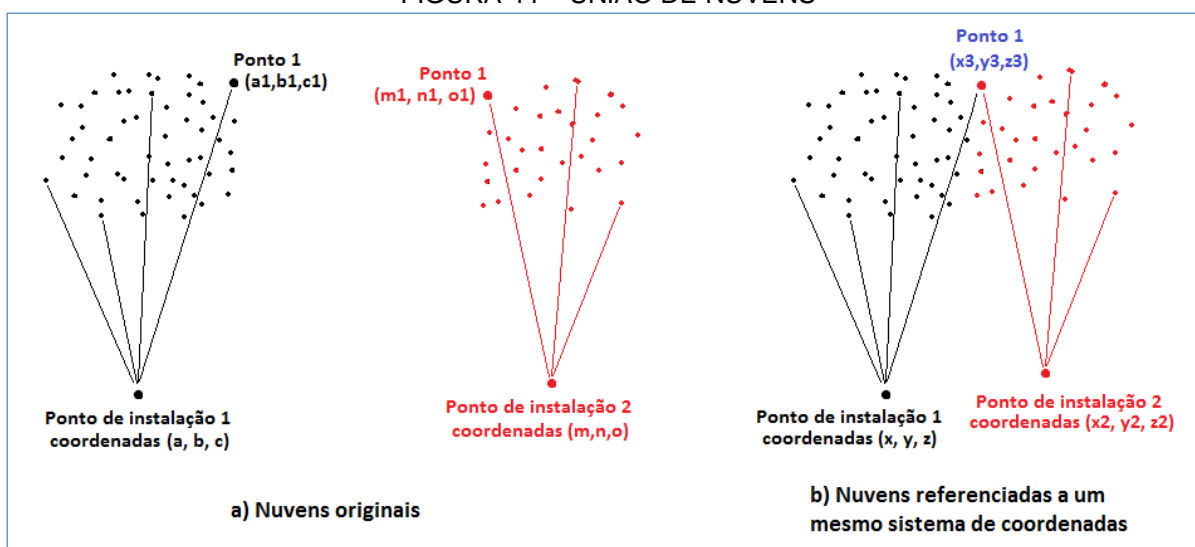
#### 4.9.2 Laser Scanner Terrestre

Tendo em mente o tema proposto para o presente trabalho, a comparação de levantamentos LST com o intuito de averiguar sua potencialidade para o monitoramento de barragens, o processamento das nuvens de pontos geradas no levantamento LST é fundamental na geração dos resultados. Assim, todas as etapas de processamento foram realizadas inicialmente com o acompanhamento de membros da empresa Manfra, como forma de treinamento para o autor sobre o funcionamento dos software. Uma vez compreendidos os procedimentos a ser efetuados, todo o processamento foi refeito um número de vezes para observar se haveria repetibilidade e coerência nos resultados. Todos os procedimentos realizados são descritos a seguir.

A primeira etapa do processamento dos dados de LST foi a importação das nuvens de pontos levantados em campo de ambas as épocas no Cyclone, com licença demonstrativa cedida pela empresa Leica à UFPR. Com isso já se torna possível a visualização das nuvens de cada ponto de instalação do equipamento separadamente. Isso permite observar o resultado do levantamento de campo e quaisquer possíveis problemas nas nuvens.

Tendo todos os pontos carregados no aplicativo passa-se para a integração dos dados do LST com os da estação total robotizada. Assim, as coordenadas obtidas no levantamento com estação total são importadas para o Cyclone e atribuídas aos pontos de instalação do levantamento com LST. Isto é realizado para todos os pontos de instalação do instrumento, tanto de poligonais ou de instalações separadas, garantindo seu referenciamento a um único sistema de coordenadas. Os pontos das nuvens escaneadas estão relacionados com seus respectivos pontos de instalação do instrumento durante o levantamento, assim ao alterar a coordenada do ponto de instalação o software transforma as coordenadas de todos os pontos levantados. Dessa maneira todas as nuvens de pontos passam a estar no mesmo sistema de referência (FIGURA 44), e pode-se então utiliza-las separadamente e/ou realizar sua união através da importação de todas as nuvens para um mesmo arquivo.

FIGURA 44 – UNIÃO DE NUVENS



FONTE: O AUTOR

A primeira opção para a utilização das nuvens foi a comparação dos escaneamentos realizados a partir de pontos de estacionamento iguais em ambas as épocas dos levantamentos com LST, analisando cada par de nuvens separadamente. A outra opção foi a comparação entre o escaneamento a partir de um ponto de instalação de uma época e a nuvem da estrutura total da barragem resultante de todos os escaneamentos da época distinta, avaliando a sobreposição de dados proporcionada pela disposição dos pontos de levantamento em campo. Um terceiro método de comparação também foi avaliado, a comparação das nuvens dos escaneamentos de toda estrutura em ambas as épocas, com o intuito de avaliar toda a estrutura levantada.

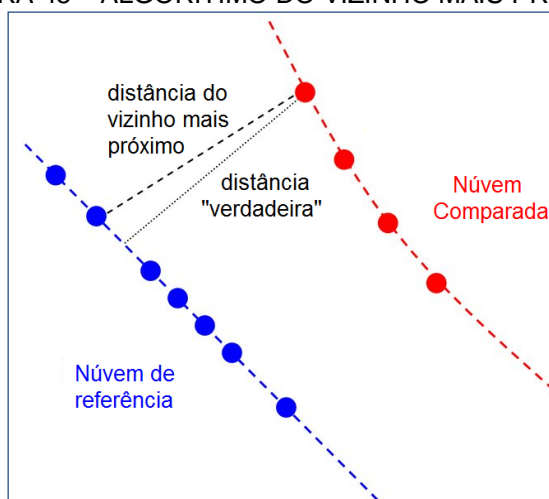
Todas as análises de comparações realizadas nesta pesquisa, que compõe a segunda etapa do processamento de dados do LST, foram realizadas nos softwares 3DReshaper com licença demonstrativa cedida a UFPR pela empresa Technodigit e no software CloudCompare disponível gratuitamente na internet (<http://www.danielgm.net/cc/>). A principal diferença entre o funcionamento destes programas é o método de comparação utilizado, apresentado a seguir.

## 4.10 Métodos de comparação de dados LST

### 4.10.1 Software CloudCompare

O CloudCompare é um software livre que permite a comparação direta de nuvem com nuvem (*cloud to cloud*), utilizando como padrão o cálculo de distancias entre pontos pelo algoritmo do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*). Para cada ponto da nuvem a ser comparada, o software busca o ponto mais próximo na nuvem de referência e calcula a distância (euclidiana) entre eles (FIGURA 45).

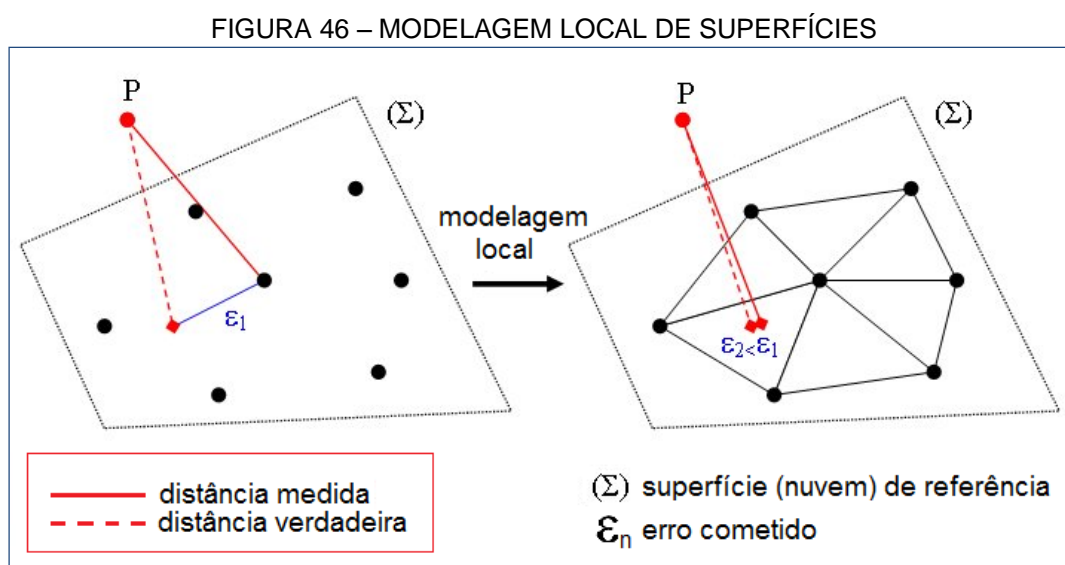
FIGURA 45 – ALGORÍTIMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO



FONTE: Adaptado de (CLOUD Compare. Distances computation. Disponível em: [http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances\\_Computation](http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances_Computation). Acesso em: 10 abr. 2012.

Segundo o site Cloud Compare, os resultados desse método estão diretamente ligados ao espaçamento de pontos da nuvem, assim quanto maior a proximidade entre pontos maior a precisão do método. Caso não seja possível a utilização desse método, o procedimento ideal seria a comparação de uma nuvem com um malha (modelo, *mesh*) que represente precisamente a superfície, um método também oferecido pelo programa. Porém nem sempre se pode obter um tal modelo, neste *software* em questão não existe a possibilidade de sua criação, e mesmo tendo a opção de importar um modelo criado em outro *software* a precisão que essa malha foi criada pode influenciar no processo de comparação. Em tal situação o CloudCompare fornece um método intermediário para um cálculo mais aproximado da distância entre as superfícies, o modelamento local.

Quando o software determina o ponto mais próximo na nuvem de referência, o princípio é modelar localmente a superfície da nuvem através do ajustamento de um modelo matemático neste ponto e em alguns de seus vizinhos. A distância de cada ponto da nuvem a ser comparada a seu ponto mais próximo na nuvem de referência é substituída por sua distância a esse modelo (FIGURA 46). Ainda segundo a documentação do software, essa metodologia é estatisticamente mais precisa e menos dependente da amostragem da nuvem.



FONTE: Adaptado de (CLOUD Compare. Distances computation. Disponível em: [http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances\\_Computation](http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances_Computation). Acesso em: 10 abr. 2012.

O software permite a configuração de como este modelo será calculado, através da escolha (CloudCompare *documentation*):

- Do modelo matemático: plano calculado por mínimos quadrados, triangulação 2.5D de Delaunay ou função quadrática de altura (maiores informações sobre os modelos podem ser encontradas no site de documentação do software);
- Do método de seleção de vizinhos: definindo um número fixo ou um valor de raio de uma vizinhança esférica;
- E do compartilhamento de um único modelo local para vários pontos da nuvem de referência, acelerando o processo, ao invés de calcular um novo modelo para cada ponto.

Como comentado o CloudCompare também apresenta a possibilidade de comparação de nuvem com malha (*cloud to mesh*). Nesta metodologia, para cada ponto da nuvem a ser comparada o software busca o triângulo mais próximo no modelo de referência e atribui o valor de distância encontrado. A malha utilizada deve ser importada para o software, pois não existe uma função para cálculo de malhas.

No presente trabalho as comparações de nuvens de pontos realizadas com o software CloudCompare serão feitas pelo método nuvem com nuvem, com intuito de analisar as similaridades e diferenças com o método malha com nuvem do software 3DReshaper.

#### 4.10.2 Software 3DReshaper

O 3DReshaper é um software comercial que permite alguns métodos de comparação para escaneamentos, entre eles: nuvem com modelo (malha) (*cloud to mesh*) e malha com malha (*mesh to mesh*). Assim, nesses casos, é necessária a criação de uma malha, através de uma função disponível no software, ou sua importação de uma fonte externa. Para todas as comparações realizadas nesta pesquisa foram utilizados os modelos criados pelas funções do 3DReshaper. Segundo a documentação do software 3DReshaper, para a criação da malhas o software apresenta duas metodologias:

I. No primeiro método o software utilizará todos os pontos presentes da nuvem, sem nenhum critério de seleção. Segundo o material de ajuda do software esse método é o mais lento computacionalmente e pode não apresentar resultados satisfatórios, pois um número desnecessário de triângulos é criado na malha e também pode ocasionar a distorção da superfície modelada.

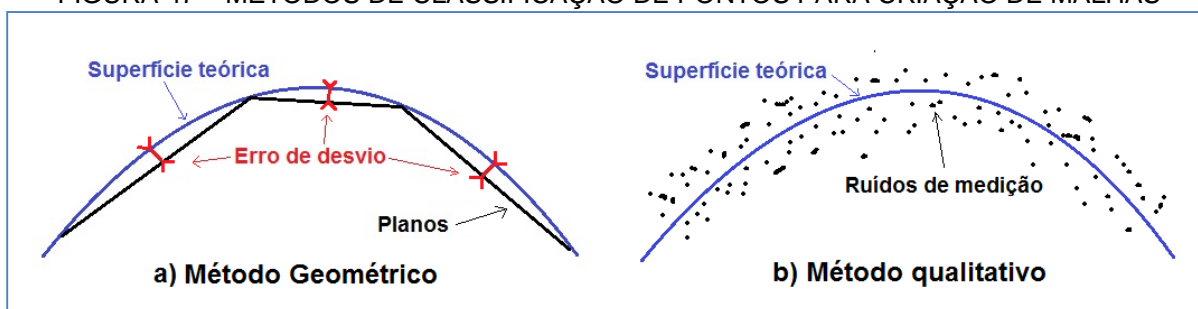
II. No segundo método o software utilizará apenas os pontos classificados como mais apropriados para a criação da malha. Estes pontos seriam selecionados por sua proximidade a uma superfície teórica calculada pelo software para representar a nuvem levantada. Para a seleção dos pontos podem ser utilizados critérios geométrico (a) e/ou qualitativo (b).

a. No primeiro caso são calculados planos triangulares na nuvem, e então pontos que representarão a estrutura são criados na intersecção entre esses planos

e a superfície teórica. Os pontos de intersecção são definidos utilizando um erro de desvio, que é a distância entre a superfície e os planos (item “a” FIGURA 47).

b. No segundo caso o software selecionará os pontos representantes da superfície teórica através da redução dos ruídos de medição: os pontos são selecionados utilizando como critério um valor de distância entre pontos e a superfície, eliminando os pontos distantes (item “b” FIGURA 47) e definindo os mais próximos como os vértices dos triângulos do novo modelo.

FIGURA 47 – MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS PARA CRIAÇÃO DE MALHAS



FONTE: ADAPTADO DO MANUAL DO USUÁRIO DO SOFTWARE 3DRESHAPER

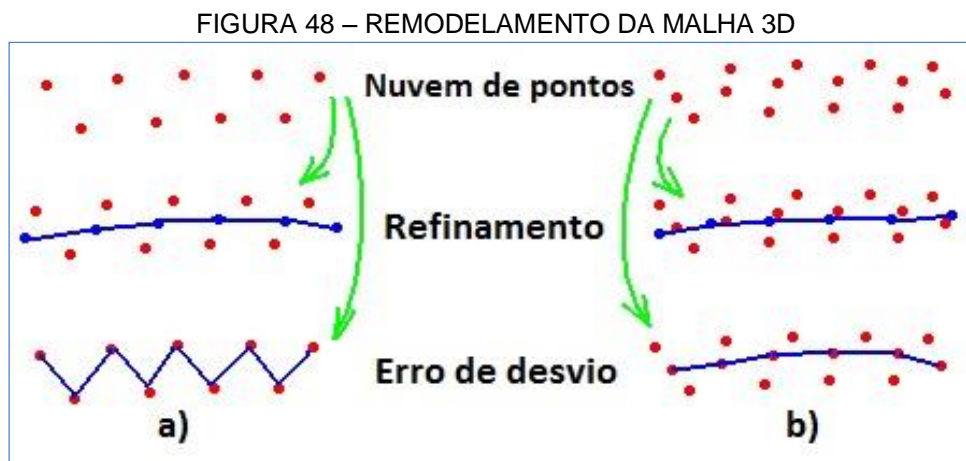
Para o cálculo utilizando os critérios mencionados o software disponibiliza três opções:

- Prova regular: são selecionados pontos da nuvem respeitando um valor de distância média entre pontos e a superfície teórica, configurado pelo usuário, modelando os pontos selecionados com ou sem erro de desvio;
- Malha em duas etapas: na primeira etapa é realizado o mesmo processo da opção “prova regular”, apenas criando triângulos duas vezes maiores, e na segunda etapa o modelo é refinado com a utilização de um critério de erro de desvio;
- Sem a redução de ruídos: todos os pontos são mantidos e considerados com o mesmo peso pelo software. Os pontos são escolhidos de acordo com um valor de erro de desvio 3D determinado pelo usuário.

Para essas três opções, que utilizam ou não a redução de ruídos, a malha pode ser remodelada pelo reposicionamento de seus vértices (refinar) ou pela definição de um erro de desvio. A principal diferença entre as opções é a definição de pontos a ser utilizados para o refinamento da malha. Enquanto o erro de desvio



selecionará pontos da nuvem, o refinamento criará novos pontos espaçados igualmente (FIGURA 48).



Comportamento dos métodos: a) Nuvem com poucos pontos, b) Nuvem com vários pontos.  
 FONTE: ADAPTADO DO MANUAL DO USUÁRIO DO SOFTWARE 3DRESHAPER

Ao analisar a FIGURA 48 é possível visualizar a diferença do comportamento entre os dois métodos de remodelamento da malha. No caso de nuvens com poucos pontos (a) o refinamento cria novos pontos no meio da nuvem mesmo não existindo pontos correspondentes e o erro de desvio resulta em um modelo com ruídos. Já em nuvens com diversos pontos (b) ambos os métodos apresentam soluções mais acuradas. Alguns experimentos foram realizados durante a criação das malhas na intenção de testar as funções do software e serão apresentados no item 4.11.

Infelizmente os desenvolvedores não disponibilizam informações sobre os métodos e modelos matemáticos utilizados para o cálculo da distância na função de comparação entre modelos. Porém este software possibilita a definição de pontos de inspeção nos modelos comparados, calculando e apresentando as diferenças entre suas coordenadas, uma ferramenta bastante útil na análise de comparações de levantamentos LST para a metodologia abordada nesta pesquisa.

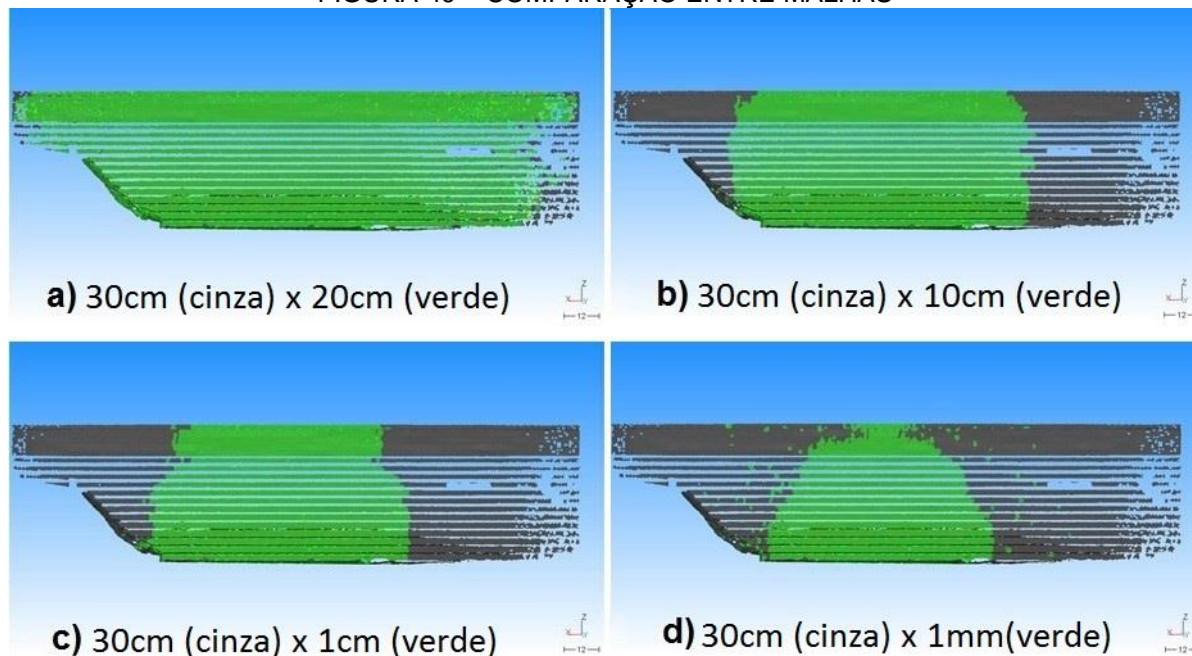
#### 4.11 Testes para criação de malhas (modelos)

Foram avaliados cinco diferentes valores de distância média entre pontos (1mm, 1cm, 10cm, 20 e 30cm) no cálculo das malhas, com redução de ruídos pelo método de prova regular, para todos os pontos iguais de estacionamento do



equipamento nas duas épocas. A FIGURA 49 apresenta os resultados obtidos na comparação das malhas criadas com a nuvem do ponto E2.

FIGURA 49 – COMPARAÇÃO ENTRE MALHAS



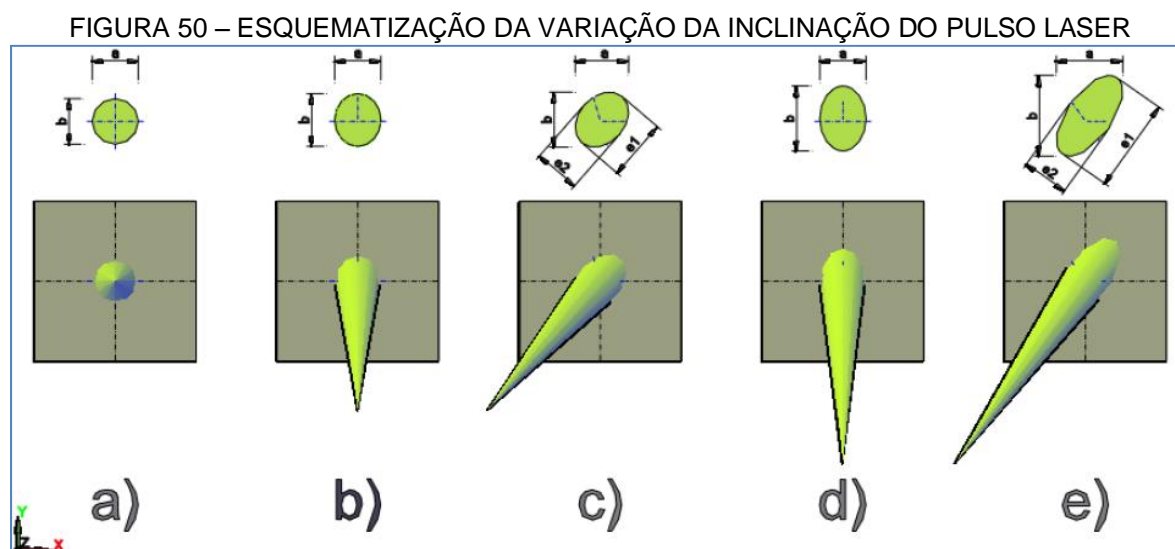
Comparações entre modelos formados com diferentes valores de distância média: a) comparação entre 30cm e 20cm, b) 30cm e 10cm, c) 30cm e 1cm e d) 30cm e 1 mm.

FONTE: O AUTOR

Esta avaliação foi realizada seguindo o princípio da comparação de nuvens: o cálculo da distância entre dois modelos diferentes, que será detalhada posteriormente no item 5.1. Após a criação das malhas com redução de ruídos, utilizando os valores de distância comentados anteriormente, foi realizada a comparação pelo método malha com malha (*mesh to mesh*), definindo como base o modelo criado com distância de 30cm (áreas em cinza na FIGURA 49) e comparando a ele as malhas criadas com os demais valores (áreas em verde na FIGURA 49).

Através desse procedimento foi possível observar que ao diminuir o valor de distância média entre os pontos a serem selecionados é ocasionada a redução do tamanho da malha criada (áreas em verde na FIGURA 49), pois o software exclui os pontos com valores de espaçamento maior que o critério estabelecido. Esse comportamento pode ser causado pela resolução do levantamento com LST que, devido aos diferentes ângulos de incidência do pulso laser na superfície da barragem, leva a um espaçamento de pontos diferenciado ao longo da nuvem. Segundo Van Genechten *et al.* (2008), se o ângulo 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. Ainda, a acurácia na mensuração de posição diminui na medida em que o feixe laser não está perpendicular com a superfície e a área de projeção (*footprint*) do laser é ampliada (FIGURA 50).



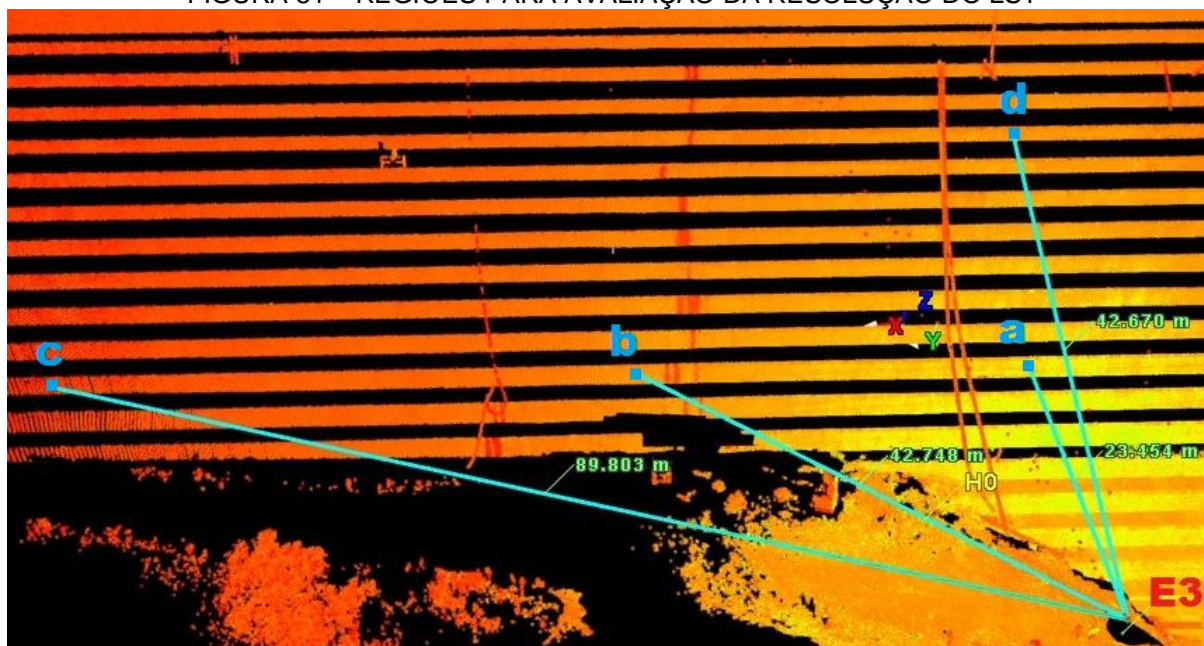
a) Perpendicular, b) declinação em Y-Z de 30°, c) declinação em X-Z e Y-Z de 30°, d) declinação em Y-Z de 45°, e) declinação em X-Z e Y-Z de 45°

FONTE: VAN GENECHTEN *ET AL.*, 2008.

Visando compreender esses aspectos de forma mais adequada foi realizado um breve experimento sobre a resolução do LST.

Sendo o ângulo de incidência do feixe laser, e a distância do equipamento, fatores determinantes na precisão dos dados levantados, foi realizada uma averiguação quanto à resolução dos pontos do levantamento LST, tentando explicar a variação das malhas na FIGURA 49 e confirmar os aspectos vistos na FIGURA 50. Para tal, algumas regiões foram selecionadas na nuvem de pontos levantada com LST (FIGURA 51).

FIGURA 51 – REGIÕES PARA AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO DO LST



FONTE: O AUTOR

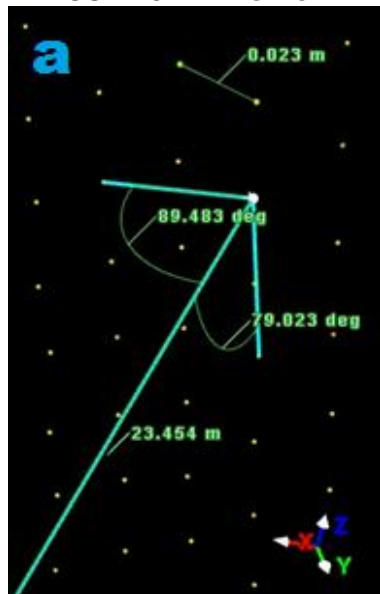
Na FIGURA 51 são apresentadas as quatro regiões (a, b, c e d) escolhidas para a avaliação da resolução do LST. Elas foram dispostas pela nuvem para que cada uma proporcionasse a avaliação de diferentes valores de ângulos entre o pulso laser e a superfície da barragem (que aqui é referido como ângulo complementar<sup>2</sup> ao ângulo de incidência do pulso laser) e distâncias percorridas pelo pulso. Porém, alguns aspectos foram mantidos almejando garantir uma relação entre as mesmas. As regiões “a, b, e c” compartilham valores semelhante de ângulos entre pulso laser e a superfície da barragem (ângulo complementar ao ângulo de incidência) no sentido vertical, em um valor aproximado a 79°, assim definido para tentar avaliar o espaçamento de pontos no sentido horizontal. Já as regiões “a e d” compartilham o ângulo complementar ao ângulo de incidência horizontal, aproximado a 90°, na tentativa de avaliar o espaçamento vertical dos pontos. Todas as regiões são apresentadas a seguir em figuras que representam as nuvens 3D levantadas em campo.

Na primeira região “a”, exemplificada na FIGURA 52, a distância até o scanner é de 23,45m, com ângulos complementares ao de incidência aproximados a 89° na horizontal e 79° na vertical. Essa região é a mais próxima do equipamento e a que mais se assemelha a ângulos de incidência próximos a zero. Como pode ser visto na

<sup>2</sup> Ângulos complementares são ângulos cuja a soma de suas medidas resultam em 90 graus

FIGURA 52, a média para os maiores valores de espaçamento entre pontos da nuvem (pontos verdes) nessa região é de aproximadamente 2,3cm.

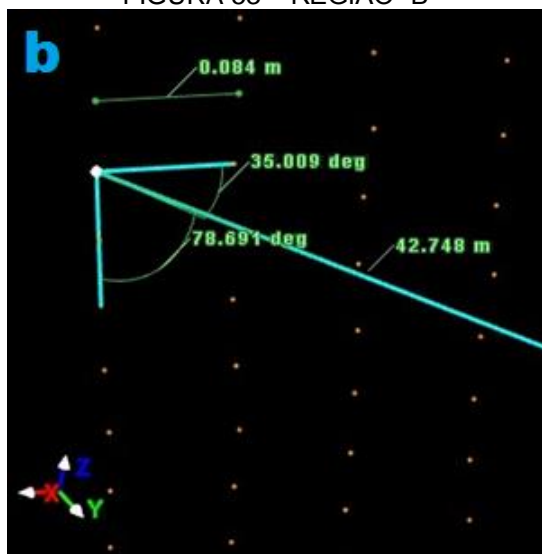
FIGURA 52 – REGIÃO “A”



FONTE: O AUTOR

Como sugerido, na região “b” (FIGURA 53) buscou-se manter o ângulo entre feixe laser e a parede da barragem no sentido vertical igual ao da região “a”. Já os outros valores são distintos, com distância entre objeto e scanner de 42,75m e ângulo complementar ao de incidência horizontal de 35°. Nessa configuração a média dos valores de maior espaçamento entre pontos da nuvem (pontos amarelos) é aproximadamente 8,4cm.

FIGURA 53 – REGIÃO “B”



FONTE: O AUTOR

Por sua vez, na região “c” (FIGURA 54) também foi mantido o ângulo complementar ao de incidência vertical, mas com ângulo complementar ao de incidência horizontal aproximado a  $15^\circ$  e distância do objeto até o equipamento de 89,80m. Já nessa configuração a média para os valores de maior espaçamento horizontal de pontos (pontos em laranja) passa a ser de 35,7cm.

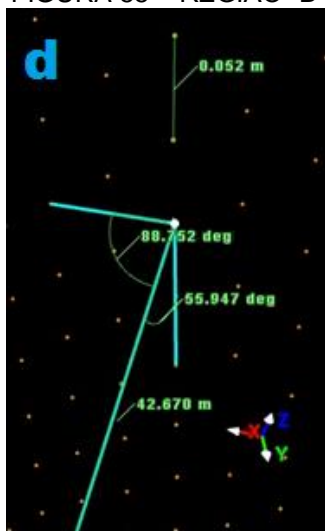
FIGURA 54 - REGIÃO "C"



FONTE: O AUTOR

A última região avaliada “d” (FIGURA 55) apresenta aproximadamente o mesmo valor de ângulo complementar ao de incidência horizontal definido na região “a”. Assim, diferente das outras regiões, sua variação está no ângulo complementar ao de incidência vertical com valor aproximado a  $56^\circ$ . O que é alterado é o espaçamento vertical entre pontos, com a média dos maiores valores aproximada a 5,2cm. A distância entre o objeto e o LST é de 42,67m.

FIGURA 55 – REGIÃO “D”



FONTE: O AUTOR

Todos os valores encontrados nas quatro regiões foram resumidos na TABELA 5.

TABELA 5 – VALORES DA RESOLUÇÃO DO SCANNER

	REGIÕES			
	a	b	c	d
<b>Distância até scanner (m)</b>	23,454	42,748	89,803	42,67
<b>Angulo Complementar ao de Incidência horizontal</b>	89,483°	35°	15,174°	88,752°
<b>Angulo Complementar ao de Incidência vertical</b>	79,023°	78,691°	79,749°	55,947°
<b>Média dos maiores valores de distância entre pontos (m)</b>	0,023	0,084	0,357	0,052

FONTE: O AUTOR

Ao analisar a TABELA 5 é notável a variação da distância entre os pontos da nuvem quando se altera os valores de ângulos de incidência do pulso laser e da distância entre objeto e scanner. Enquanto no centro da nuvem (região “a”) tem-se pontos espaçados a cada 2cm, a medida que a região avaliada se distancia do LST e o ângulo complementar ao de incidência diminui (aumento do ângulo de incidência) temos o aumento da distância entre pontos, com o maior valor encontrado na região “c” de 35,7cm.

Se, como proposto por Van Genechten *et al.* (2008), essas variações diminuem a acurácia do levantamento, surge a necessidade de se reduzir a área da nuvem de pontos a ser utilizada para a criação das malhas e também para a comparação de dados, visando evitar a regiões de dados não confiáveis e garantir uma maior credibilidade nos resultados gerados. Os autores comentam que para evitar tais problemas o ideal seria não utilizar ângulos entre o pulso laser e a superfície do objeto escaneado inferiores a 10°. Porém, mesmo com dados confiáveis do LST, segundo os resultados apresentados na TABELA 5, os levantamentos com LST realizados com um ângulo de 10° entre o feixe laser e a superfície da barragem apresentam espaçamento entre pontos maior do que 35cm. Como a precisão da criação de malhas depende da densidade de pontos da nuvem, nesse caso o valor de



10° de inclinação não classifica idealmente os pontos a serem utilizados para a criação da malha que representaria a estrutura de modo mais acurado.

Já, através da seleção realizada pelo software no processo de criação de malhas, quando o valor de distância média selecionado como critério é inferior a 1cm, é possível distinguir as regiões que seriam mais adequadas para a criação de malhas com a maior precisão (áreas em verde dos itens “c” e “d” da FIGURA 49). Os resultados encontrados durante a criação de malhas em todos os pontos de instalação do scanner (FIGURA 49) apontam para as áreas levantadas com até aproximadamente 45° de ângulo de inclinação do pulso, uma faixa de 90° de abertura horizontal com sua região central no ponto de incidência igual a zero (45° de abertura horizontal para cada direção a partir deste ponto). Como pode ser visto na TABELA 5, para este valor limite de ângulo de incidência o espaçamento entre pontos teria valor máximo entre 8cm e 5cm, o que garante grande densidade de pontos, confirmando assim que estas regiões seriam apropriadas para a criação de malhas.

Portanto, após as análises destes testes realizados (criação de malhas e resolução do levantamento), foi definida a criação de dois tipos de malhas para realizar os tipos de comparações. Para as comparações gerais foi definida a criação de malhas com a maioria dos pontos das nuvens (com distância média de 20cm, item “a” da FIGURA 49) para avaliar toda a extensão do levantamento, e para as comparações locais a criação de malhas com erro padrão tridimensional de 1mm, utilizando as regiões definidas nos testes (com distância média de 1cm, item “d” da FIGURA 49), buscando uma averiguação mais precisa de possíveis deformações na estrutura.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os três tipos de comparações realizadas: comparação entre escaneamentos realizados a partir de pontos de instalação iguais nas diferentes épocas dos levantamentos, entre o escaneamento a partir de um ponto de instalação de uma época e a nuvem da estrutura total da barragem resultante de todos os escaneamentos da época distinta, e comparação das as nuvens dos escaneamentos de toda estrutura em ambas as épocas, percorrendo sobre os aspectos encontrados para cada caso.

### 5.1 Comparação entre escaneamentos realizados a partir de pontos de instalação iguais nas épocas distintas

Neste item serão apresentados os resultados das comparações realizadas entre os escaneamentos efetuados com o LST instalado em pontos iguais em ambas as épocas. Ao total foram efetuadas três comparações entre levantamentos, uma para cada ponto distinto (E1, E2 e E3). Porém, como todas seguem a mesma metodologia, apenas os resultados referentes ao ponto de instalação E2 serão apresentados nas descrições dos procedimentos. Os levantamentos a partir deste ponto representam a porção central da estrutura levantada na segunda época. Os resultados das comparações dos demais pontos estão disponíveis no APENDICE I.

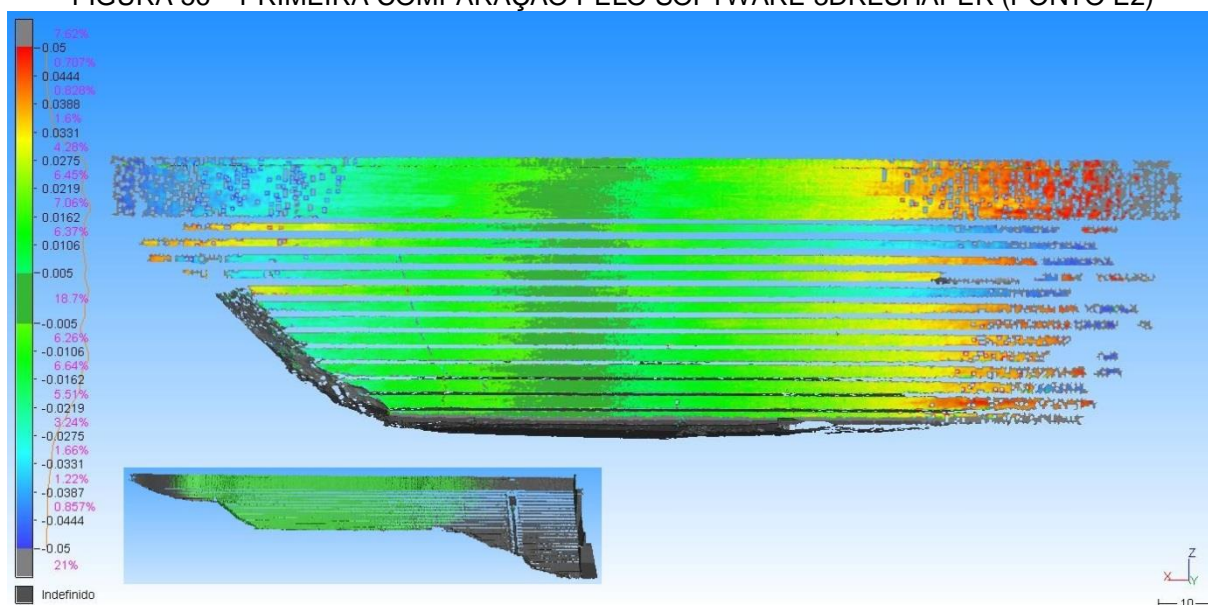
Inicialmente os dados foram processados no Cyclone e exportados em um arquivo de nuvem de pontos. Estes então foram importados nos softwares 3DReshaper e CloudCompare onde uma primeira comparação foi realizada utilizando as configurações padrões de cada programa, com o intuito de analisar a coerência entre os resultados destes softwares. Após as primeiras análises é realizada uma comparação final, utilizando regiões específicas da nuvem e configurações dos softwares que permitiriam resultados de maior precisão.

#### 5.1.1 Comparações preliminares

A comparação inicial realizada com o software 3DReshaper é apresentada na FIGURA 56.



FIGURA 56 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO PELO SOFTWARE 3DRESHAPER (PONTO E2)



FONTE: O AUTOR

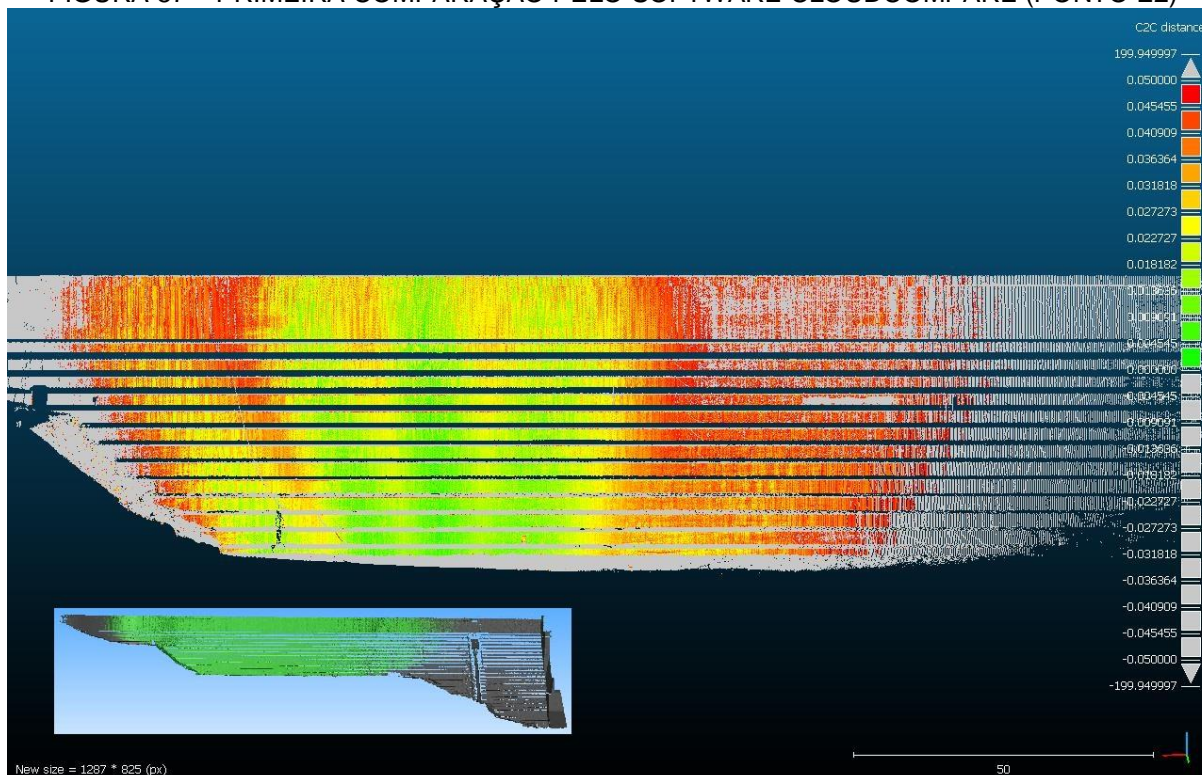
Para tal comparação primeiramente foram importados as nuvens de pontos do ponto de instalação E2 no software 3DReshaper. Utilizando a nuvem referente à primeira época levantada foi criada uma malha com distância média entre pontos de 20cm. Com isso foi possível realizar a comparação entre a malha da primeira época e a nuvem de pontos referente à segunda época de levantamento, onde o software calculou o deslocamento 3D entre a nuvem e a malha. Nesta primeira experiência com o programa é possível constatar mais uma vez a redução do tamanho da malha devido à distância média utilizada e sua criação. Devido a isso, a área a ser comparada também é menor do que a área total levantada pelo LST.

O resultado da comparação realizada nessa região (FIGURA 56) é representado por uma escala de variação de cores que demonstra os diferentes deslocamentos encontrados entre malha (primeira época) e nuvem (segunda época). Como os deslocamentos ocorrem nas três dimensões os valores de cores são atribuídos à média entre os resultados. Os valores da escala foram determinados para representar da melhor forma as distâncias encontradas entre os pontos. A escala varia de verde escuro, representando distâncias de 0 a 5mm, a vermelho ou azul, que representam distâncias de 5cm. As demais distâncias são representadas pela variação gradual de cores entre esses extremos. Devido a restrições na configuração do software algumas distâncias foram erroneamente consideradas com valor negativo e são representadas pelas variações de cores do verde ao azul. Alguns poucos pontos

localizados nas bordas apresentaram distância superior a 5cm, e são representados pela cor cinza.

A comparação inicial realizada com o software CloudCompare é apresentada na FIGURA 57.

FIGURA 57 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE (PONTO E2)



FONTE: O AUTOR

Como explanado no procedimento do primeiro software, essa primeira comparação foi realizada através da importação das nuvens do levantamento a partir do ponto de instalação E2. A diferença do procedimento no CloudCompare, comentada no item 4.10.1, é a utilização direta da nuvem de pontos da primeira época como referência para a comparação com a nuvem da segunda época de levantamento, realizando assim uma comparação nuvem com nuvem. Como nenhuma redução da nuvem ocorreu nesse processo a comparação realizada neste software é de toda a área levantada em campo. Porém, para possibilitar a análise conjunta dos resultados de ambos os softwares, a distância máxima representada nos resultados será de 5cm.

Utilizando a mesma metodologia de representação das distâncias encontradas entre os levantamentos do software 3DReshaper, uma escala de

variação de cores representando a média dos deslocamentos 3D, as distâncias de 0 a 5cm são apresentadas na FIGURA 57 respectivamente como as regiões de cores verde e vermelho, e as demais distâncias são representadas pela variação gradual da cores entre os dois extremos. Como este software não reduziu a área utilizada na comparação é possível observar as regiões onde os resultados são superiores a 5cm que são exibidas na cor cinza.

Como pode ser visto nas FIGURA 56 e FIGURA 57, o menor deslocamento seria encontrado da região central da área levantada, que corresponde à região caracterizada como a mais adequada para a criação de malhas com alta precisão no software 3DReshaper. Essas distâncias variam de 0 a aproximadamente 2,5cm e são representadas pela variação de cores de verde escuro a verde claro na FIGURA 56, e de verde a amarelo na FIGURA 57. Na FIGURA 57 ainda podem ser notados algumas áreas com valores até 5cm dentro dessa região central. À medida que os pontos se distanciam do centro da área levantada as distâncias gradualmente aumentam. Nessas primeiras comparações os resultados dos dois softwares apresentam algumas diferenças quanto às áreas de maior precisão. No 3DReshaper os melhores resultados são apresentados em uma faixa no centro da nuvem. Já no CloudCompare eles estão mais espalhados por todo centro.

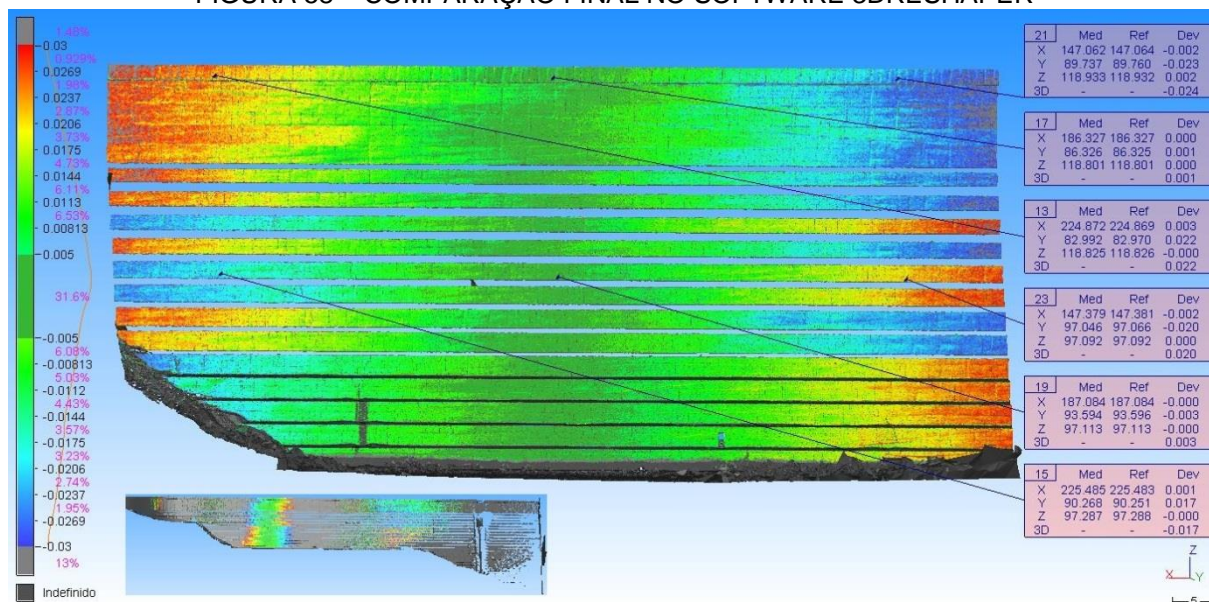
Tais aspectos mostram a importância da avaliação de uma área que permita comparações que demonstrem valores de deslocamento da estrutura. Deste modo, a região definida na criação de malhas, que apresenta os menores valores de descolamento entre os levantamentos, será utilizada para a busca de resultados definitivos.

### 5.1.2 Comparações finais

Para as comparações finais realizadas em ambos os softwares utilizados na pesquisa, as nuvens de pontos sofreram um processo de edição. As regiões determinadas, durante a criação de malhas e nas comparações iniciais, como as adequadas para o cálculo do deslocamento da estrutura (áreas levantadas com limite de ângulo de incidência de 45°, abertura horizontal de 90°) foram selecionadas para os novos cálculos, e as demais regiões excluídas das nuvens. Assim os softwares realizariam os procedimentos em uma área reduzida, diminuindo o tempo computacional.

A comparação final realizada com o software 3DReshaper é apresentada na FIGURA 58.

FIGURA 58 – COMPARAÇÃO FINAL NO SOFTWARE 3DRESHAPER



FONTE: O AUTOR

Como comentado anteriormente, a malha utilizada para as comparações no 3DReshaper foi criada a partir da nuvem de pontos da primeira época do levantamento, sem redução de ruídos e com seleção de pontos pelo valor de erro tridimensional de 1mm. A utilização de um método diferente do empregado nas comparações anteriores visa o teste de outras configurações do software e a representação acurada da estrutura. Novamente esse modelo criado foi comparado à nuvem de pontos da segunda época e os resultados encontrados são apresentados através de uma escala de variação de cores. Como nas primeiras comparações, os valores da escala foram determinados para melhor representar a região em questão e neste caso a variação da escala é de 0 a 3cm. As regiões na cor verde escuro representam os deslocamentos de 0 a 5mm, as regiões em vermelho (ou azul, devido às restrições do software) os deslocamentos de 3cm, e as demais variações graduais de cores representam os deslocamentos entre esses dois extremos.

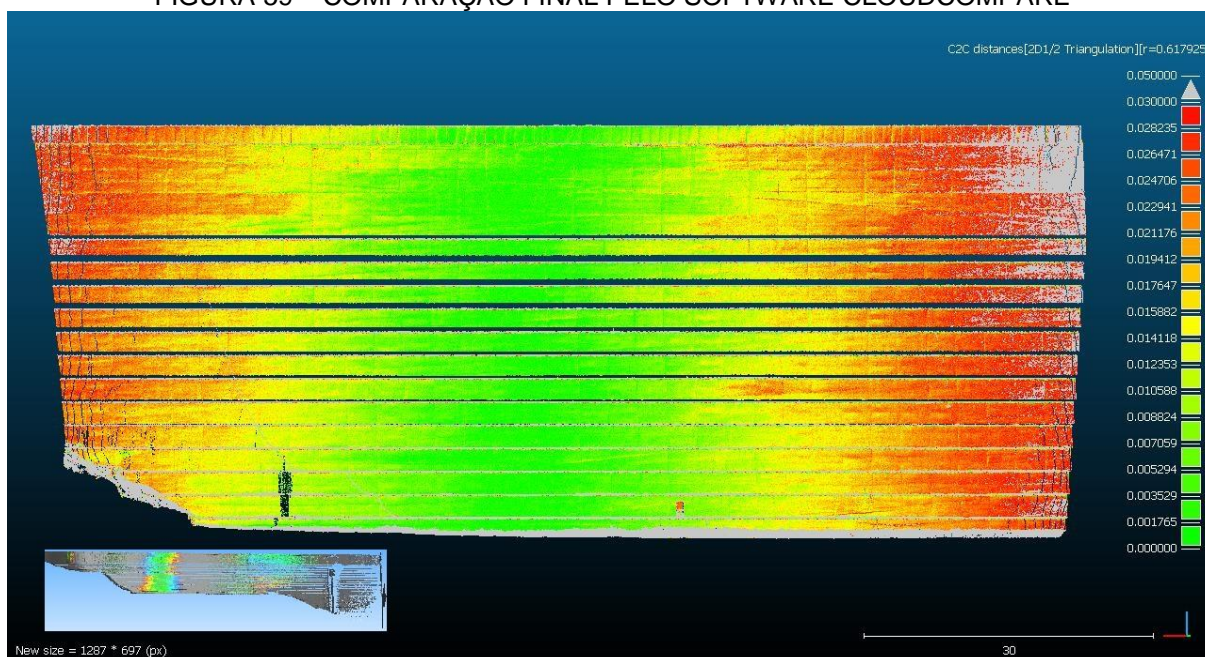
Alguns pontos do levantamento foram selecionados após a comparação e os valores de seus deslocamentos nas três dimensões, calculados em função da malha, são apresentados na FIGURA 58 em caixas de texto visando facilitar a avaliação dos



resultados. Ao analisar a figura em questão é possível observar que os menores deslocamentos ainda se apresentam na parte central da região de estudo, reafirmando a dependência da precisão da malha criada com o ângulo de incidência durante o escaneamento.

Os resultados da comparação final realizada no software CloudCompare são apresentados na FIGURA 59.

FIGURA 59 – COMPARAÇÃO FINAL PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE



FONTE: 1

O procedimento realizado também foi semelhante ao das comparações preliminares, porém utilizando a nova região específica da nuvem. A nuvem da primeira época foi modelada localmente utilizando o método de triangulação 2.5D de Delaunay e então foi comparada à nuvem da segunda época. O resultado do deslocamento é apresentado em uma escala de variação de cores. Para os valores da escala foram adotados os mesmos utilizados no software 3dReshaper, de 0 a 3cm representados respectivamente pelas cores verde e vermelho, e com os valores intermediários de deslocamento representados pela variação gradual de cores entre os limites. Mais uma vez a região central do levantamento apresenta os deslocamentos de menor valor.

Analisando em conjunto ambos os resultados (FIGURA 58 e FIGURA 59) é possível observar a repetição do mesmo padrão de deslocamento. A maioria da área comparada apresenta deslocamentos inferiores a 2cm e apenas as bordas apresentam valores de 3cm. Todos os valores encontrados indicam deslocamentos no sentido do fluxo do rio (eixo Y na FIGURA 58).

Como este tipo de comparação possibilita apenas avaliações locais da barragem, outros métodos foram avaliados e são apresentados nos itens 5.2 e 5.3 onde apenas o software 3DReshaper é empregado, devido à similaridade dos resultados entre esse software e o CloudCompare.

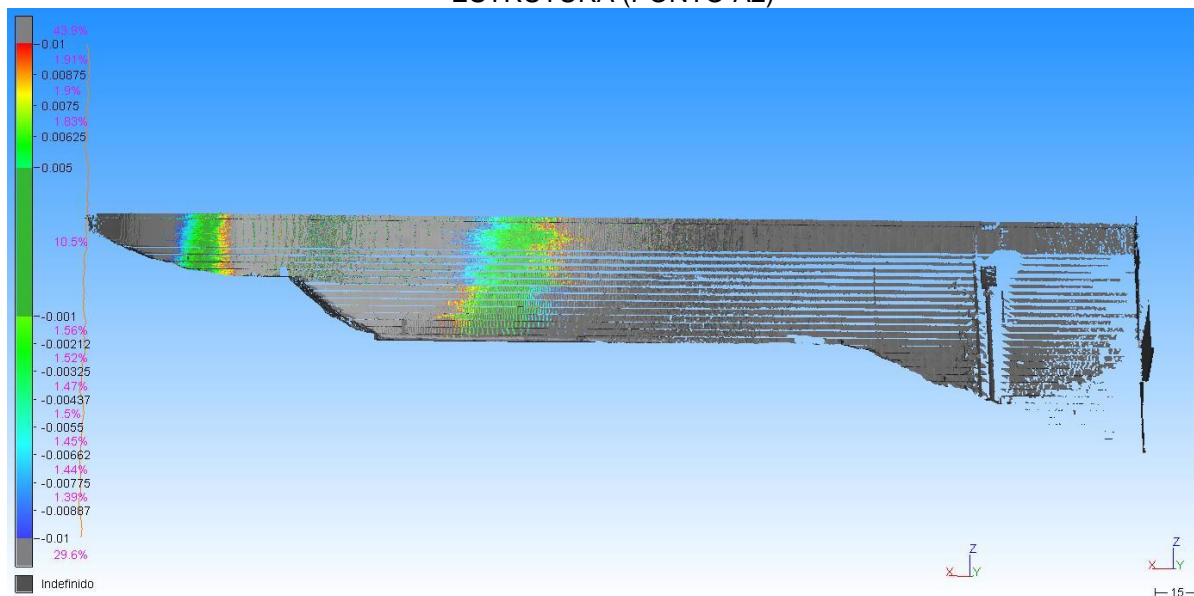
## **5.2 Comparação entre o escaneamento a partir de um ponto de instalação de uma época e a nuvem da estrutura total da barragem dos escaneamentos da época distinta**

Visando avaliar a sobreposição de dados proporcionada pela disposição dos pontos de levantamento em campo, a nuvem de pontos referente ao levantamento a partir do ponto A2 foi comparada a uma malha criada com as nuvens de todos os escaneamentos da primeira época. Este ponto foi selecionado devido sua posição em campo e por ter sido utilizado apenas na segunda época do levantamento. Como está situado entre os pontos E1 e E2 sua área de escaneamento sobrepõe uma grande porção das áreas levantadas destes pontos, e como não possui um ponto similar na primeira época de levantamento a região mais precisa de seu escaneamento não é a mesma das regiões dos pontos utilizados para a criação da malha.

A malha empregada na comparação foi criada com configuração de distância média entre pontos do modelo de 20cm pelo método de redução de ruídos e prova regular, que utiliza a maioria de pontos do levantamento com pouca redução da dimensão no resultado final.

O resultado da comparação é apresentado na FIGURA 60.

FIGURA 60 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO DE UM PONTO E TODA A ESTRUTURA (PONTO A2)



FONTE: O AUTOR

Assim como nos resultados das comparações realizadas anteriormente, os valores de deslocamentos são apresentados em uma escala de variação de cores, e foi definida a representação de áreas de deslocamento entre 0 (verde escuro) e 1cm (vermelho e azul) para avaliar apenas as regiões de maior precisão de resultados e de criação da malha. Os valores de deslocamento superiores a 1cm são representados em cinza claro. Como pode ser visto na FIGURA 60, o resultado é diferente dos apresentados nas comparações anteriores.

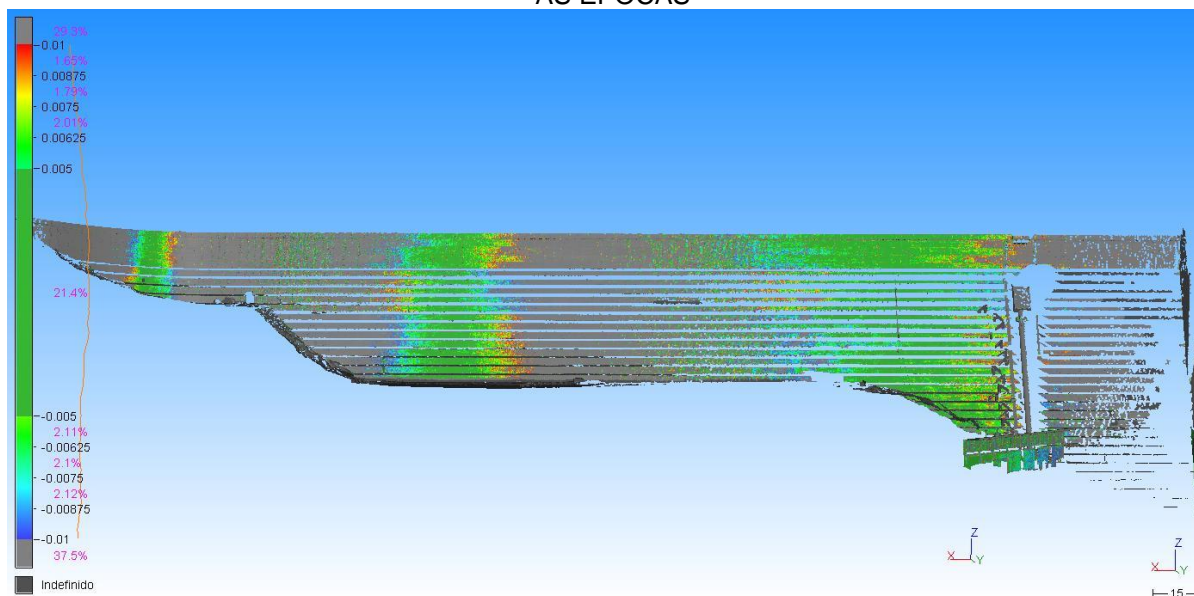
As áreas de menor distância entre a nuvem e a malha representam as regiões centrais dos levantamentos a partir dos pontos E1 e E2, e não a área central levantada a partir do ponto A2. Como essa área não foi levantada na primeira época a malha empregada não possui precisão para a comparação nessa região. Estes resultados indicam que o método utilizado para a criação da malha de referência só representa corretamente a estrutura nas regiões de alta densidade de pontos do levantamento, nesse caso onde o ângulo de incidência do feixe laser é menor do que 45°. Como os escaneamentos a partir dos pontos E1 e E2 estão presentes na malha utilizada suas regiões centrais foram bem modeladas. Mesmo que o levantamento dessas áreas a partir do ponto A2 tenha sido realizado com ângulos de incidência maiores que 45°, o resultado do deslocamento nessas regiões apresenta valores coerentes, similares aos das comparações entre pontos iguais entre ambas as épocas (item 5.1).

Os resultados das comparações realizadas para os demais pontos são apresentados no APENDICE II.

### 5.3 Comparação entre as nuvens dos escaneamentos de toda estrutura em ambas as épocas

Em busca de uma análise da estrutura total foram criadas malhas com todos os escaneamentos de cada época de levantamento. Os modelos foram criados pelo método de redução de ruídos e prova regular com distância média entre pontos de 20cm. O resultado da comparação é apresentado na FIGURA 61.

FIGURA 61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS ESCANEAMENTOS DE TODA ESTRUTURA EM AMBAS AS ÉPOCAS



FONTE: O AUTOR

Novamente os valores de deslocamentos são apresentados em uma escala de variação de cores, com a representação de áreas de deslocamento entre 0 (verde escuro) e 1cm (vermelho e azul) e os valores superiores a 1cm em cinza escuro.

Como nas comparações anteriores os resultados indicam o menor deslocamento nas regiões centrais das áreas escaneadas a partir dos pontos E1, E2 e E3. Mais uma vez isso demonstra a dependência dos métodos de criação de malhas com as regiões de maior densidade de pontos. Os resultados encontrados também indicam que os levantamentos realizados não detectaram nenhum deslocamento da estrutura.



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

O objetivo principal que levou ao desenvolvimento desta pesquisa foi o estudo da potencialidade da utilização de um LST no monitoramento de barragens, com estudo de caso para a UHE Mauá. A oportunidade de avaliar seu desempenho durante a formação do reservatório foi um dos fatores que instigaram o emprego dessa tecnologia, assim como a possibilidade de adicionar novos tipos de informações aos demais dados oriundos das consagradas técnicas de monitoramento, além dos demais benefícios proporcionados por sua utilização (coleta de dados precisos em grande escala e em um curto período de tempo). A carência de estudos relacionados ao assunto em nosso país também influenciou a escolha do tema proposto.

Os estudos começaram com o reconhecimento da área da barragem e com os planejamentos de pontos. A ideia inicial seria realizar dois levantamentos com LST de toda a estrutura à jusante da barragem em duas épocas distintas, pré-formação e pós-formação do reservatório. Para isso foram selecionadas regiões para a instalação do equipamento por toda a extensão da estrutura. Durante os levantamentos da primeira época, mês de abril de 2012, toda a barragem foi escaneada utilizando um LST e seus pontos de instalação, e de referência, foram levantados com a utilização de uma estação total robotizada instalada em um dos pilares geodésicos utilizados no monitoramento da barragem. Para os levantamentos da segunda época, mês de novembro de 2012, foram mantidas as mesmas condições empregadas inicialmente, porém o acesso à área referente ao vertedouro da barragem foi restrito devido a vazão das comportas. Assim a área levantada foi reduzida, mas pontos adicionais de levantamento foram definidos entre as regiões antes utilizadas, visando um maior recobrimento no escaneamento da estrutura.

O processamento dos dados foi realizado logo após os levantamentos de cada época. Primeiramente foram processados os dados provenientes da estação total robotizada utilizando o software Posição, onde foi definido um sistema topográfico de coordenadas referenciado aos pilares geodésicos de monitoramento. Posteriormente foram processados os dados oriundos do levantamento com LST, empregando o software Cyclone. Nessa etapa os dados do LST e da estação total são integrados, referenciando assim todas as nuvens de pontos a um mesmo sistema

de coordenadas. Na posse dos dados processados de ambas as épocas de levantamento foi possível a comparação entre os escaneamentos efetuados. Essas comparações foram realizadas nos softwares 3DReshaper e CloudCompare.

A metodologia empregada para tal foi o cálculo de deslocamento entre as nuvens de pontos dos levantamentos de cada época. Devido à funcionalidade dos softwares cada um apresenta processos distintos para os cálculos. No 3DReshaper a comparação é efetuada entre a nuvem de pontos de uma época e um modelo tridimensional criado a partir da nuvem de pontos da época distinta. Já no CloudCompare um modelamento local é efetuado nos pontos de uma das nuvens, que é então comparada a nuvem de pontos de outra época. No decorrer de alguns testes realizados para a criação de malhas no 3DReshaper certos aspectos foram identificados. Dependendo das configurações do software a dimensão da malha criada era reduzida, representando uma porção menor da nuvem de pontos. Uma das causas possíveis deste fenômeno seria uma restrição no cálculo da malha devido ao espaçamento de pontos da nuvem, que varia de acordo com o ângulo de incidência do feixe laser e da distância dos pontos levantados ao LST. Alguns experimentos foram efetuados para avaliar a resolução dos escaneamentos e os resultados indicaram espaçamentos de pontos de 2cm na região central da nuvem e mais próxima do LST, e que este valor crescia proporcionalmente com o aumento do ângulo de incidência do pulso laser e do aumento da distância entre o LST e a região levantada, atingindo espaçamentos superiores a 35cm. Considerando tais aspectos foi definida a criação de malhas com configurações distintas, pretendendo assim representar de maneira adequada a estrutura para cada tipo de comparação realizada.

As primeiras comparações foram realizadas entre escaneamentos em pontos iguais das épocas distintas. Elas foram realizadas em duas etapas, uma inicial utilizando todos os pontos das nuvens levantadas (FIGURA 56 e FIGURA 57), e uma final restrita a área central da nuvem (FIGURA 58 e FIGURA 59) com maior densidade de pontos e que permitia a criação de malhas mais precisas. Na etapa inicial os valores encontrados nos testes aparentemente não são oriundos de um deslocamento da estrutura entre as duas épocas. Possivelmente são devidos à perda de qualidade na criação da malha no software 3DReshaper e no modelamento local do software CloudCompare à medida que os pontos da nuvem se distanciam do scanner e o valor do ângulo de incidência do feixe laser aumenta (acréscimo da distância entre pontos

na nuvem). Na etapa final novamente a maioria dos resultados aparenta não expressar um deslocamento da estrutura, mas sim a precisão dos modelos utilizados como referência para as comparações, no software 3DReshaper uma malha e no CloudCompare o modelamento local da nuvem. Como os resultados são similares é provável que a metodologia do cálculo de tais modelos seja semelhante. Na FIGURA 58 (3DReshaper) a área apresentada na cor verde escuro representam os deslocamentos até 5mm, representados na cor verde na FIGURA 59 (CloudCompare). Essas são as regiões da nuvem onde a malha representa de maneira mais acurada a superfície, devido ao ângulo de incidência, à distância do instrumento ao alvo e à densidade de pontos, sendo assim as áreas que apresentam resultados mais confiáveis. Tais resultados apontam para valores mínimos de deslocamento no sentido do fluxo do rio, e se repetem nos resultados de todos os pontos de escaneamento (APENDICE I). Porém esses resultados ainda podem apenas apresentar as precisões dos processos de criação de malhas e cálculo de distâncias, indicando que os levantamentos com LST e os cálculos realizados pelos softwares não detectaram nenhuma movimentação da barragem. Como foram utilizados dados referentes a apenas duas épocas diferentes de levantamento, um maior número de observações seria necessário para permitir conclusões sobre o deslocamento da estrutura. Os resultados de ambas as etapas de comparações indicam que as malhas criadas no software 3DReshaper perdem a precisão a medida que os pontos se distanciam da região de alta densidade, o mesmo ocorrendo para a modelagem local aplicada pelo software CloudCompare

Outros tipos de comparações foram efetuados, onde foram calculados os deslocamentos entre os escaneamentos de toda estrutura em ambas as épocas e entre escaneamentos em um ponto da segunda época e uma malha da estrutura total da barragem da primeira época. Os resultados encontrados para o primeiro tipo são similares aos anteriores em sua maioria. Porém, durante o segundo desses métodos de comparação foram constatados diferentes resultados. Ao comparar a nuvem de pontos oriunda de um dos pontos auxiliares (A2) da segunda época de levantamento a uma malha criada utilizando os três pontos de escaneamento (E1, E2 e E3) da primeira época, sua área central não apresentou os menores valores de deslocamento, mas sim as áreas levantadas desses pontos referentes às regiões centrais dos pontos E1 e E2. Novamente isso indica a falta de precisão na criação das malhas nas regiões de baixa densidade de pontos, uma vez que a malha criada não

possuía o levantamento realizado do ponto A2. Estes resultados também indicam que há uma considerável precisão do laser mesmo nas regiões mais distantes do equipamento e de baixa densidade de pontos, onde o ângulo de incidência apresenta valores aproximados a  $90^\circ$ , uma vez que sua comparação com as áreas de maior precisão da malha resultou em valores mínimos de deslocamento. Assim, os resultados indicam que o método de criação de malhas teve grande influência nos resultados do experimento e neste estudo apenas representou a estrutura de forma adequada nas regiões de maior densidade de pontos.

Após todas as pesquisas realizadas pode-se concluir que os objetivos propostos foram atingidos. Vários aspectos da utilização do LST foram avaliados, desde o planejamento de pontos às comparações dos levantamentos realizados, e os resultados atingidos indicam algumas diretrizes a serem seguidas para evitar alguns dos problemas encontrados e aprimorar a precisão dos levantamentos. Os métodos utilizados na criação de modelos de referência para a comparação de dados devem ser avaliados segundo sua capacidade de representar toda a nuvem de pontos, sem distorções nas áreas de baixa densidade de pontos. Porém, também é importante o planejamento de pontos de instalação do LST. Com um maior número de instalações definidas em campo, maiores serão as áreas levantadas com grande densidade de pontos, garantindo uma maior qualidade na representação da estrutura. Assim também um maior número de observações deve ser efetuado em campo, permitindo a realização de mais comparações de resultados. É importante ressaltar que os resultados obtidos estão diretamente ligados às configurações utilizadas nos softwares de processamento, e que estudo de outros tipos de configurações é imprescindível na busca de valores mais acurados.

A ausência de detecção de deslocamentos aparentes nos levantamentos com o laser não descarta os resultados obtidos, apenas demonstra a necessidade de continuar os estudos sobre o emprego dessa tecnologia para o monitoramento de estruturas.

## 6.2 Recomendações

Após as análises de todos os resultados alcançados surgiram algumas recomendações:

- ❖ Planejar pontos de instalação do LST visando um recobrimento das áreas de grande densidade de pontos (no caso dos levantamentos desta pesquisa as áreas com ângulo de incidência do feixe laser de até  $45^\circ$ ), buscando representações cada vez mais adequadas da estrutura e maiores precisões na detecção e deslocamentos;
- ❖ No caso de várias instalações do equipamento, realizar levantamentos com abertura horizontal do LST reduzida às principais regiões de interesse, segundo o planejamento de pontos;
- ❖ Utilizar pontos materializados em campo, pois auxiliarão no processo de integração entre os dados do LST e de outras tecnologias. Também amparam na repetitividade de algumas condições de levantamento;
- ❖ Testar diferentes configurações do LST no levantamento de pontos para avaliar todas suas opções de funcionamento;
- ❖ Realizar levantamentos com LST em um maior número de épocas, aumentando assim o número de observações;
- ❖ Testar diferentes softwares e diferentes configurações para a criação de malhas e comparações de nuvens;
- ❖ Comparar os resultados obtidos com o LST ao monitoramento da estrutura realizado com outros métodos (e. g. monitoramento com estação total robotizada).

## REFERÊNCIAS

- ABREU, J. V. de; FIGUEIREDO, A. D. de; **Concreto de Alta Resistência Compactado com Rolo para Pavimentação**. Em: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, Brasil. 2003.
- ALBA, M.; GIUSSANI, A.; RONCORONI, F.; SCAIONI, M.; VALGOI, P. **Geometric Modelling of a Large Dam by Terrestrial Laser Scanning**. In: XXIII FIG Congress. Munich, Germany. 2006.
- ANDRIOLO, F. R. **Contribuições Para O Conhecimento E Desenvolvimento Do Concreto Rolado**. São Paulo: Barber-Greene. 1989.
- BATISTA, E. T.; GRAÇA, N. G.; PACELLI, W. A. *et al.* **Execução de concreto compactado com rolo em Lajeado – Consolidação da experiência**. Em: Congresso Brasileiro do Concreto. 44. 2002, Belo Horizonte, 2002. p.156.
- BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. **The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording**. CIPA - International Symposium, Proceedings. Potsdam, Germany – 2001.
- CLOUD Compare. **Distances computation**. Disponível em: [http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances\\_Computation](http://www.danielgm.net/cc/doc/wiki/index.php5?title=Distances_Computation). Acesso em: 10 abr. 2012.
- CNEC WorleyParsons Engenharia S.A. **RIMA – Relatório de Impacto Ambiental da UHE Mauá**. 2004. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1073>>. Acesso em: 17 abr. 2012.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3. ed. Curitiba: UFPR. 97p. 2004.
- DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestruturas. **O que são barragens**. Disponível em: <<http://www.deinfra.sc.gov.br/barragens/o-que-sao-barragens/>> Acesso em: 26 abr. 2012.
- ENGENHARIA Civil: engenharia civil na Internet. Disponível em: <http://www.engenhariacivil.com/simulacao-numerica-comportamento-barragens-aterro>. Acesso em: 13 abr. 2012.
- FAGGION, P. L. **Obtenção dos Elementos de Calibração e Certificação de Medidores Eletrônicos de Distância em Campo e Laboratório**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências geodésicas da UFPR, Curitiba, 2001.
- GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, M. **Application of high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements**. Em: 10th FIG, Orange, California, US. Proceedings. 2001.

GORDON, S.; LICHTI, D.; FRANKE, J.; STEWART, M. **Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners**. Em: 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 2004.

GRANEMANN, D. C. Estabelecimento de Uma Rede Geodésica Para o Monitoramento de Estruturas: **Estudo de Caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

HEBERT, M. AND KROTKOV, E., **3D measurements from imaging laser radars: how good are they?** Image and Vision Computing, v. 10, n. 3, p. 170 – 178. 1992.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica Scanstation C10 User Manual**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>. Acesso em: 08 abr. 2012.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TPS 1200+ User Manual**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>. Acesso em: 08 abr. 2012

LINDENBERGH, R.; PFEIFER, N.; RABBANI, T. **Accuracy Analysis Of The Leica Hds3000 And Feasibility Of Tunnel Deformation Monitoring**. Em: ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, 2005.

LICHTI, D. D.; HARVEY, B. **The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements** - Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications - Ottawa, 2002.

MARTINI, L. **Calibração De Prismas De Reflexão Total Em Forma De Fita Adesiva E De Acrílico, E Sua Aplicação No Controle De Deslocamentos De Estruturas**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

MARTINS, T. D.; PASSOS, E. Superfícies Aplainadas da Bacia Hidrográficoado Altíssimo Rio Tibagi – PR. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v.6, n.11, jan./abr. de 2012. p. 133-152.

MILANI FILHO, L. **O Uso Do Concreto Compactado Com Rolo Em Barragens – Tendências Futuras**. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia da Energia). Universidade Federal de Itajubá. Departamento de Engenharia Mecânica. Itajubá. MG. 2003.

MTI Instruments. Disponível em: <  
<http://www.mtiinstruments.com/PRODUCTS/LASERTRIANGULATION.ASPX>.  
Acesso em: 20 abr. 2012.

MSPC. Informações Técnicas. **Laser**: princípios básicos de funcionamento. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/ELETRN/LASER110.SHTML>. nov. 2007. Acesso em: 10 abr. 2012.



MUNDO das Energias. Disponível em:

<http://mundodasenergias.blogspot.com.br/2007/10/iberdrola-e-endesa-interessadas-nas.html>. Acesso em: 21 abr.

NADAL, M. A. D. **Controle E Operação De Estações Totais Robotizadas Voltado À Auscultação Geodésica**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.

NEVES, R. V. **Processamento E Análise De Levantamentos Geodésicos Aplicado Ao Monitoramento De Estruturas Civis**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F.M. **Concreto Compactado Com Rolo – Características e Propriedades**. Em: Simpósio de obras em concreto compactado com rolo, 1., 1995, São Paulo. Anais... São Paulo, abr. 1995.

RESHETYUK, Y. **Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners**. Tese de licenciatura, Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suécia. 2006.

SANTIBAÑEZ, S. A. F. **Avaliação Da Influencia Do Modelo De Ajustamento De Observações E Da Densidade De Pontos Laser Scanner Terrestre Para A Representação Paramétrica De Superfícies Planas**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

SHAN, J.; TOTH, C. K. et al. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. 2008.

SILVA, R. N. F. **Avaliação Da Técnica De Nivelamento Trigonométrico, Método Leap-Frog, Na Determinação De Recalque Em Estruturas, Com Precisão Milimétrica: Estudo De Caso Para A Uhe Mauá**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2012.

**Simulação Numérica de Comportamento de Barragens de Aterro**. Disponível em: <<http://www.engenhariacivil.com/simulacao-numerica-comportamento-barragens-aterro>> Acesso em: 26 abr. 2012.

STAIGER, R. **Terrestrial Laser Scanning – Technology, Systems and Applications**. Em: Second FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.

TECHNODIGT. **3DReshaper documentation**. Disponível em: <<http://www.3dreshaper.com/>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

USINAS hidrelétricas e seus impactos ambientais. Disponível em: <http://projetononame.blogspot.com.br/>. Acesso em: 12 abr. 2012.

Vale Vila Verde. Disponível em:

<http://valevivaverde.blogspot.com.br/2012/02/barragem-saco-municipio-de-nova-olinda.html> Acesso em: 10 abr. 2012.

VAN GENECHTEN, B.; DEMEYERE, T.; HERINCKX, S.; GOOS, J.; SCHUEREMANS, L.; ROOSE, D.; SANTANA, M. **Terrestrial laser scanning in architectural heritage deformation analysis and the automatic generation of 2D cross-sections**. Em: 22nd CIPA symposium, Kyoto, Japão. 2009.

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.

VAN GOSLIGA, R.; LINDENBERGH, R.; PFEIFER, N. **Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning**. Em: IAPRS, Dresden, Alemanha. 2006.

WEHR, A. e LOHR, U., **Airborne laser scanning – an introduction and overview**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, N. 54/1999, p. 2-3.

WENDLER, A. P. **Estudo Experimental do Concreto Compactado com Rolo Enriquecido com Calda de Cimento para Face de Barragens de Concreto**. Curitiba PR. Brasil. 2010. Tese (Mestrado em Construção Civil).

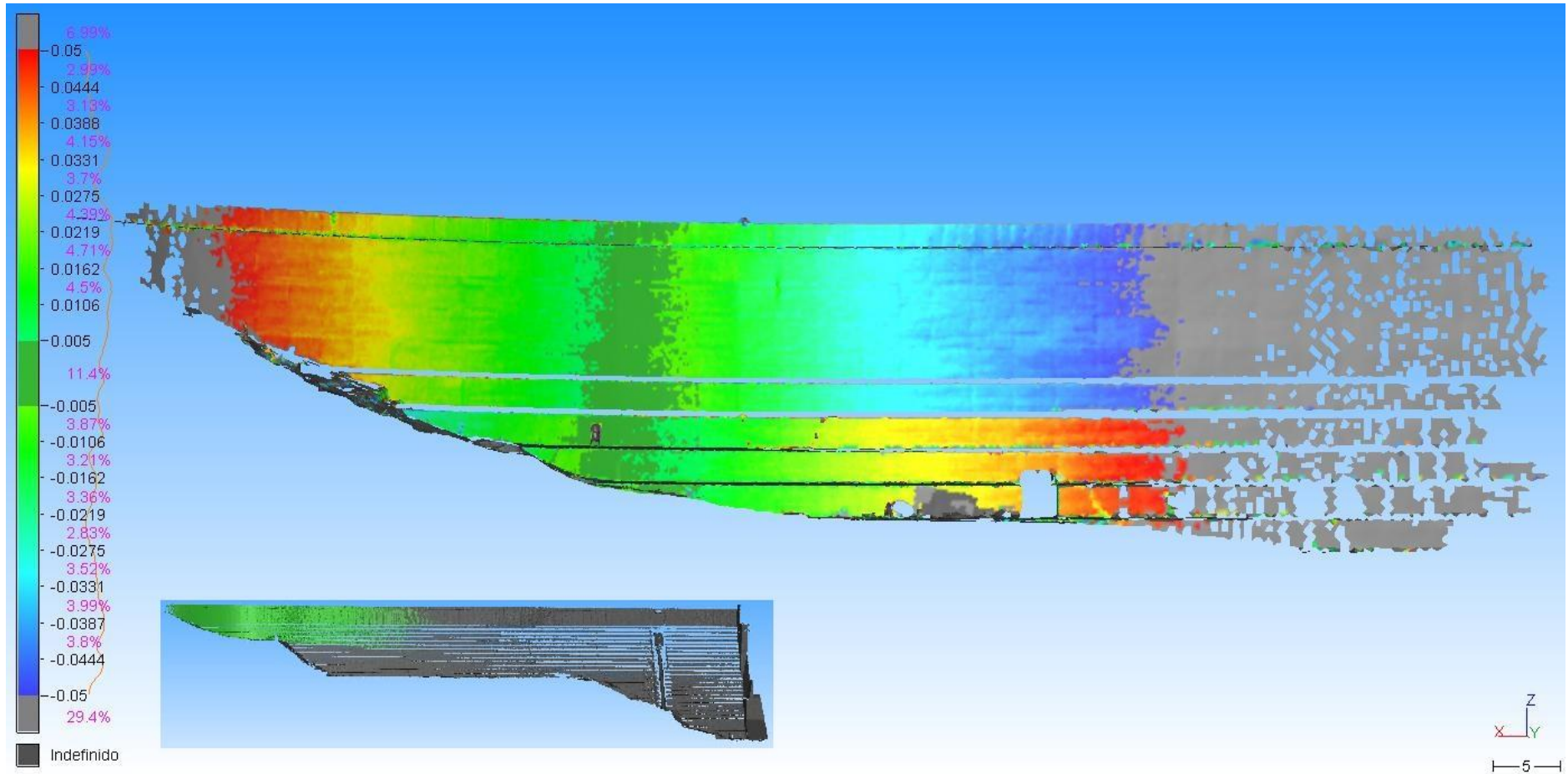
WESCHLER, M. **Como funciona o laser**. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/laser7.htm>> Acesso em: 13 abr. 2012.

ZINGANO, A. C. **Barragens**. Disponível em: <[http://www.lapes.ufrgs.br/discipl\\_grad/geologia3/barragens.pdf](http://www.lapes.ufrgs.br/discipl_grad/geologia3/barragens.pdf)> Acesso em: 26 abr. 2012.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização De Técnicas De Poligonação De Precisão Para O Monitoramento De Pontos Localizados Em Galerias De Inspeção: Estudo De Caso U. H. De Salto Caxias**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

**APÊNDICE I - Imagens complementares das comparações entre  
escaneamentos em pontos iguais em épocas distintas**

FIGURA 62 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E1 (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR

FIGURA 63 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO F1 (NUVEM X NUVEM)

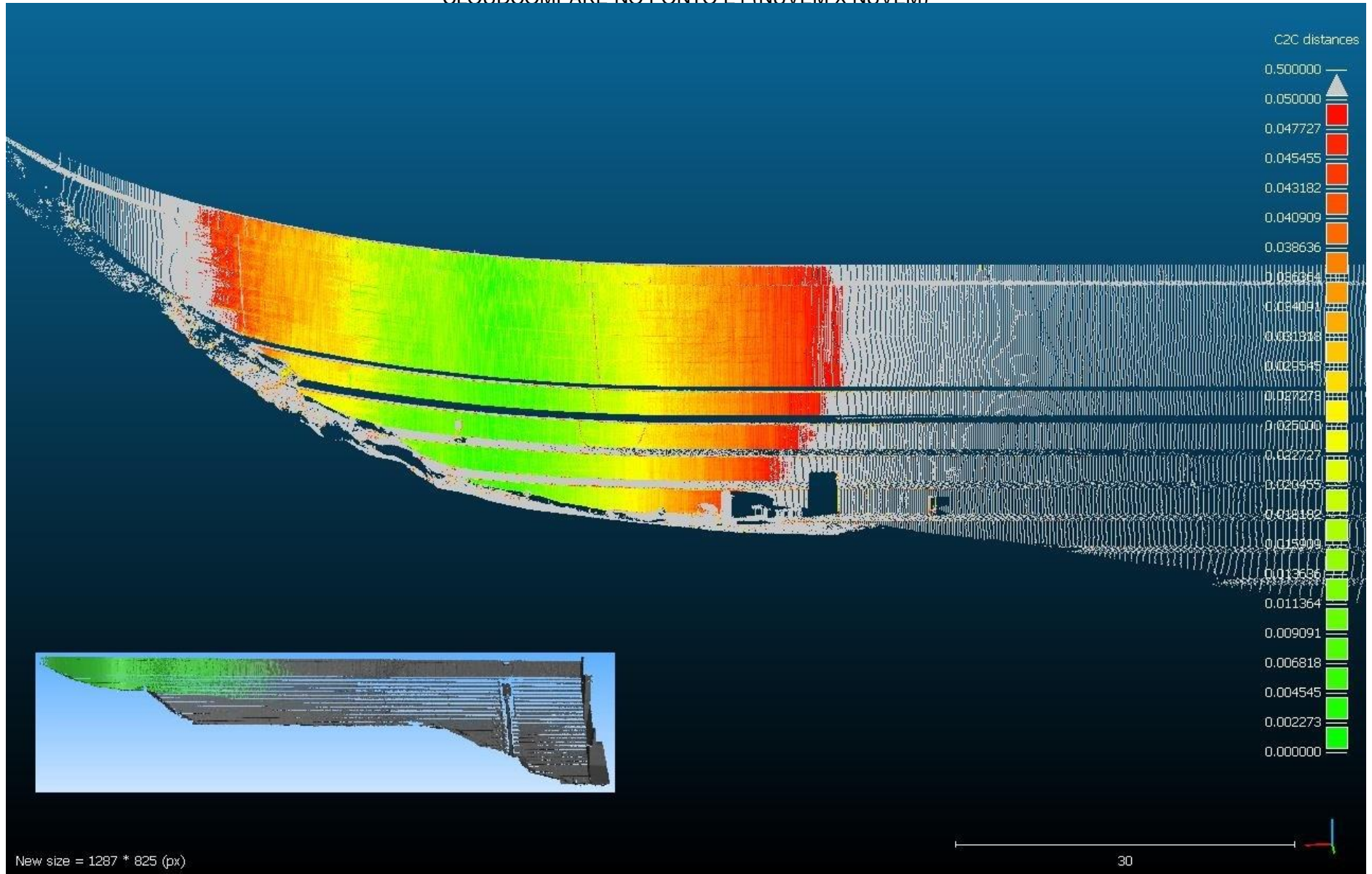
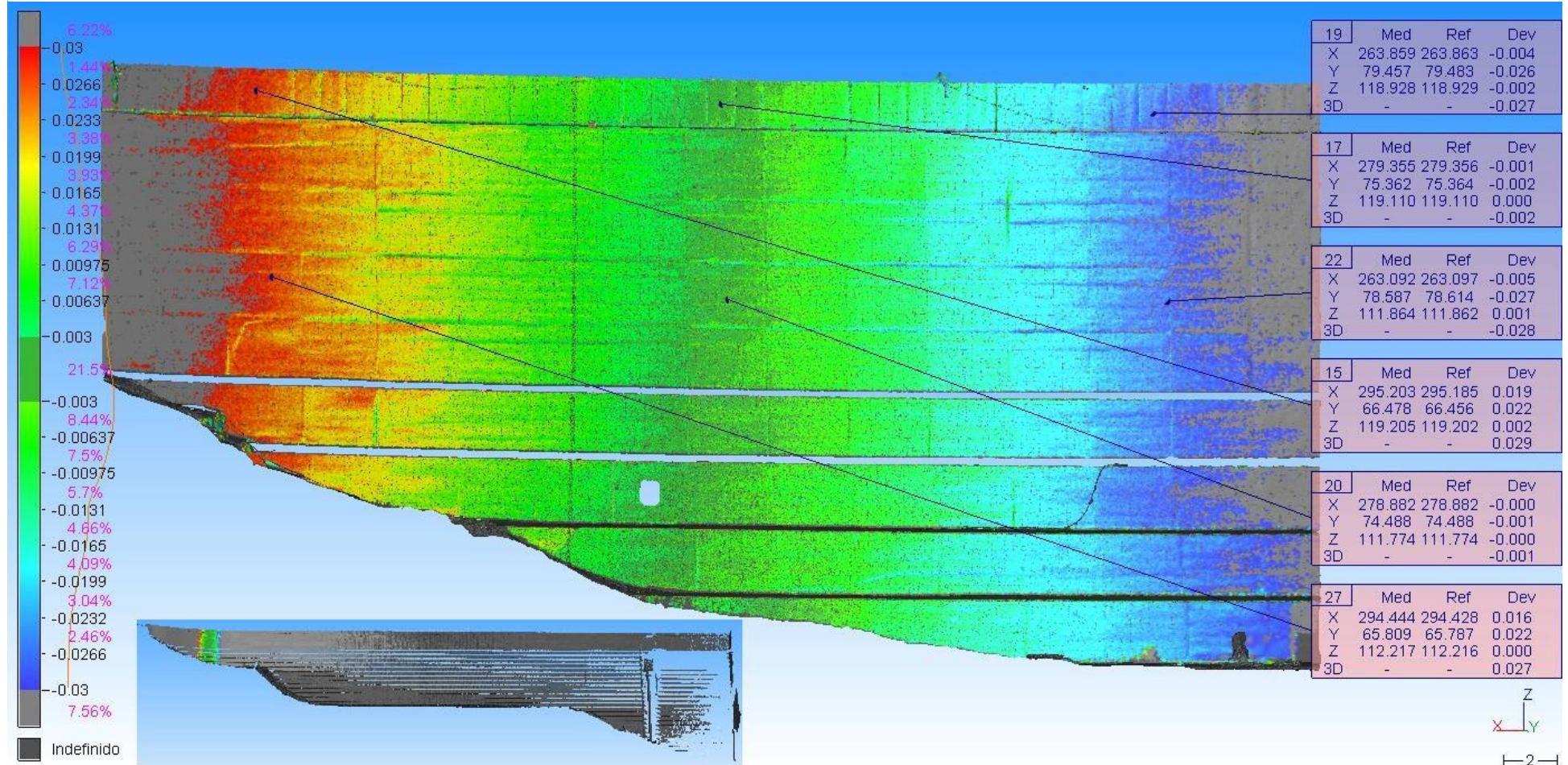




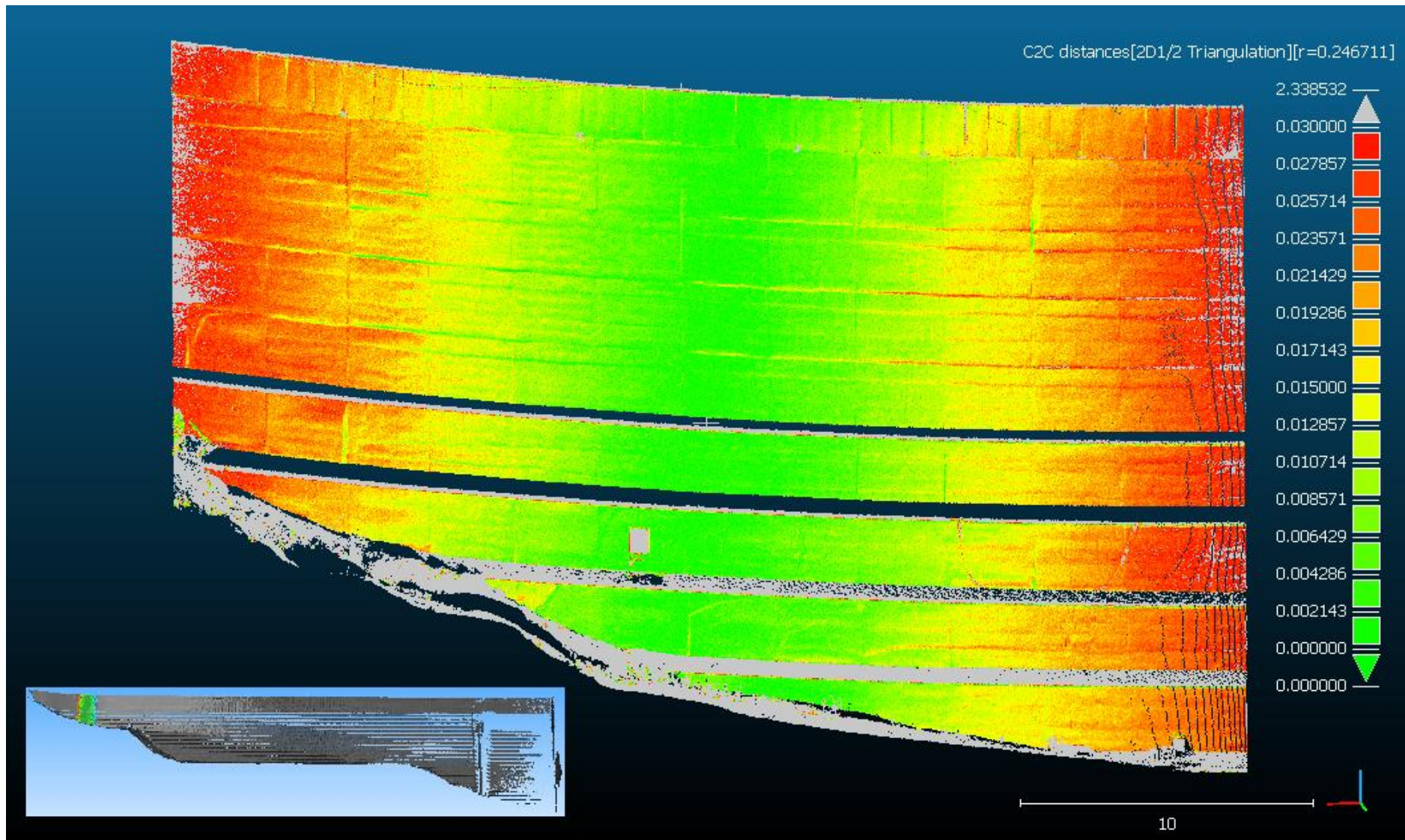
FIGURA 64 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E1 (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR



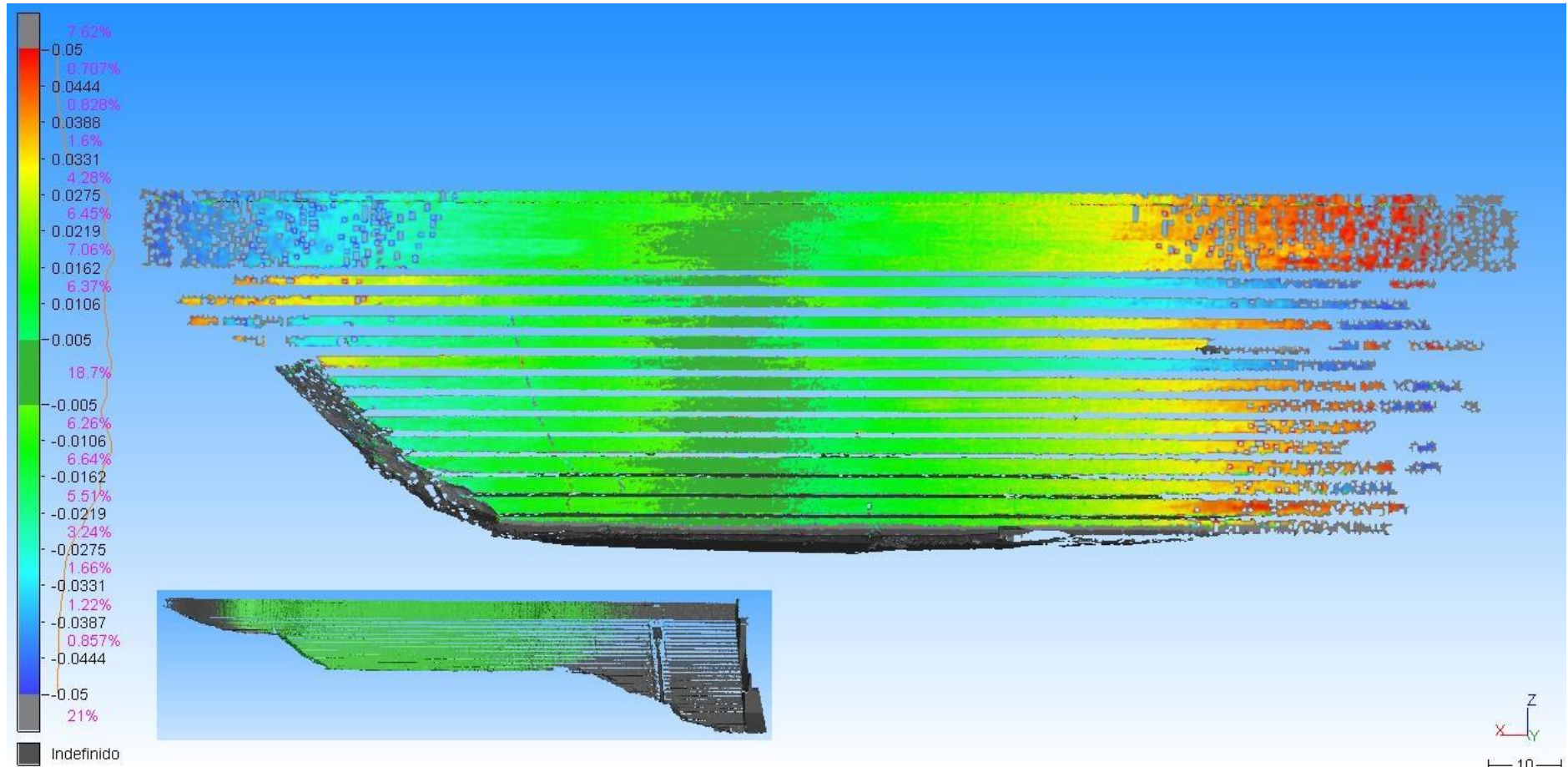
FIGURA 65 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E1 (NUVEM X NUVEM)



FONTE: O AUTOR

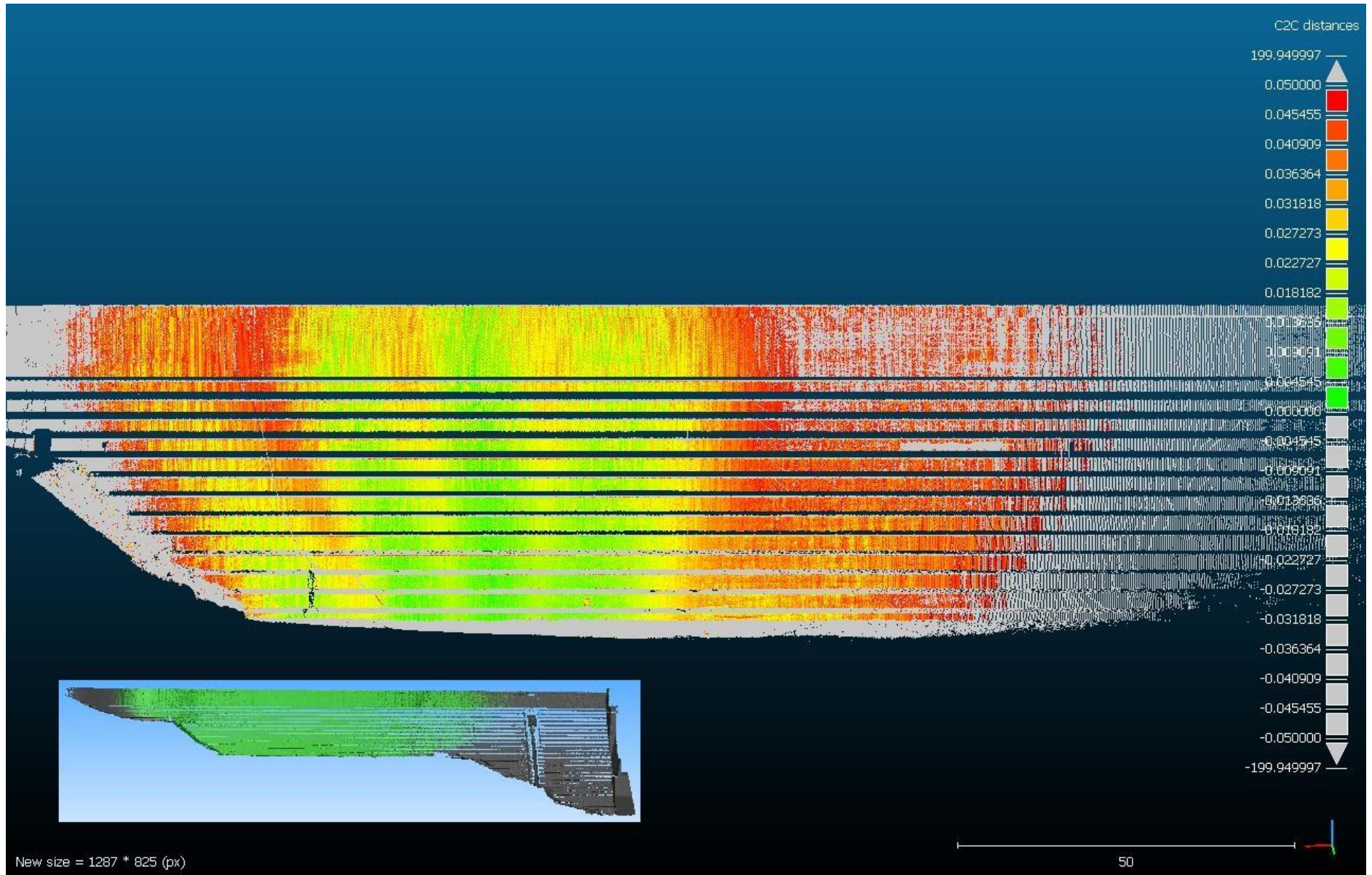


FIGURA 66 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E2 (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR

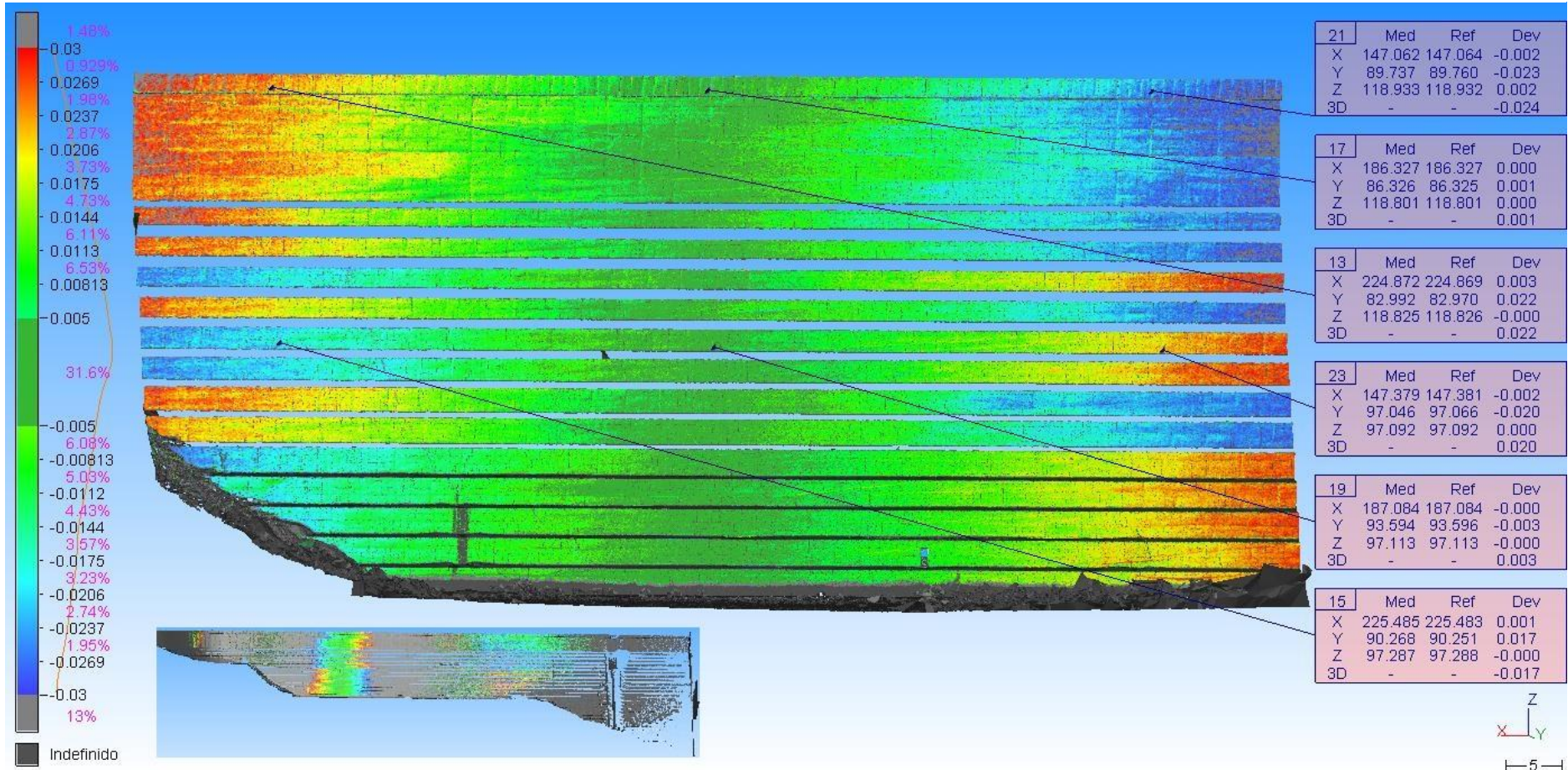
FIGURA 67 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E2 (NUVEM X NUVEM)



FONTE: 2



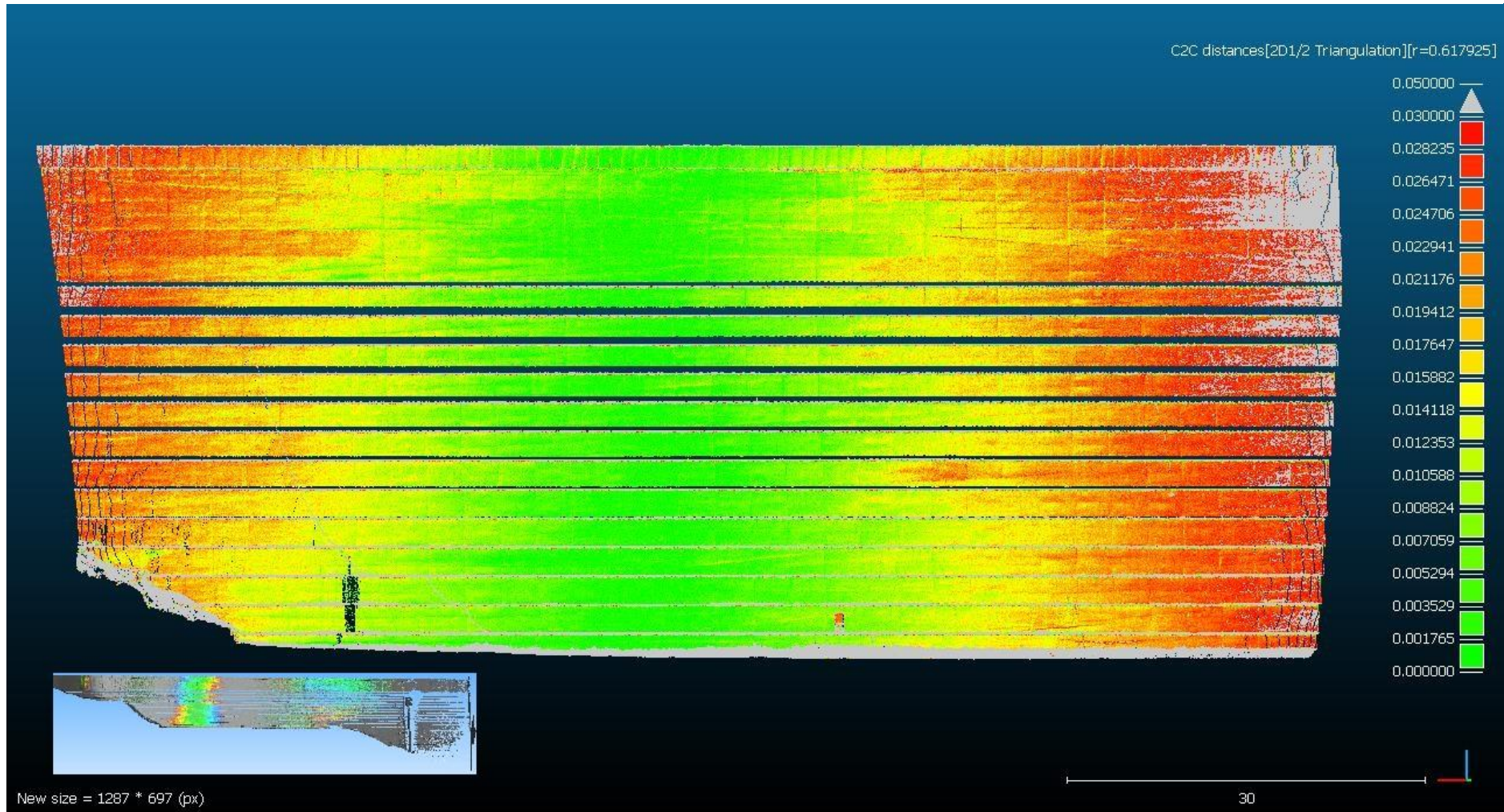
FIGURA 68 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E2 (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR

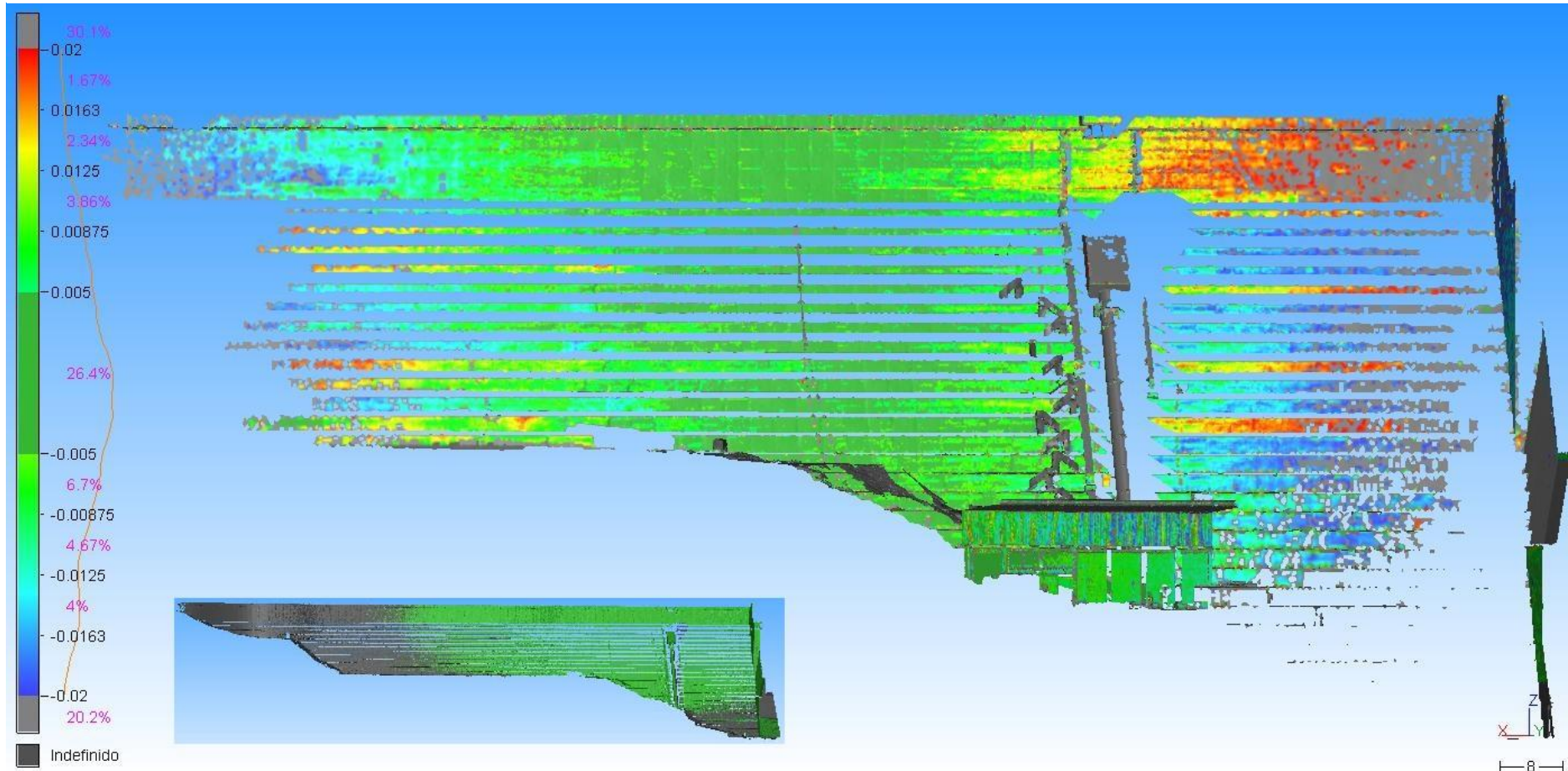


FIGURA 69 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E2 (NUVEM X NUVEM)



FONTE: O AUTOR

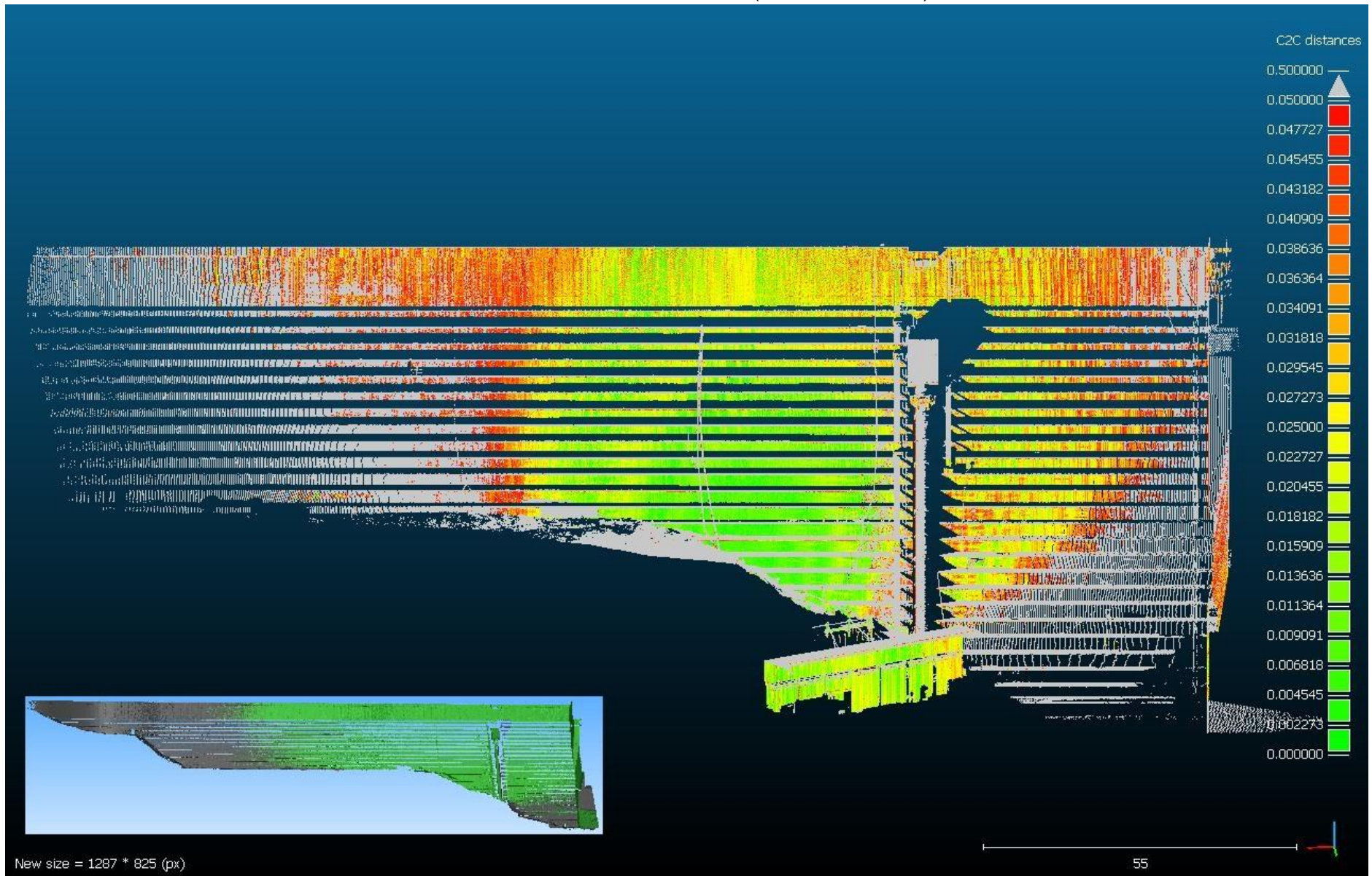
FIGURA 70 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E3 (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR

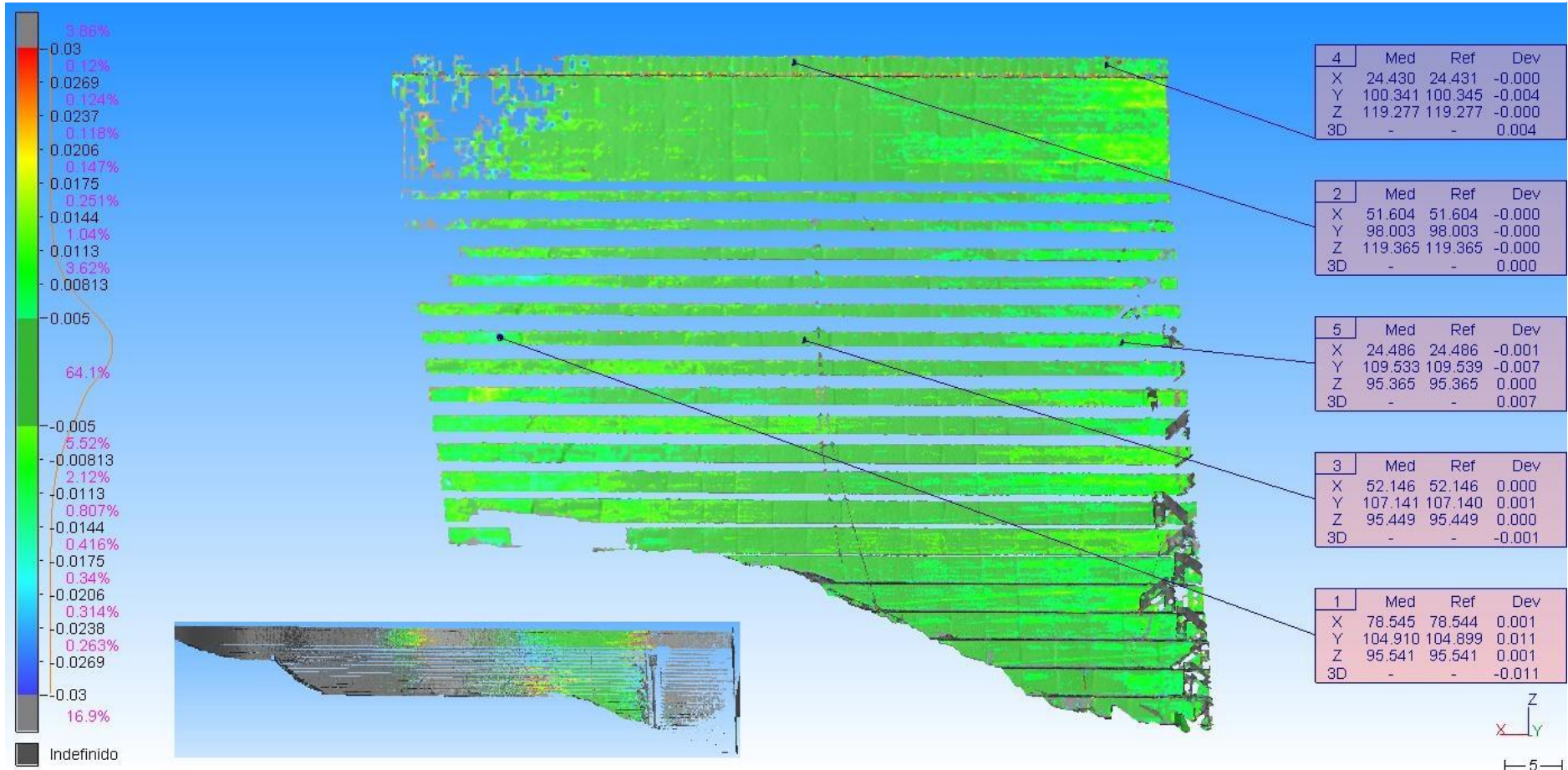


FIGURA 71 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E3 (NUVEM X NUVEM)



FONTE: O AUTOR

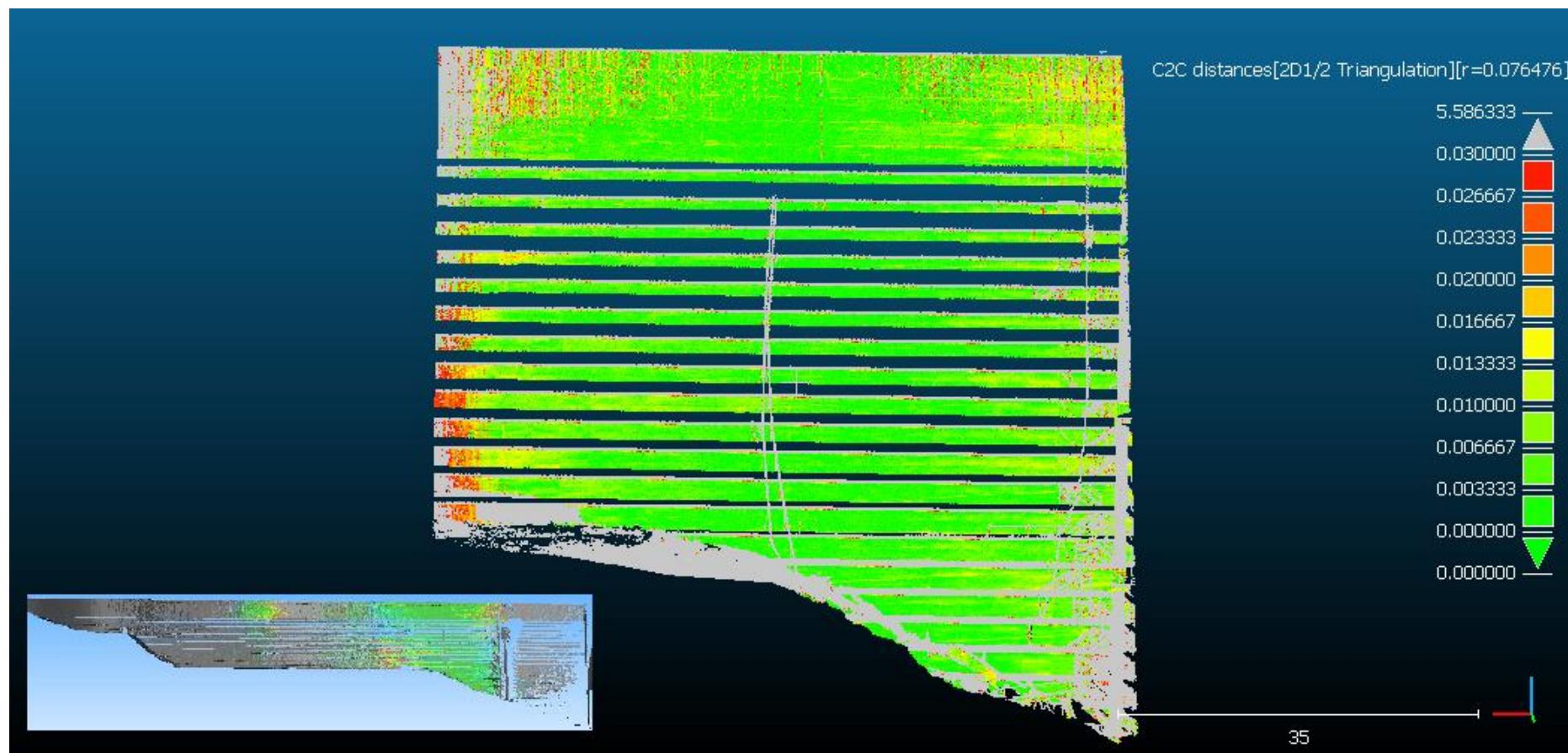
FIGURA 72 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE 3DRESHAPER NO PONTO E3 (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR



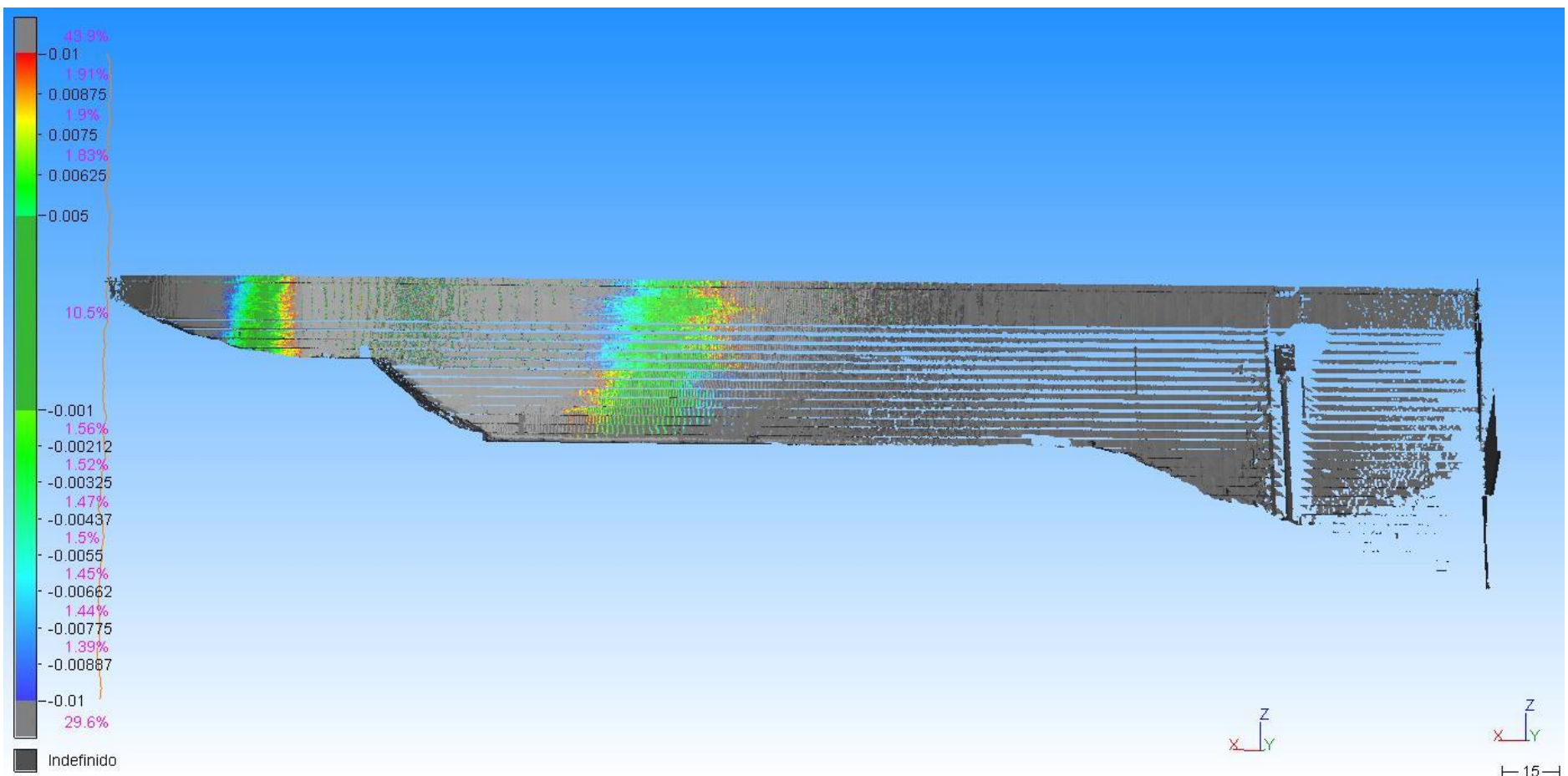
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO FINAL ENTRE ESCANEMANTOS A PARTIR DE UM ÚNICO PONTO EM ÉPOCAS DISTINTAS PELO SOFTWARE CLOUDCOMPARE NO PONTO E3 (NUVEM X NUVEM)



FONTE: O AUTOR

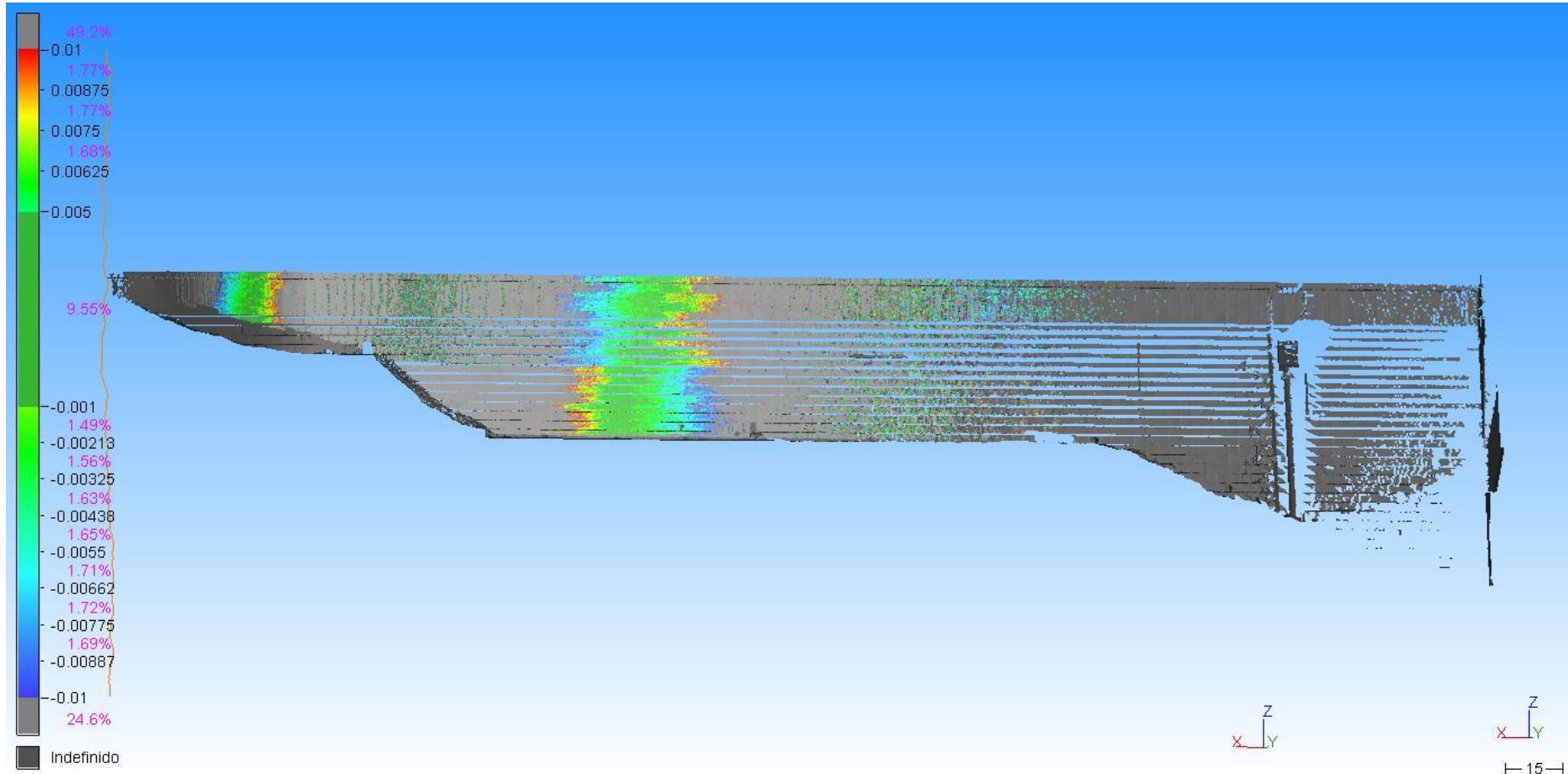
**APÊNDICE II - Imagens complementares das comparações entre  
escaneamentos em um ponto e escaneamentos da estrutura total da barragem**

FIGURA 74 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO A2 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA)



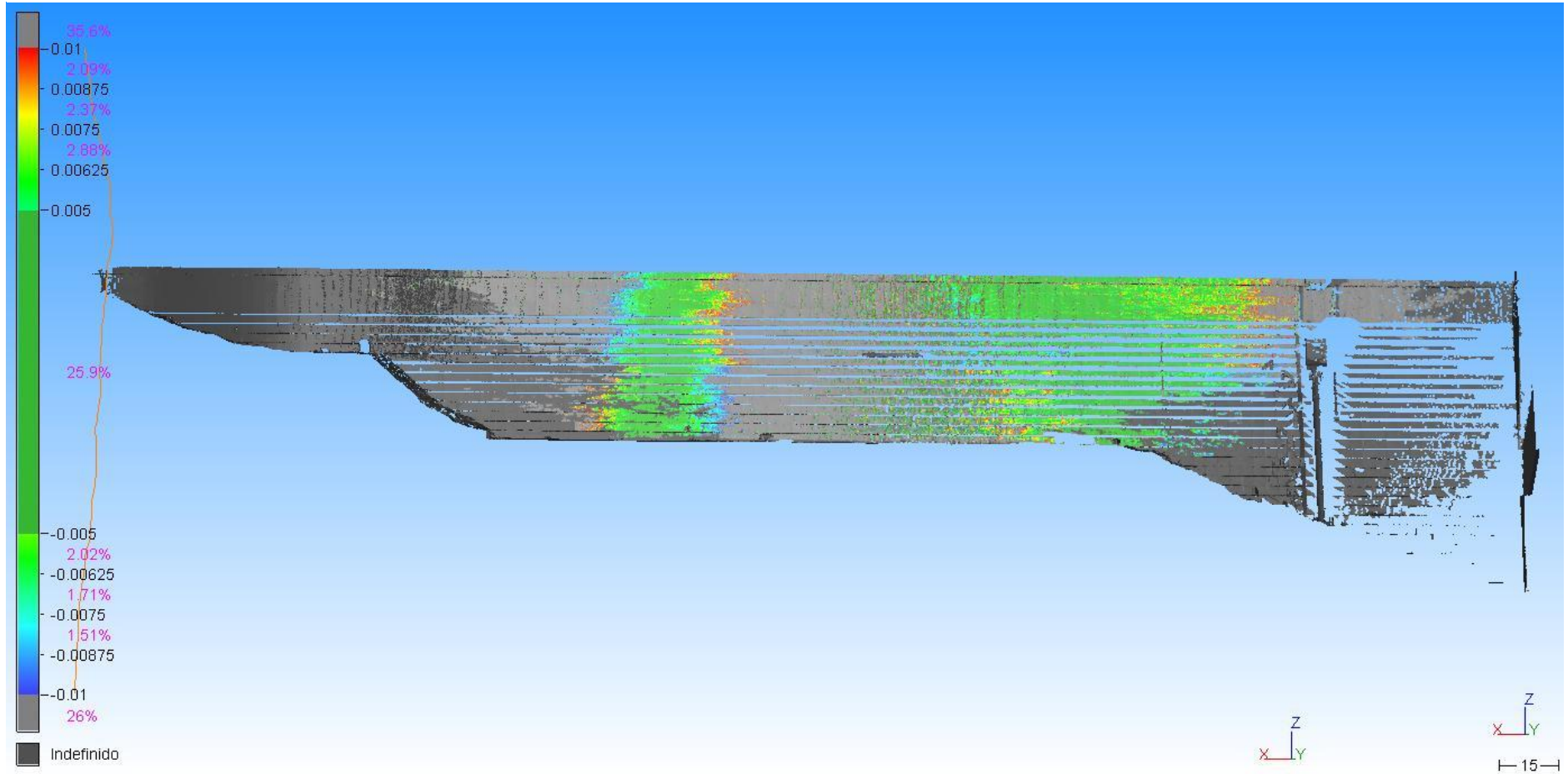
FONTE: O AUTOR

FIGURA 75 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO A3 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR

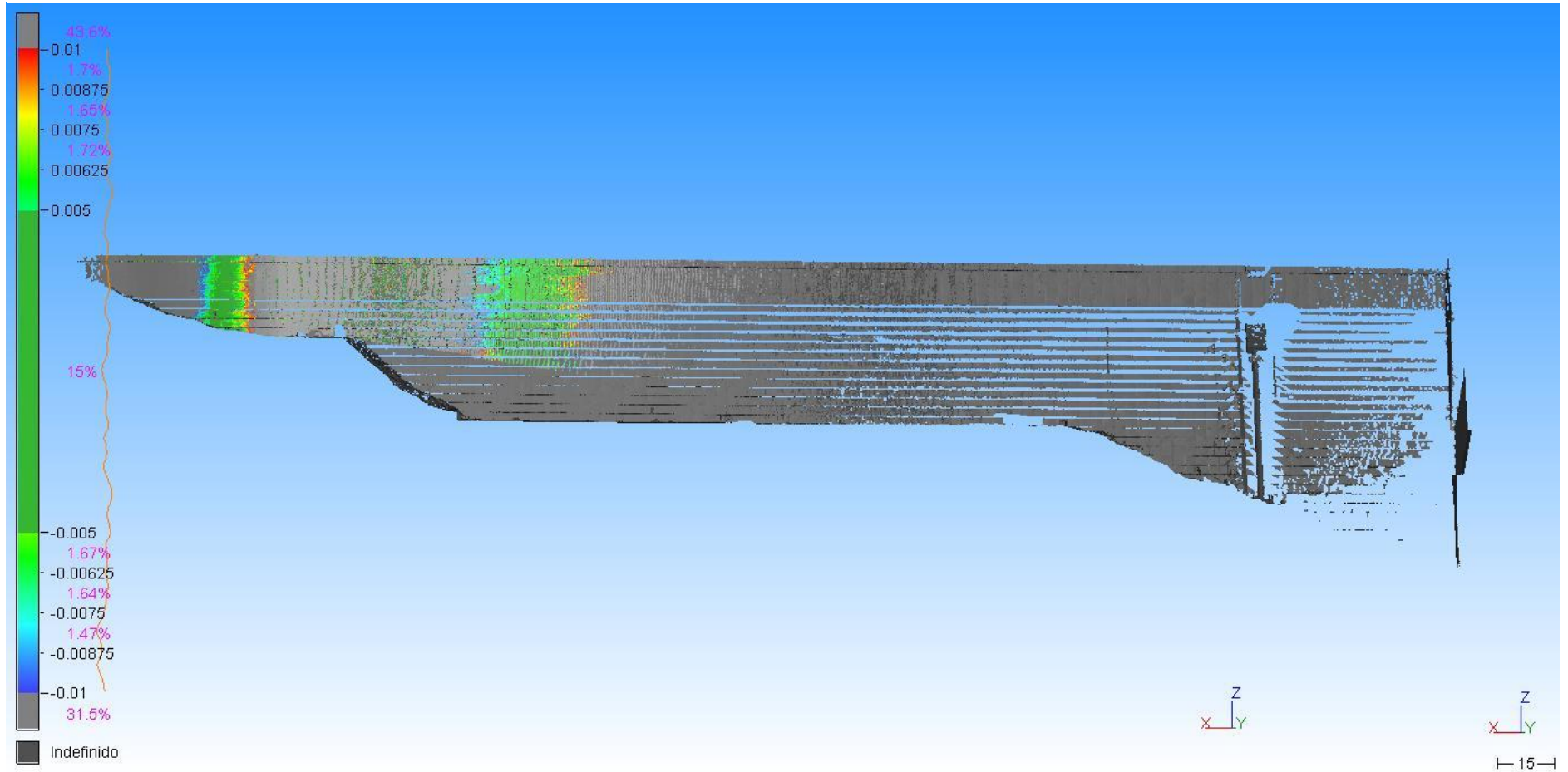
FIGURA 76 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO A4 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR



FIGURA 77 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO E1 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR



FIGURA 78 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO E2 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA)

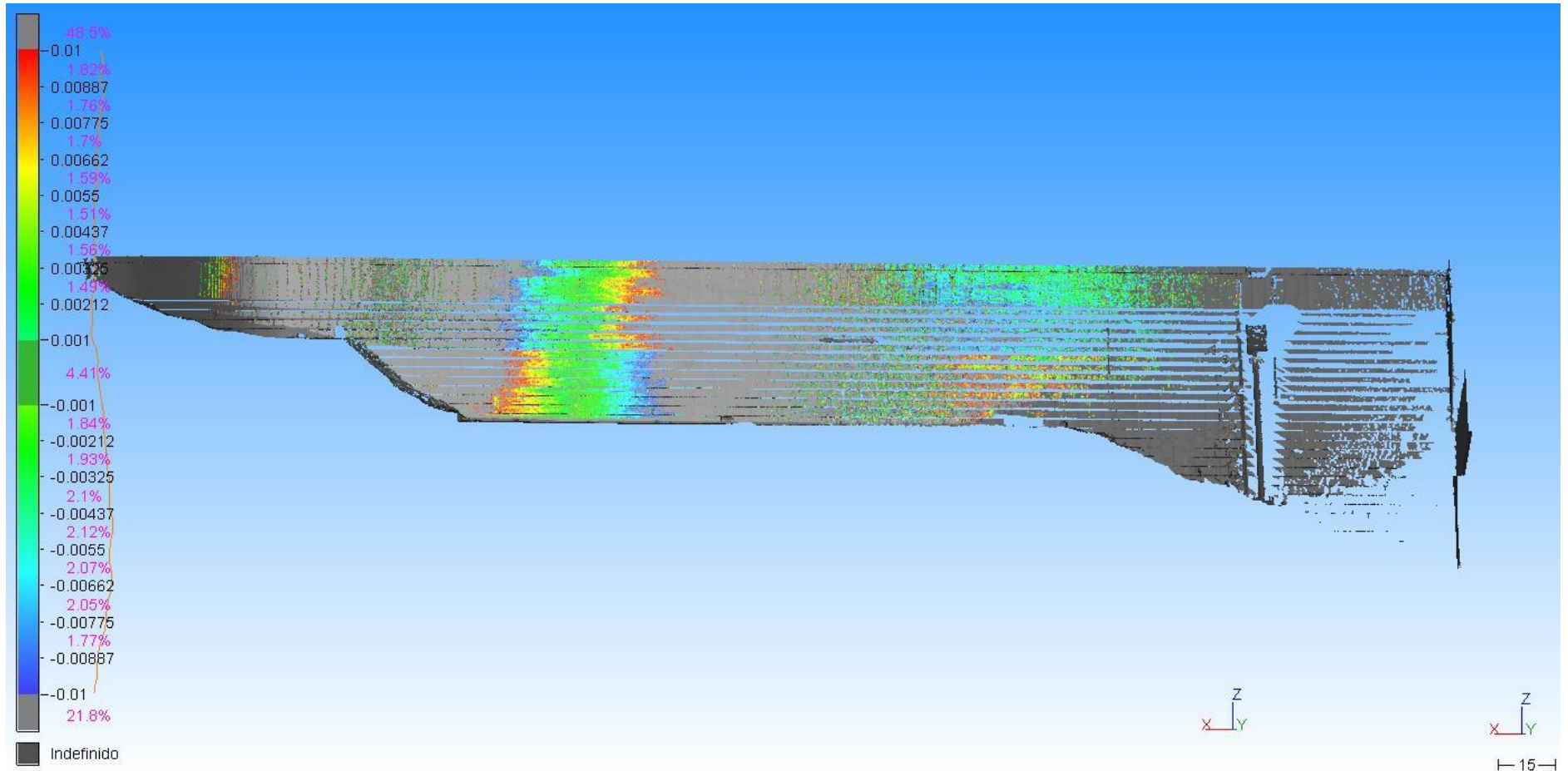
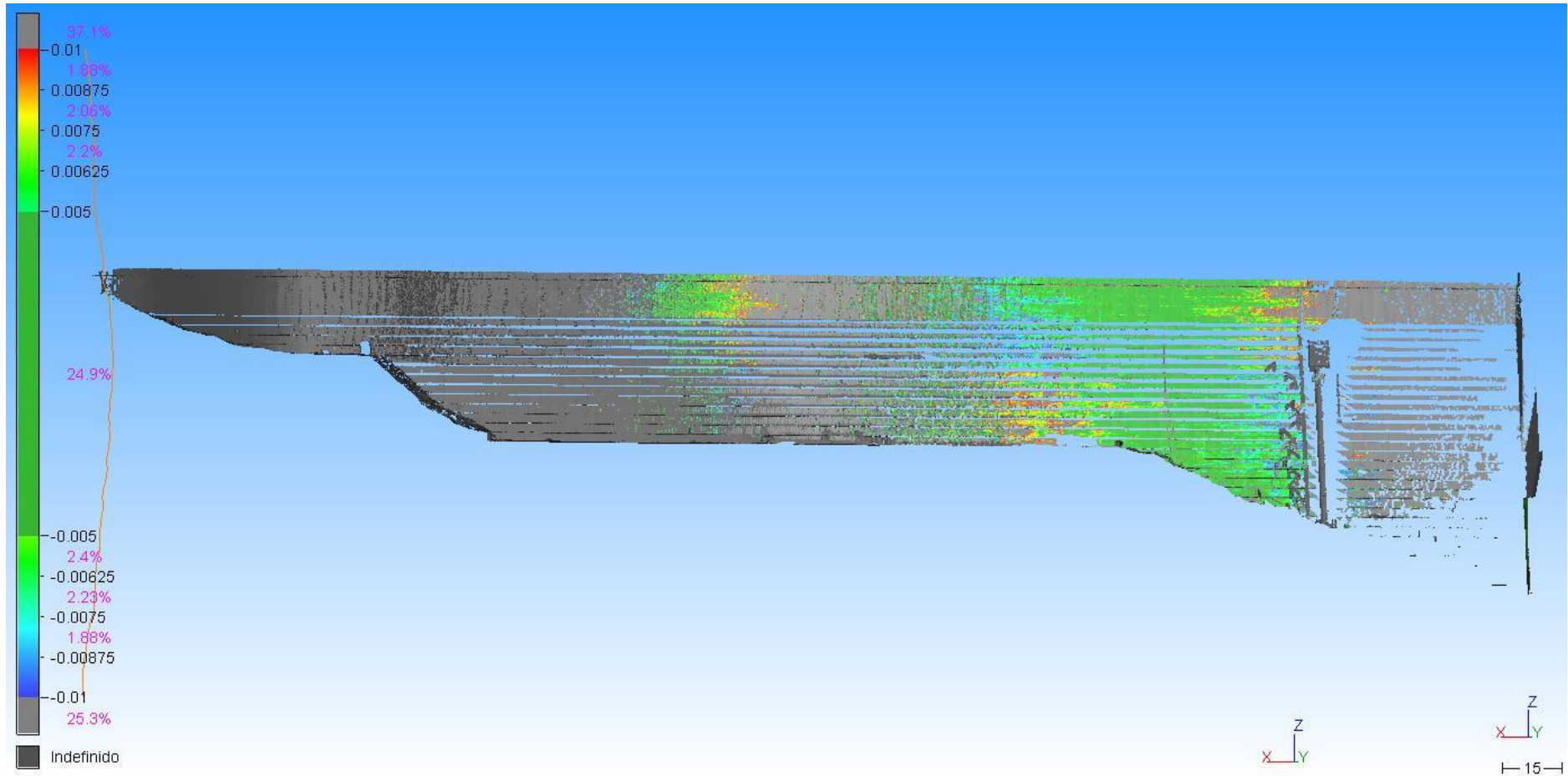


FIGURA 79 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESCANEAMENTO A PARTIR DO PONTO E3 E O ESCANEAMENTO DE TODA A ESTRUTURA (NUVEM X MALHA)



FONTE: O AUTOR