

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

VARREDURA A LASER APLICADA NA
RECONSTRUÇÃO 3D DE BENS MATERIAIS DO
PATRIMÔNIO HISTÓRICO DE IGARASSU E OLINDA

HENRIQUE JOSÉ LINS FERREIRA DE ANDRADE

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler

Dissertação de Mestrado

Recife, 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

Henrique José Lins Ferreira de Andrade

VARREDURA A LASER APLICADA NA RECONSTRUÇÃO 3D DE
BENS MATERIAIS DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO DE IGARASSU E
OLINDA

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação defendida e aprovada no dia 14/09/2012.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler

Recife
2012

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A553v Andrade, Henrique José Lins Ferreira de.
Varredura a laser aplicada na reconstrução 3D de bens materiais do patrimônio histórico de Igarassu e Olinda / Henrique José Lins Ferreira de Andrade. - Recife: O Autor, 2012.
100 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Varredura a Laser. 3. Bens Materiais. 4. Patrimônio Histórico. 5. Igrejas. I. Schuler, Carlos Alberto Borba. (Orientador). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2012-290

**"VARREDURA A LASER APLICADA NA RECONSTRUÇÃO 3D DE BENS
MATERIAIS DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO DE IGARASSU E OLINDA"**

POR

HENRIQUE JOSÉ LINS FERREIRA DE ANDRADE

Dissertação defendida e aprovada em 14/09/2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BORBA SCHULER

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Departamento de Cartografia - Universidade Estadual Paulista



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MEISHTA

Departamento de Geomática - Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. TOMÁS DE ALBUQUERQUE LAPA

Departamento de Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal de Pernambuco

Dedico aos meus pais, Raimundo
Ferreira de Andrade Filho e Tania
Maria Lins de Andrade, pessoas
especiais em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde e o apoio fornecido em mais esta jornada.

À minha família, pelo carinho, dedicação, confiança, estímulo e apoio permanente.

À Ana Cláudia Bezerra de Albuquerque Borborema pelo carinho e compreensão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro que possibilitou por um grande período o encaminhamento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler, pela amizade, orientação dedicada, comentários imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho, pelo apoio e incentivo no decorrer de minha formação acadêmica.

Aos professores(as) Dr. Admilson da Penha Pachêco, Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias, Dr^a. Andréa de Seixas, Dr^a. Lucilene Antunes Correia Marques de Sá, Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés e Dr^a. Verônica Maria Costa Romão pelos ensinamentos e apoio.

Às empresas Santiago & Cintra e Schwab Soluções Topográficas, representadas pelos Engenheiros Cartógrafos Rodrigo Frigato e Claudio David dos Reis Vila Flor respectivamente, pelo auxílio na varredura a *laser* da fachada principal da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda (Olinda/PE).

À empresa CPE Tecnologia, representada pelos Engenheiros Agrimensores Evandro Gomide, Leonardo Venturini e Rodrigo Silva, pelo auxílio nas varreduras a *laser* da fachada principal da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus

(Igarassu/PE) e da fachada principal da Igreja dos Santos Cosme e Damião (Igarassu/PE).

A Geógrafa Betânia Queiroz da Silva pelo auxílio na pesquisa histórica dos objetos de estudo.

Ao amigo Wendson de Oliveira Souza, pela amizade e respeito incontestáveis.

Aos amigos e colegas do mestrado, desejo-lhes sorte e espero que tenham sucesso em suas vidas.

" A simplicidade é o último degrau da sabedoria."

Khalil Gibran

RESUMO

ANDRADE, Henrique José Lins Ferreira de. **Varredura a Laser Aplicada na Reconstrução 3D de Bens Materiais do Patrimônio Histórico de Igarassu e Olinda**. Recife, 2012, 100p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

Como determinadas formas arquitetônicas inseridas no espaço físico no presente, poderiam ser reconstruídas no futuro? A reconstrução tridimensional (3D) de determinado objeto permite sua melhor visualização e assimilação. Todavia, isso só se faz possível quando há precisão nas informações coletadas. Dentre as diversas técnicas existentes para obter estas informações, a varredura a *laser* mostra-se adequada para determinadas situações. O presente trabalho tem por objetivo mostrar as potencialidades da técnica de varredura a *laser* adequada ao levantamento de bens materiais do patrimônio histórico de Igarassu/PE e Olinda/PE. Inicialmente com os objetos de estudo definidos [Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus (Igarassu), Igreja dos Santos Cosme e Damião (Igarassu) e Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda (Olinda)], foram realizadas varreduras a *laser* em campo das fachadas principais destas igrejas e depois foi efetuado o processamento destes dados obtidos através de programas computacionais específicos. Os resultados obtidos através da varredura a *laser*, ou seja, reconstruções tridimensionais das fachadas dos objetos de estudo foram comparados com medições em campo e elevações das fachadas destas igrejas elaboradas por profissionais de Arquitetura. Com isso pode-se constatar algumas vantagens e desvantagens da técnica de varredura a *laser* para a documentação do patrimônio histórico. Portanto, este trabalho pode servir como base para área de projeto de preservação de sítios e monumentos históricos, devido à necessidade de se documentar os objetos de forma rápida e precisa.

Palavras-chave: Varredura a *Laser*; Bens Materiais; Patrimônio Histórico; Igrejas.

ABSTRACT

As certain architectural forms inserted in physical space at present, could be rebuilt in the future? The three-dimensional (3D) reconstruction of the given object allows your best viewing and assimilation. However, this only becomes possible when there is precision in the information collected. Among several existing techniques to obtain this information, the laser scanning shows to be appropriate for certain situations. The present work aims to show the potential of the technique of laser scanning suitable to surveying of material goods of historical heritage of Igarassu/PE and Olinda/PE. Initially with the objects of study defined [Church and Recoil of the Sacred Heart of Jesus (Igarassu), Church of Saints Cosmas and Damian (Igarassu) and Church of the Former Convent of Nossa Senhora of Carmo of Olinda (Olinda)], laser scans were performed in the field of main façades these churches and was later made the processing of these data by specific computer programs. The results obtained through of laser scanning, i.e. three-dimensional reconstructions of façades of objects of study were compared with field measurements and elevations of the façades of these churches prepared by professionals in architecture. With this can see some advantages and disadvantages of laser scanning technique for the documentation of the historical heritage. Therefore, this work can serve as basis for project area of preservation of sites and historical monuments, due to the need to document the objects quickly and accurately.

Keywords: Laser Scanning; Material Goods; Historical Heritage; Churches.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Princípio <i>Time-of-flight</i> .	21
Figura 2 - Princípio <i>Triangulation</i> .	22
Figura 3 - Medição de distância em sistemas de varredura a <i>laser</i> terrestres.	22
Figura 4 - Medição de tempo (<i>Pulsed Laser Scanning</i>) em sistemas de varredura a <i>laser</i> terrestres.	23
Figura 5 - Medição de tempo (<i>Continuous Wave Laser Scanning</i>) em sistemas de varredura a <i>laser</i> terrestres.	23
Figura 6 - Determinação da posição do ponto atingido pelo pulso <i>laser</i> (trajetória paralela aos eixos do sensor).	25
Figura 7 - Determinação da posição do ponto atingido pelo pulso <i>laser</i> (caso bidimensional).	25
Figura 8 - Determinação da posição do ponto atingido pelo pulso <i>laser</i> (caso tridimensional).	26
Figura 9 - <i>Laser scanner</i> terrestre estático Faro Focus 3D.	27
Figura 10 - Parte do sistema cinemático terrestre Lynx Mobile Mapper M1 (vista de topo).	29
Figura 11 - Parte do sistema cinemático terrestre Lynx Mobile Mapper M1 em uma plataforma estabilizada montada sobre um veículo.	30
Figura 12 - Visão de campo (<i>laser scanners</i> e câmaras) no momento da varredura.	31
Figura 13 - Aplicações para o sistema <i>laser scanner</i> terrestre.	32
Figura 14 - Imagem (14a) e Modelo Tridimensional (14b) do quadro da <i>Madonna della Scodella</i> .	33
Figura 15 - O modelo em forma de malha (15a), sombreado (15b) e texturizado (15c) do altar interior da capela contida no <i>Castelo Valer</i> .	34
Figura 16 - O modelo em malha (16a) e texturizado (16b) do interior do <i>Castelo Buonconsiglio</i> .	34
Figura 17 - Teste de carga na ponte de pedra.	35
Figura 18 - Medição de alturas através da nuvem de pontos.	35
Figura 19 - Montagem experimental do forro pré-moldado de concreto.	36
Figura 20 - Forro de concreto pré-moldado pronto para correr sobre um trilho.	36
Figura 21 - Fortalecimento da ponte concluído.	36
Figura 22 - Utilitário com os componentes do sistema cinemático Lynx Mobile Mapper.	37
Figura 23 - Nuvem de pontos do centro da cidade de Brescia.	37
Figura 24 - Níveis de detalhes das informações para conservação do patrimônio (tradução do autor).	40
Figura 25 - Visão geral do <i>laser scanner</i> Z+F IMAGER 5010 e da câmara M-Cam.	41
Figura 26 - Alvos impressos em papel.	42
Figura 27 - Visão geral do <i>laser scanner</i> Topcon GLS-1500 (tradução do autor).	44
Figura 28 - Câmara Não-Métrica Digital Canon EOS 60D.	46
Figura 29 - Fluxograma geral da pesquisa.	48
Figura 30 - Fachada principal da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus.	50
Figura 31 - Fachada principal da Igreja dos Santos Cosme e Damião.	51
Figura 32 - Fachada Principal da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda na época do levantamento de campo desta pesquisa.	53

Figura 33 - Fachada Principal da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda na época da finalização de sua restauração.....	53
Figura 34 - Localizações dos alvos (contidos nos retângulos vermelhos).	55
Figura 35 - Visão geral do levantamento de campo do objeto de estudo 1.	56
Figura 36 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 1.....	56
Figura 37 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 2.....	57
Figura 38 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 3.....	57
Figura 39 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 4.....	58
Figura 40 - Visão geral do levantamento de campo do objeto de estudo 2.	59
Figura 41 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 1.....	59
Figura 42 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 2.....	60
Figura 43 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> na estação 3.....	60
Figura 44 - <i>Laser scanner</i> Topcon GLS-1500 posicionado na estação 1 e orientando-se em relação ao ponto de amarração 1 (P1).	61
Figura 45 - Detalhe do ponto de amarração 3 (P3) da varredura a <i>laser</i>	62
Figura 46 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> e imageamento na estação 1.	62
Figura 47 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> e imageamento na estação 2.	63
Figura 48 - Visão geral parcial da varredura a <i>laser</i> e imageamento do objeto de estudo 3.	63
Figura 49 - Detalhe da varredura a <i>laser</i> e imageamento na estação 3.	64
Figura 50 - Visão geral final da varredura a <i>laser</i> e imageamento do objeto de estudo 3.....	64
Figura 51 - Visão parcial da guia de ferramentas do <i>software</i> PointCloud Pro.	65
Figura 52 - Janela <i>Z+F Import</i>	66
Figura 53 - Importação das varreduras a <i>laser</i> e imageamento do objeto de estudo 1.	66
Figura 54 - Definição das unidades de comprimento na varredura a <i>laser</i> e no desenho.	67
Figura 55 - Alteração do modo de visualização dos dados da varredura a <i>laser</i> no AutoCAD 2012.	67
Figura 56 - Visualização dos dados da varredura a <i>laser</i> em três vistas diferentes (objeto de estudo 1).	68
Figura 57 - Criação das camadas para os dados da varredura a <i>laser</i> (objeto de estudo 1).....	68
Figura 58 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (Passo 1).....	69
Figura 59 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (Passo 2).....	69
Figura 60 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (Passo 3).....	70
Figura 61 - Recorte final da fachada principal do objeto de estudo 1 em três dimensões e com textura fotorealística.	70
Figura 62 - Exportação do recorte final no formato ASCII.	71
Figura 63 - Exportação do recorte final no formato ASCII (Passo 1).	71
Figura 64 - Exportação do recorte final no formato ASCII (Passo 2).	72
Figura 65 - Exportação do recorte final no formato ASCII (Passo 3).	72
Figura 66 - Visualização dos dados da varredura a <i>laser</i> em três vistas diferentes (objeto de estudo 2).	73
Figura 67 - Criação das camadas para os dados da varredura a <i>laser</i> (objeto de estudo 2).....	74
Figura 68 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (Passo 1).....	74
Figura 69 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (Passo 2).....	75
Figura 70 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (Passo 3).....	75

Figura 71 - Recorte final da fachada principal do objeto de estudo 2 em três dimensões e com textura fotorealística.	75
Figura 72 - Importação da varredura a <i>laser</i> (*.las) do objeto de estudo 3 no AutoCAD 2012 (Passo 1).	76
Figura 73 - Importação da varredura a <i>laser</i> (*.las) do objeto de estudo 3 no AutoCAD 2012 (Passo 2).	76
Figura 74 - Conversão do arquivo no formato (*.las) para o formato nativo (*.pcg). .	77
Figura 75 - Visualização dos dados da varredura a <i>laser</i> em três vistas diferentes (objeto de estudo 3).	77
Figura 76 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 3 (Passo 1).	78
Figura 77 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 3 (Passo 2).	78
Figura 78 - Recorte final da fachada principal do objeto de estudo 3 em três dimensões e com textura fotorealística.	78
Figura 79 - Distribuição Normal de Probabilidade	79
Figura 80 - Variabilidade Espacial no Estudo 1.	81
Figura 81 - Zonas de oclusão (retângulos vermelhos) no modelo 3D do objeto de estudo 1.	82
Figura 82 - Variabilidade Espacial no Estudo 2.	84
Figura 83 - Zonas de oclusão no modelo 3D do objeto de estudo 2.	84
Figura 84 - Variabilidade Espacial no Estudo 3.	86
Figura 85 - Zonas de oclusão no modelo 3D do objeto de estudo 3.	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de <i>laser scanners</i> terrestres estáticos baseados no princípio <i>Time-of-Flight</i>	27
Quadro 2 - Exemplos de <i>laser scanners</i> terrestres estáticos baseados no princípio <i>Phase-Shift</i>	28
Quadro 3 - Exemplo de <i>laser scanner</i> terrestre estático que combina os princípios <i>Time-of-Flight</i> e <i>Phase-Shift</i>	28
Quadro 4 - Especificações técnicas do sistema cinemático Lynx Mobile Mapper: Modelos V200 e M1 – (tradução do autor).....	31
Quadro 5 - Relação entre as escalas e as tolerâncias admitidas.	40
Quadro 6 - Especificações Técnicas – <i>Laser Scanner Z+F IMAGER 5010</i> (tradução do autor) – Parte 1.	42
Quadro 7 - Especificações Técnicas – <i>Laser Scanner Z+F IMAGER 5010</i> (tradução do autor) – Parte 2.	43
Quadro 8 - Especificações Técnicas – <i>Laser Scanner Topcon GLS-1500</i> (tradução do autor).	45
Quadro 9 - Especificações técnicas da estação de trabalho.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparações entre medições de distâncias em campo e no modelo 3D.	80
Tabela 2 - Comparações entre medições de distâncias realizadas na elevação analógica e no modelo 3D.....	82
Tabela 3 - Comparações entre medições de distâncias realizadas na elevação digital e no modelo 3D.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D: Três dimensões espaciais

CIPA: *Comité International de Photogrammétrie Architecturale*

CMOS: *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

CPU: *Central Processing Unit*

DMI: *Distance Measurement Indicator*

FUNDARPE: Fundação do Patrimônio Histórico e Artístico de Pernambuco

GNSS: *Global Navigation Satellite Systems*

GPS: *Global Positioning System*

ICOMOS: *International Council on Monuments and Sites*

IMU: *Inertial Measurement Unit*

IPHAN: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

ISPRS: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

JPEG: *Joint Photographic Experts Group*

LADAR: *Laser Detection and Ranging*

LASER: *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*

LIDAR: *Light Detection and Ranging*

SCSI: *Small Computer System Interface*

SIRGAS2000: Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SPHAN: Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

USB: *Universal Serial Bus*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 O SISTEMA LASER SCANNER TERRESTRE.....	20
2.1.1 Introdução	20
2.1.2 Princípios de medição em sistemas de varredura a <i>laser</i> terrestres.....	21
2.1.3 Tipos de sistemas de varredura a <i>laser</i> terrestres	26
2.1.4 Exemplos de aplicações do sistema <i>laser scanner</i> terrestre	32
2.1.4.1 Documentação do patrimônio cultural	33
2.1.4.2 Análise de deformações em Pontes	35
2.1.4.3 Levantamentos detalhados de centros urbanos.....	37
2.2 RAZÕES PARA DOCUMENTAÇÃO PRECISA DO PATRIMÔNIO CULTURAL	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS DURANTE A PESQUISA	41
3.1.1 <i>Laser scanner</i> terrestre estático Zoller+Fröhlich Z+F IMAGER 5010.....	41
3.1.2 <i>Laser scanner</i> terrestre estático Topcon GLS-1500	44
3.1.3 Câmara fotográfica digital Canon EOS 60D	46
3.1.4 Acessórios adicionais.....	46
3.1.5 Estação de trabalho	46
3.1.6 Aplicativos utilizados	47
3.1.7 Dados auxiliares.....	47
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	48
3.2.1 Levantamento dos dados básicos	49
3.2.2 Definição dos objetos de estudo	49
3.2.2.1 Objeto de Estudo 1 - Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus.....	49
3.2.2.2 Objeto de Estudo 2 - Igreja dos Santos Cosme e Damião	50
3.2.2.3 Objeto de Estudo 3 - Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda	52
3.2.3 Varredura a <i>laser</i> e imageamento dos objetos de estudo.....	54
3.2.3.1 Objeto de estudo 1	54
3.2.3.2 Objeto de estudo 2	58
3.2.3.3 Objeto de estudo 3	61
3.2.4 Processamento dos dados	65
3.2.4.1 Objeto de Estudo 1	65
3.2.4.2 Objeto de Estudo 2	73
3.2.4.3 Objeto de Estudo 3	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1 Objeto de Estudo 1	80
4.2 Objeto de Estudo 2	82
4.3 Objeto de Estudo 3	85
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
REFERÊNCIAS	89

ANEXO A – Elevação da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus, registro nº 223, em meio analógico, na escala 1:100, de 6 de abril de 1955	92
ANEXO B – Elevação arquitetônica da fachada principal da Igreja dos Santos Cosme e Damião, registro nº 2376, em meio analógico, na escala 1:50, de 24 de agosto de 2000	93
ANEXO C – Elevação arquitetônica da fachada frontal e fachada oeste da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda, registro nº P 06/13, em meio digital, na escala 1:100, de janeiro de 2001	94
ANEXO D – Resultado Final do Objeto de Estudo 1	95
ANEXO E – Resultado Final do Objeto de Estudo 2	96
ANEXO F – Resultado Final do Objeto de Estudo 3.....	97
ANEXO G – Esquema utilizado para definir a localização dos pontos de medições sobre o objeto de estudo 1	98
ANEXO H - Esquema utilizado para definir a localização dos pontos de medições sobre o objeto de estudo 2.....	99
ANEXO I- Esquema utilizado para definir a localização dos pontos de medições sobre o objeto de estudo 3.....	100

1 INTRODUÇÃO

A Arquitetura e o Urbanismo são áreas do conhecimento que necessitam frequentemente do levantamento e da documentação de objetos existentes, seja para o desenvolvimento de novos projetos ou ainda de restauração, reforma, ampliação, seja para o estudo e planejamento de cidades.

Em 1964, na Carta de Veneza, foi manifestada a necessidade de se efetuar levantamentos arquitetônicos precisos e detalhados que permitissem encontrar a forma real do monumento, e a Fotogrametria foi definida como a técnica mais apropriada para esta finalidade.

O termo Fotogrametria é derivado de três palavras gregas, *photos* que significa luz, *gramma* que significa algo desenhado ou escrito e *metron* que significa medir. Portanto, originalmente significava medir graficamente por meio da luz (MCGLONE, 2004, p. 1).

No ano de 1968, o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (*International Council on Monuments and Sites* - ICOMOS) organizou em Paris o primeiro simpósio internacional dedicado à aplicação da Fotogrametria em estudos necessários para a conservação dos monumentos, e em 1969 se constituiu o Comitê Internacional de Fotogrametria Arquitetônica (*Comité International de Photogrammétrie Architecturale* - CIPA) em colaboração com a Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* - ISPRS). O objetivo principal da CIPA é fornecer um fórum internacional e ponto focal para unir esforços na melhoria de todos os métodos para levantamento de monumentos e sítios culturais.

Em vista dos desenvolvimentos ocorridos posteriormente, a definição de Fotogrametria foi expandida para: “fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e do meio ambiente através do processo de gravação, mensuração e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos” (SLAMA, 1980 apud MCGLONE, 2004, p. 2). Com o grande avanço da Informática nas últimas décadas e, também, com a produção de equipamentos computacionais cada vez mais velozes no processamento e maior capacidade de armazenamento dos dados, a Fotogrametria e o desenvolvimento de seus produtos deram um

grande salto em questões de precisão, acurácia, qualidade de imagem, diversificação maior de produtos e velocidade na obtenção dos mesmos.

A combinação de todos os aspectos da Fotogrametria com outros métodos de levantamento é considerada como uma importante contribuição para o registro e monitoramento do patrimônio cultural, preservação e restauração de qualquer valor arquitetônico ou outro monumento cultural, objeto ou sítio, e para fornecer suporte para pesquisas arquitetônicas, arqueológicas e outras pesquisas artístico-históricas (PATIAS et al., 2008).

Nos últimos anos, uma nova técnica de levantamento, complementar à Fotogrametria, chamada de varredura a *laser*, primeiramente desenvolvida para fins industriais, tem-se mostrado como uma poderosa técnica para o levantamento e modelagem de objetos de diversos tipos, com tamanho e complexidade variados (centros urbanos, edificações, detalhes arquitetônicos, esculturas, dentre outros não menos importantes).

Apesar das vantagens de utilização e das facilidades oferecidas pela varredura a *laser* para a documentação de formas arquitetônicas, esta técnica ainda é pouco utilizada no Brasil. A maioria dos trabalhos sobre varredura a *laser* aplicados à Arquitetura e ao Urbanismo têm sido desenvolvidos por universidades e instituições de pesquisa no âmbito nacional e internacional, e divulgadas principalmente nos anais dos simpósios e conferências do ICOMOS, da ISPRS e do CIPA.

Dentro do escopo da linha investigativa proposta nesta dissertação pode-se formular a seguinte hipótese científica: a utilização de dados de varredura a *laser* permite a criação de produtos adequados à finalidade de documentação de bens materiais do patrimônio cultural.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo mostrar as potencialidades da técnica de varredura a *laser* adequada ao levantamento e documentação de bens materiais do patrimônio histórico.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como partes fundamentais para atingir o objetivo geral foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- estudar os fundamentos da técnica de varredura a *laser*;
- registrar através da técnica de varredura a *laser* fachadas principais de templos católicos, dos séculos XVI, XVII e XVIII que constituem bens materiais do patrimônio histórico das cidades de Igarassu e Olinda;
- comparar e analisar os produtos obtidos pela técnica de varredura a *laser* em relação aos produtos obtidos por profissionais de Arquitetura;
- contribuir para a difusão da técnica de varredura a *laser* na documentação de bens materiais do patrimônio histórico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O SISTEMA LASER SCANNER TERRESTRE

2.1.1 Introdução

Desde a sua introdução na década de 1960, o *laser* tem assumido um papel central em medições acuradas nos ambientes naturais. O histórico da varredura a *laser* iniciou em 1958 quando dois cientistas, Charles Townes e Arthur Schawlow, sugeriram que um feixe estreito de intensa radiação monocromática teria um grande potencial de viajar grandes distâncias de modo preciso (PRINCE e UREN, 1989 apud HERITAGE e LARGE, 2009, p.1).

O período 1962-1968 viu desenvolvimentos básicos da tecnologia *laser* ["LASER" é um acrônimo para (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* - Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)], e foi seguido em 1970 por um período de melhoria da confiabilidade da técnica. Não demorou muito para que o potencial desta tecnologia fosse reconhecido. Os primeiros instrumentos de levantamento foram desenvolvidos especificamente para uso em laboratório, o primeiro *laser* foi comercializado a partir de 1971.

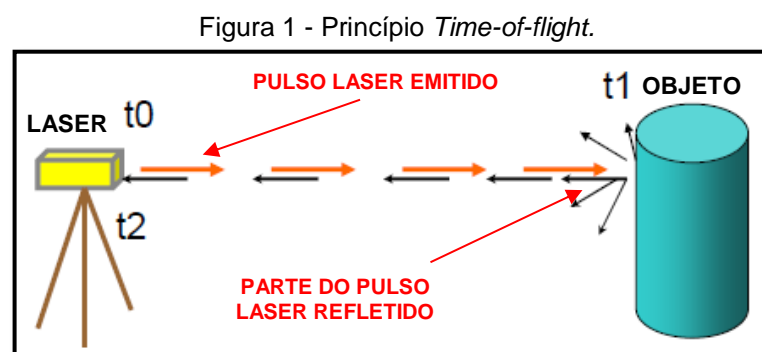
Apesar de problemas de confiabilidade (os primeiros instrumentos só tinham uma vida útil de 1000 horas), o sucesso comercial seguiu a década de 1970 onde se verificou uma rápida absorção no uso de *lasers* em levantamentos de engenharia e construção civil. Os cientistas rapidamente adaptaram-se a nova tecnologia, e nos anos, e nas décadas de 1980 e 1990, houve uma ampla gama de aplicações em sistemas ambientais.

Hoje, a instrumentação a *laser* é padrão em uma ampla gama de aplicações. Desde o final do século 20, o ritmo do progresso tecnológico tem crescido bastante e os cientistas têm agora a capacidade de medir rapidamente os sistemas ambientais “praticamente” na sua totalidade.

Ainda não foi definida uma nomenclatura para o sistema *Laser*. Alguns autores defendem a ideia de LADAR (*Laser Detection and Ranging* – Detecção e medição de distância usando *laser*), outros preferem LIDAR (*Light Detection and Ranging* – Detecção e medição de distância usando a luz). No entanto, o termo LADAR é mais utilizado por caracterizar o uso de *laser* (DALMOLIN e SANTOS, 2004, p.2). Ao longo deste texto, os termos “*laser scanner*” e “*varredura a laser*” serão utilizados com o mesmo significado.

2.1.2 Princípios de medição em sistemas de varredura a *laser* terrestres

Segundo (DALMOLIN e SANTOS, 2004) existem basicamente dois princípios distintos de medida a *laser* de distância: o princípio que se baseia no intervalo de tempo decorrido desde o instante da emissão do pulso *laser* até o instante do retorno do mesmo refletido pelo objeto (*Time-of-Flight* – figura 1) e o princípio baseado na triangulação (*Triangulation* – figura 2).



Fonte: Adaptado de CENTENO et al., 2007.

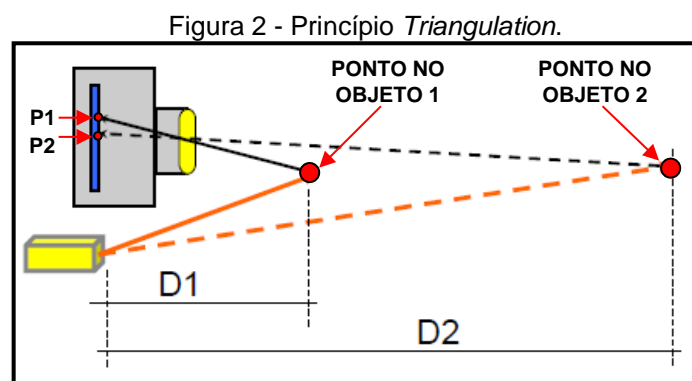
Onde:

t_0 : O pulso *laser* é emitido na direção do objeto.

t_1 : Ao atingir a superfície do objeto, parte do pulso *laser* é refletido na direção do sensor.

t_2 : No sensor, são medidos: o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno; e a intensidade do retorno.

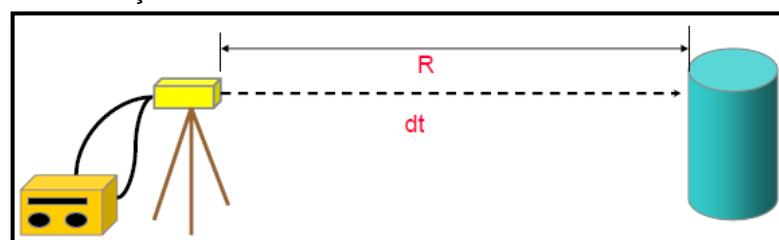
No princípio *Triangulation* os sistemas utilizam um emissor *laser* e uma câmara para determinar a posição do ponto atingido pelo pulso *laser*. Dependendo da distância entre o sensor e o objeto (D_1 e D_2), o pulso *laser* refletido pelo objeto aparece em lugares diferentes no plano da imagem (P1 e P2). A câmara, o ponto no objeto e o emissor *laser* formam um triângulo (triangulação).



Fonte: Adaptado de CENTENO et al., 2007.

A distância entre o sensor e o objeto pode ser calculada a partir do tempo decorrido entre a emissão e o registro do retorno (figura 3).

Figura 3 - Medição de distância em sistemas de varredura a *laser* terrestres.



Fonte: CENTENO et al., 2007.

Através da equação 1, temos o procedimento de cálculo da distância:

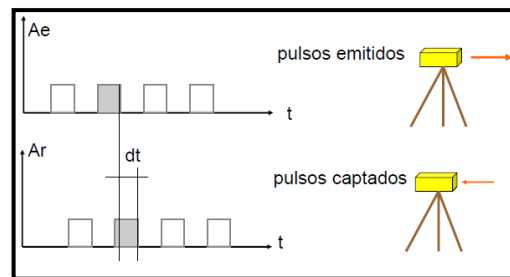
$$c = \frac{d}{t} \quad \longleftrightarrow \quad c = \frac{2 \times R}{dt} \quad \longleftrightarrow \quad \text{Logo, } R = \frac{c \times dt}{2} \quad (1)$$

Onde:

c: velocidade da luz; **d**: distância; **t**: tempo; **R**: distância entre o sensor e o objeto;
dt: diferencial de tempo.

Verifica-se que na equação acima se tem como incógnita o diferencial de tempo (dt). Este tempo pode ser medido através de duas alternativas: o sistema de pulsos (*Pulsed Laser Scanning*) e o sistema de onda contínua (*Continuous Wave Laser Scanning*). Na primeira alternativa - *Pulsed Laser Scanning* (figura 4) o retardo do pulso refletido e captado possibilita determinar a distância (R) como mostrado na equação 1.

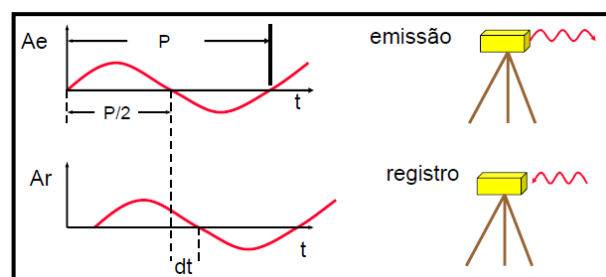
Figura 4 - Medição de tempo (*Pulsed Laser Scanning*) em sistemas de varredura a laser terrestres.



Fonte: CENTENO et al., 2007.

Na segunda alternativa - *Continuous Wave Laser Scanning* (figura 5), o intervalo entre a emissão e registro do retorno é determinado calculando a diferença de fase (*Phase-Shift*) entre a onda de retorno em relação à onda emitida.

Figura 5 - Medição de tempo (*Continuous Wave Laser Scanning*) em sistemas de varredura a laser terrestres.



Fonte: CENTENO et al., 2007.

Nesta alternativa a distância (R) pode ser calculada da seguinte forma:

$$P \cong 2 \times \pi \quad (2)$$

$$dt \cong \phi \quad (3)$$

Então:

$$dt = \frac{\phi \times P}{2 \times \pi} + n \times P \quad (4)$$

Onde:

P: período da onda; **dt**: retardo da onda; **Φ**: diferença de fase; **n**: número de ciclos completos que podem ser desprezados.

Desta forma:

$$dt = \frac{\phi \times P}{2 \times \pi} \quad (5)$$

ou, em termos de frequência (f):

$$dt = \frac{\phi}{2 \times \pi \times f} \quad (6)$$

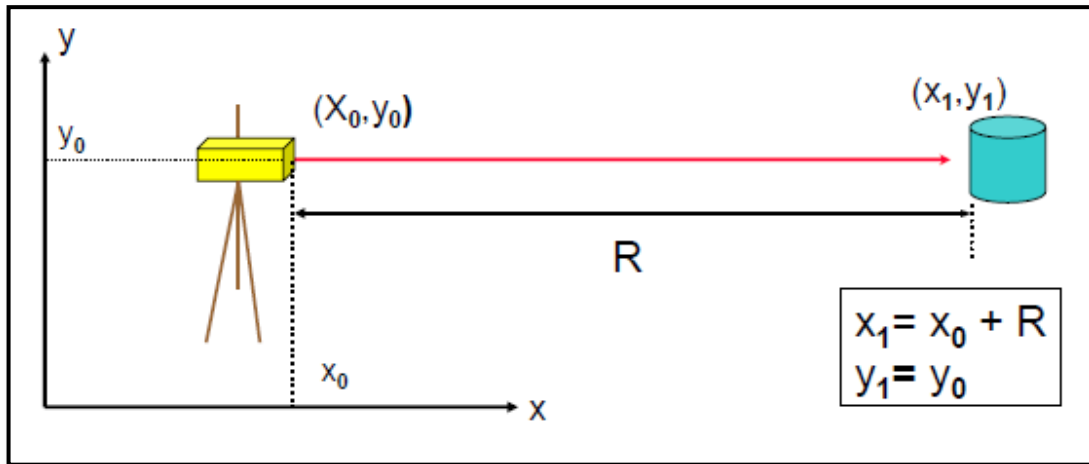
Substituindo a equação 6 na equação 1, temos para distância (R) a seguinte equação:

$$R = \frac{c \times \phi}{4 \times \pi \times f} \quad (7)$$

De modo a exemplificar algumas situações que podem acontecer na prática, a seguir temos três situações onde é necessário determinar a posição do ponto atingido pelo pulso *laser* conhecendo-se alguns parâmetros a priori:

Situação 1: Conhecendo a distância entre o objeto e o sensor (R) e a posição do sensor (X_0, Y_0). É possível determinar a posição do ponto atingido (X_1, Y_1), se o pulso percorre uma trajetória paralela aos eixos do sensor, da seguinte forma (figura 6):

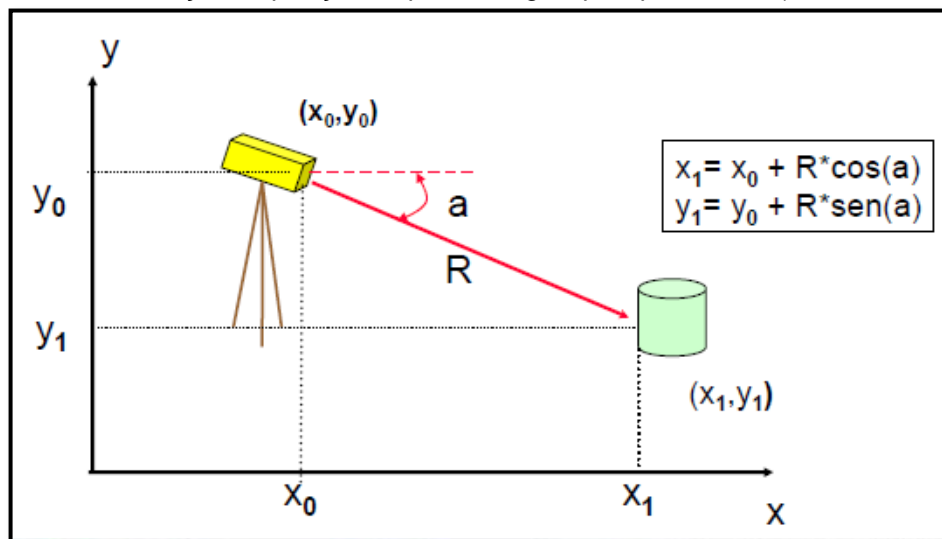
Figura 6 - Determinação da posição do ponto atingido pelo pulso *laser* (trajetória paralela aos eixos do sensor).



Fonte: CENTENO et al., 2007.

Situação 2: No caso bidimensional, conhecendo a distância entre o objeto e o sensor (R), a posição do sensor (X_0, Y_0) e o ângulo de inclinação da visada (a), é possível determinar a posição do ponto atingido (X_1, Y_1) da seguinte forma (figura 7):

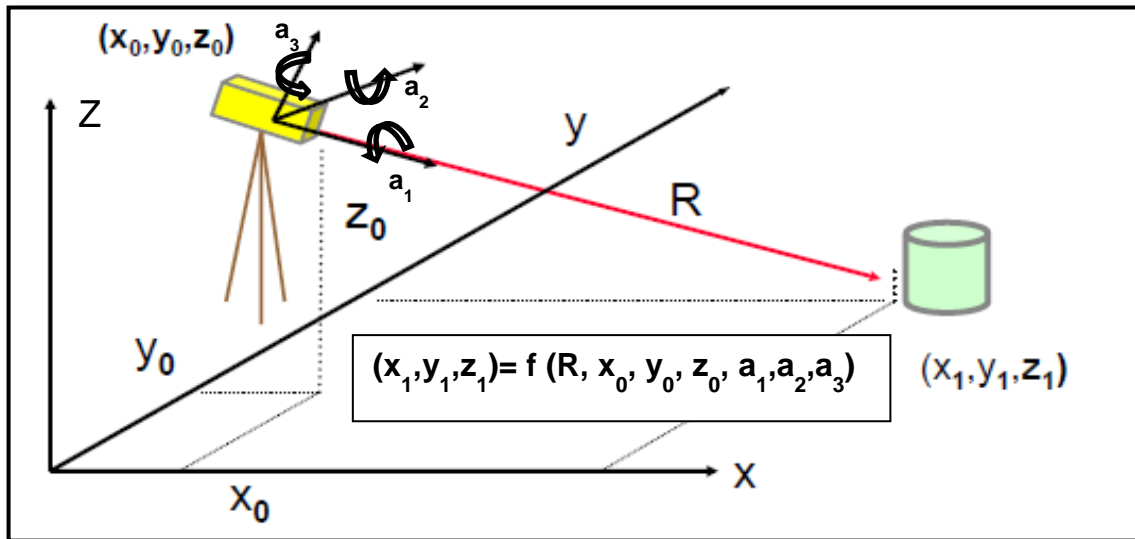
Figura 7 - Determinação da posição do ponto atingido pelo pulso *laser* (caso bidimensional).



Fonte: CENTENO et al., 2007.

Situação 3: No caso tridimensional, conhecendo a distância entre o objeto e o sensor (R), a posição do sensor (X_0, Y_0, Z_0) e os três ângulos de atitude do sensor (a_1, a_2, a_3). A determinação da posição do ponto atingido (X_1, Y_1, Z_1) fica em função dos parâmetros comentados acima (figura 8):

Figura 8 - Determinação da posição do ponto atingido pelo pulso *laser* (caso tridimensional).



Fonte: Adaptado de CENTENO et al., 2007.

2.1.3 Tipos de sistemas de varredura a *laser* terrestres

Há dois tipos de sistemas de varredura a *laser* terrestres, isto é, os sistemas estáticos (o *scanner* é montado fixo em uma estação particular, durante a varredura) e os sistemas cinemáticos ou dinâmicos (a posição e orientação do *scanner* são variáveis durante o tempo da varredura). Em ambos os casos as nuvens densas de pontos 3D são obtidas em um sistema de coordenadas cartesiano 3D e, possivelmente, um valor de refletividade é registrado para cada ponto observado.

No sistema estático as nuvens de pontos se referem ao sistema de coordenadas da respectiva estação. Para que as nuvens de pontos obtidas a partir de estações diferentes estejam em um sistema único, elas têm que ser registradas entre si. Tendo em vista que a posição e orientação são estáveis durante o tempo da varredura, as nuvens de pontos possuem uma boa qualidade geométrica. Na figura 9, tem-se um exemplo de *laser scanner* terrestre estático. Nos quadros 1, 2 e 3 tem-se alguns exemplos de *laser scanners terrestres* estáticos baseados nos seus princípios de medição e outras características julgadas importantes.

Figura 9 - Laser scanner terrestre estático Faro Focus 3D.



Fonte: FARO.

Quadro 1 - Exemplos de *laser scanners* terrestres estáticos baseados no princípio *Time-of-Flight*.

Fabricante	Leica Geosystems	Optech	Riegl Laser Measurement Systems	Topcon
Sistema	HDS 8800	ILRIS-LR	RIEGL VZ-4000	GLS-1500
Comprimento de onda	1.545 nm	1.064 nm	Infravermelho próximo	1.535 nm
Taxa de medição máxima	8.800 pontos/segundo	10.000 pontos/segundo	222.000 pontos/segundo	30.000 pontos/segundo
Campo de visão máximo (horizontal/vertical)	360°/80°	40°/40°	360°/60°	360°/70°
Alcance Máximo	2.000 m	3.000 m	4.000 m	500 m
Acurácia Linear	10 mm até 200 m	4 mm até 100 m	15 mm até 150 m	4 mm até 150 m
Acurácia Angular (horizontal/vertical)	0,01°/0,01°	0,005°/0,005°	0,002°/0,002°	0,002°/0,002°
Câmara digital	Integrada de 70 Megapixels	Integrada de 3,1 Megapixels	Integrada de 5 Megapixels	Integrada de 2 Megapixels
Fonte	LEICA GEOSYSTEMS (a)	OPTECH (a)	RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS	TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC (a)

Fonte: O AUTOR (2012).

Quadro 2 - Exemplos de *laser scanners* terrestres estáticos baseados no princípio *Phase-Shift*.

Fabricante	Faro	Leica Geosystems	Trimble	Zoller+Fröhlich
Sistema	Focus 3D	HDS 7000	FX	Z+F IMAGER 5010
Comprimento de onda	905 nm	1.500 nm	685 nm	1.500 nm
Taxa de medição máxima	976.000 pontos/segundo	1.016.000 pontos/segundo	216.000 pontos/segundo	1.016.000 pontos/segundo
Campo de visão máximo (horizontal/vertical)	360°/305°	360°/320°	360°/270°	360°/320°
Alcance Máximo	120 m	187 m	80 m	187 m
Acurácia Linear	2 mm até 25 m	≤ 1 mm até 50 m	2,4 mm até 50 m	≤ 1 mm até 50 m
Acurácia Angular (horizontal/vertical)	0,009°/0,009°	0,007°/0,007°	0,008°/0,008°	0,007°/0,007°
Câmara digital	Integrada de 70 Megapixels	Não possui, mas suporta o uso de câmara externa	Não possui	Não possui, mas suporta o uso de câmara externa
Fonte	FARO	LEICA GEOSYSTEMS (b)	TRIMBLE (a)	ZOLLER+FRÖHLICH

Fonte: O AUTOR (2012).

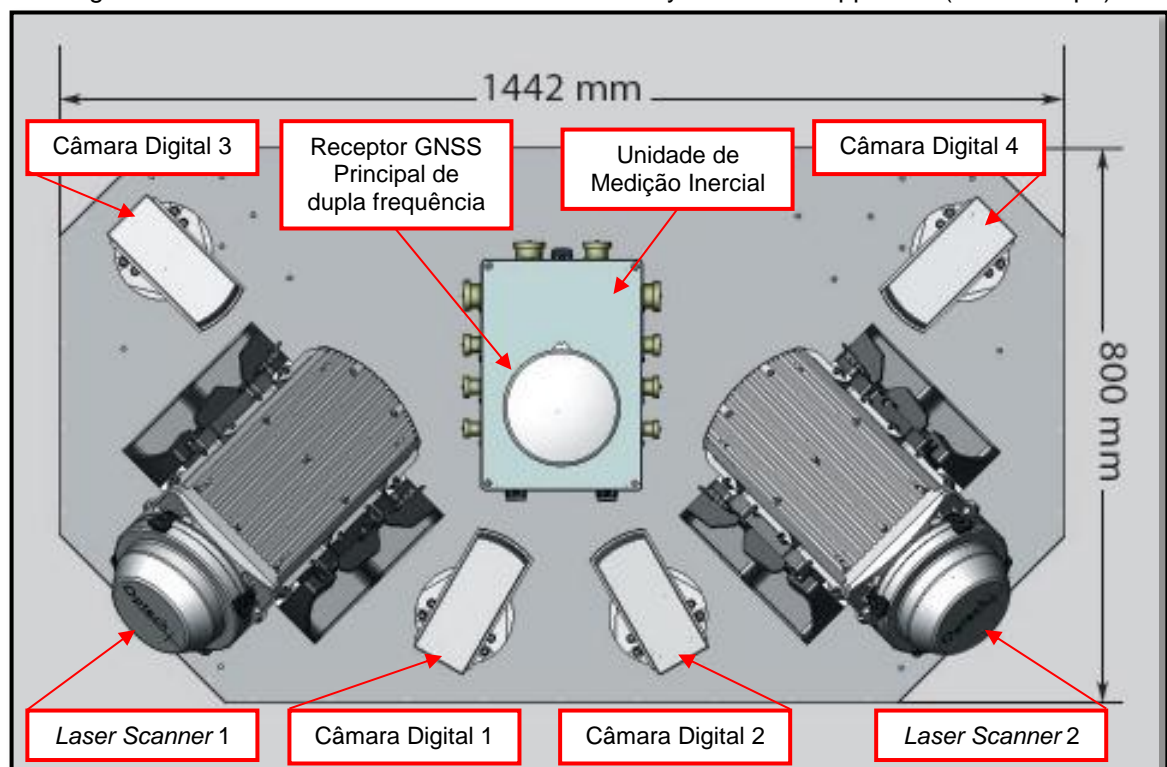
Quadro 3 - Exemplo de *laser scanner* terrestre estático que combina os princípios *Time-of-Flight* e *Phase-Shift*.

Fabricante	Trimble
Sistema	CX
Comprimento de onda	660 nm
Taxa de medição máxima	54.000 pontos/segundo
Campo de visão máximo (horizontal/vertical)	360°/300°
Alcance Máximo	80 m
Acurácia Linear	2 mm até 50 m
Acurácia Angular (horizontal/vertical)	0,004°/0,007°
Câmara digital	Integrada (vídeo)
Fonte	TRIMBLE (b)

Fonte: O AUTOR (2012).

Nos sistemas cinemáticos, objetos longos tais como estradas, ferrovias ou fachadas de edifícios são observados mais rápido do que nos sistemas estáticos. Devido ao movimento contínuo do *laser scanner*, cada ponto observado refere-se a um sistema de coordenadas cartesiano 3D individual (da estação). Para vincular matematicamente todos esses sistemas em um único sistema de referência espacial (sistema geodésico global), como o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) ou algum sistema geodésico nacional, devem ser observadas as respectivas posições e orientações usando-se equipamentos adequados como receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* – Sistemas Globais de Navegação por Satélite) e IMU (*Inertial Measurement Unit* – Unidade de Medição Inercial), respectivamente. Além disso, todos os sensores em uso têm que ser sincronizados precisamente em uma referência de tempo única. Na figura 10, temos como exemplo uma parte de um sistema cinemático terrestre com os seus sensores dispostos em vista de topo.

Figura 10 - Parte do sistema cinemático terrestre Lynx Mobile Mapper M1 (vista de topo).

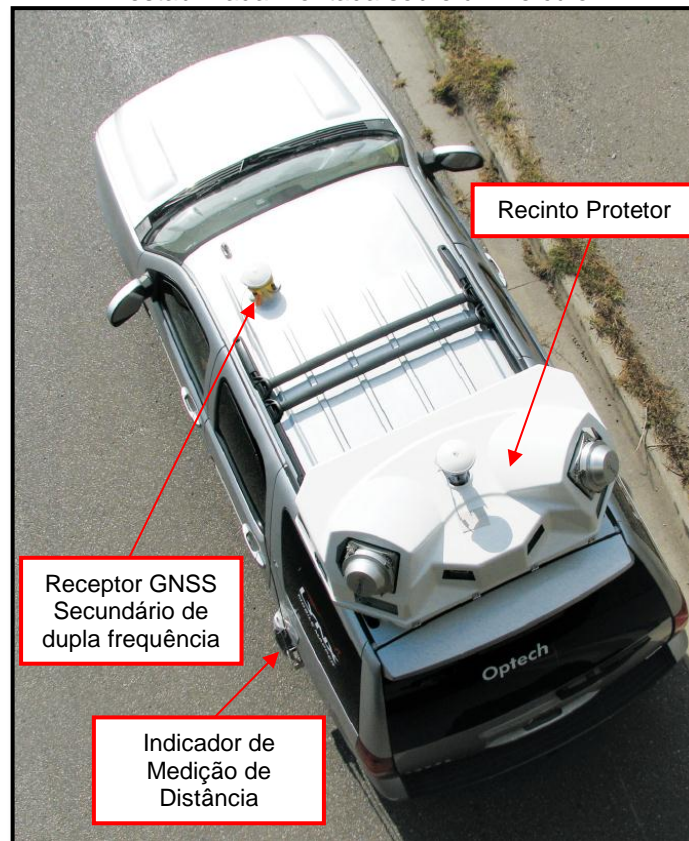


Fonte: Adaptado de OPTECH (b).

Na figura 11, tem-se esta parte do sistema cinemático instalado em uma plataforma estabilizada, contra vibrações e devidamente protegido em um recinto

contra mudanças repentinas de tempo, temperaturas extremas, umidades elevadas e poeira. Nesta mesma figura é possível visualizar o receptor GNSS secundário e o DMI (*Distance Measurement Indicator* – Indicador de Medição de Distância) conectado a roda traseira esquerda do veículo.

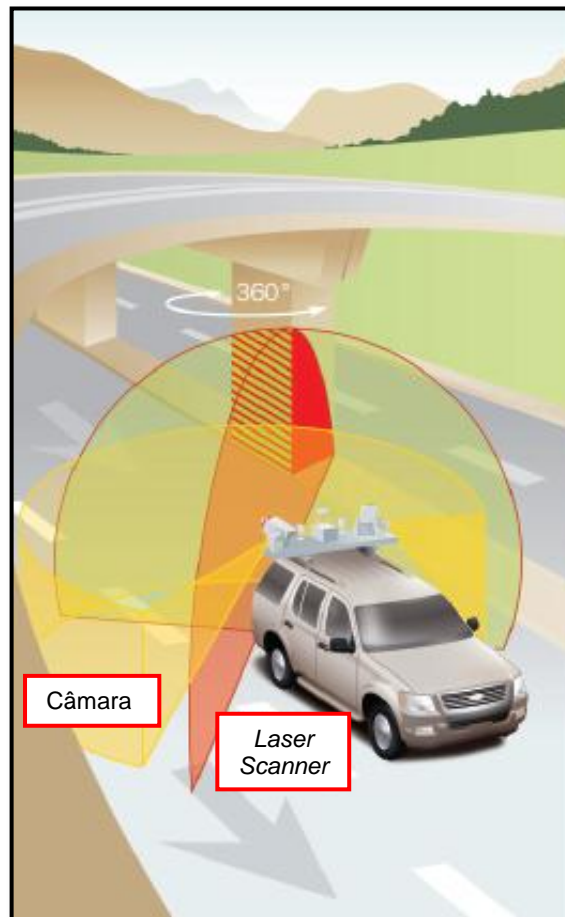
Figura 11 - Parte do sistema cinemático terrestre Lynx Mobile Mapper M1 em uma plataforma estabilizada montada sobre um veículo.



Fonte: Adaptado de OPTECH (b).

Todos estes componentes são conectados a uma CPU (*Central Processing Unit* – Unidade Central de Processamento), onde os dados são armazenados em um disco rígido interno e uma unidade SCSI removível. A navegação do veículo é realizada através da interação de dois programas em um *laptop*, onde é possível visualizar as estatísticas da missão, tal como cobertura GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), saúde do satélite, localização e uso do satélite na solução. Na figura 12 temos uma demonstração da visão de campo (*laser scanners* em vermelho e câmaras em amarelo) no momento da varredura. O quadro 4 contém as especificações técnicas de dois modelos de sistemas cinemáticos terrestres.

Figura 12 - Visão de campo (*laser scanners* e câmaras) no momento da varredura.



Fonte: Adaptado de OPTECH (b).

Quadro 4 - Especificações técnicas do sistema cinemático Lynx Mobile Mapper: Modelos V200 e M1 – (tradução do autor).

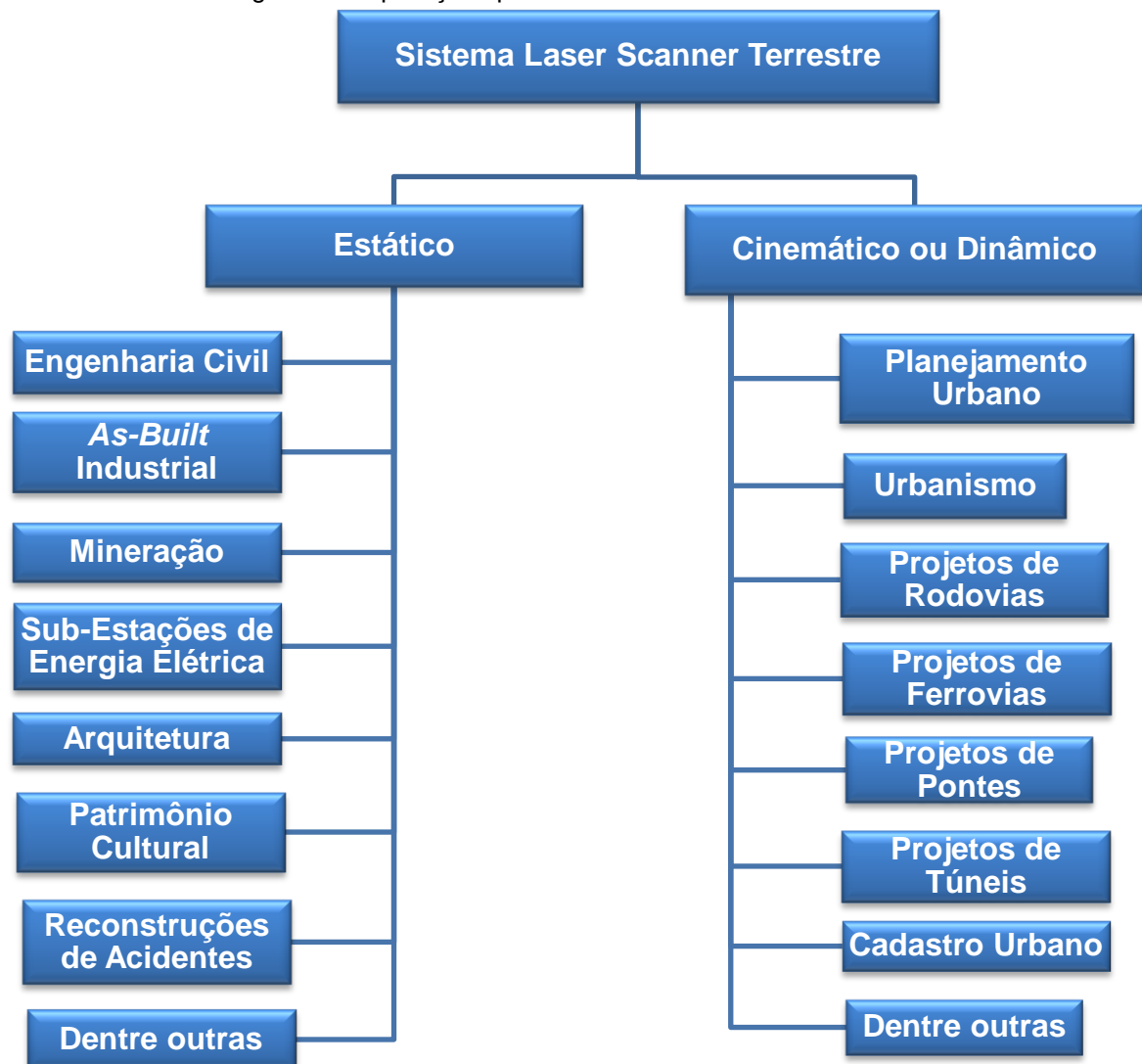
Modelo	V200	M1
Número de sensores <i>laser</i>	1-2	1-2
Suporte para câmara	Até 2 câmaras Áreas do quadro individualmente escalável	Até 4 câmaras Áreas do quadro individualmente escalável
Alcance máximo	200 m, 20% de refletividade	200 m, 20% de refletividade
Faixa de precisão	8 mm, 1σ	8 mm, 1σ
Acurácia absoluta	± 5 cm (1σ)	± 5 cm (1σ)
Taxa de medição do <i>laser</i>	75-200 KHz programável	75-500 KHz programável
Medição por pulso <i>laser</i>	Até 4 simultâneas	Até 4 simultâneas
Visão de campo do <i>scanner</i>	360° sem obstruções	360° sem obstruções
Veículo	Totalmente adaptável a qualquer veículo	Totalmente adaptável a qualquer veículo

Fonte: Adaptado de OPTECH (c).

2.1.4 Exemplos de aplicações do sistema *laser scanner* terrestre

Com a disponibilização e utilização do *laser scanner* terrestre (estático e cinemático ou dinâmico) por parte da sociedade, foi possível a aquisição e geração de informações rápidas e precisas, diminuindo consideravelmente a conclusão de projetos em várias áreas como demonstrado na figura 13.

Figura 13 - Aplicações para o sistema *laser scanner* terrestre.



Fonte: O AUTOR (2012).

2.1.4.1 Documentação do patrimônio cultural

Os objetos do patrimônio cultural são muitas vezes um conjunto de geometrias de superfície irregular. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas de modo que a captura desses dados seja feita de modo rápido, eficiente e possa criar produtos acurados. E uma das soluções encontradas pelos cientistas é a união da nuvem de pontos provenientes da técnica por varredura a *laser* com as texturas provenientes das informações métricas das fotografias (Fotogrametria), criando-se um modelo tridimensional acurado com textura fotorealística, tendo uma variedade de aplicações que inclui desde a simples visualização, bem como documentação do patrimônio “como construído” (*as-built*), servindo, por exemplo, para futuras restaurações, revitalizações e outras ações sobre o bem cultural. Na figura 14, podemos ver a imagem de um quadro com moldura em madeira da *Madonna della Scodella* e um modelo tridimensional do mesmo obtido através do processamento de dados provenientes da varredura a *laser*. Nas figuras 15 e 16, têm-se exemplos de produtos provenientes da combinação entre a Fotogrametria e a varredura a *laser*.

Figura 14 - Imagem (14a) e Modelo Tridimensional (14b) do quadro da *Madonna della Scodella*.



14a



14b

Fonte: VERNIZZI e GHIRETTI, 2009.

Figura 15 - O modelo em forma de malha (15a), sombreado (15b) e texturizado (15c) do altar interior da capela contida no *Castelo Valer*.



15a



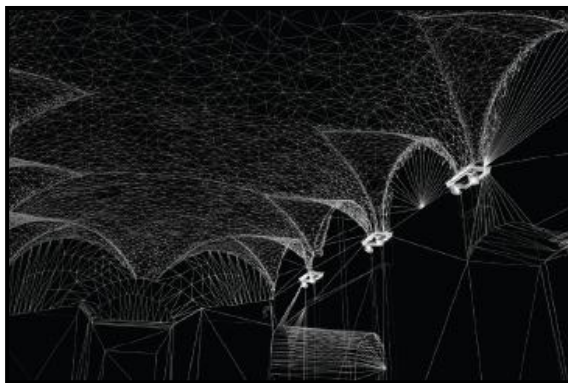
15b



15c

Fonte: REMONDINO et al., 2009.

Figura 16 - O modelo em malha (16a) e texturizado (16b) do interior do *Castelo Buonconsiglio*.



16a



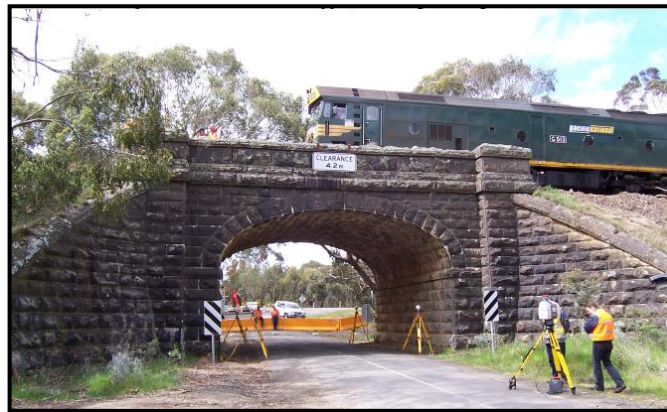
16b

Fonte: REMONDINO et al., 2009.

2.1.4.2 Análise de deformações em Pontes

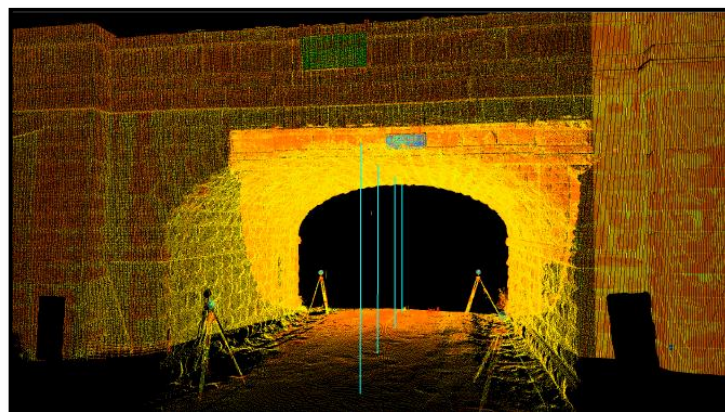
Pontes em arco de alvenaria têm-se revelado estruturas duráveis e confiáveis durante séculos. Muitas pontes em arco de alvenaria transportam cargas de tráfego muito maior do que foram originalmente destinadas a transportar. As deformações sofridas pela ponte podem ser detectadas através de levantamento abrangente com a tecnologia de varredura a *laser*, e as informações obtidas durante as fases iniciais podem ser usadas durante as obras de remodelação/renovação – sem a necessidade de remobilizar (WERNER e MORRIS, 2010). Nas figuras 17, 18, 19, 20 e 21 tem-se desde o início do projeto no teste de carga da ponte junto com a varredura a *laser* até o escoramento final da ponte com um forro pré-moldado, construído em função das análises das deformações e medições efetuadas sobre os dados do levantamento a *laser*.

Figura 17 - Teste de carga na ponte de pedra.



Fonte: WERNER e MORRIS, 2010.

Figura 18 - Medição de alturas através da nuvem de pontos.



Fonte: WERNER e MORRIS, 2010.

Figura 19 - Montagem experimental do forro pré-moldado de concreto.



Fonte: WERNER e MORRIS, 2010.

Figura 20 - Forro de concreto pré-moldado pronto para correr sobre um trilho.



Fonte: WERNER e MORRIS, 2010.

Figura 21 - Fortalecimento da ponte concluído.



Fonte: WERNER e MORRIS, 2010.

2.1.4.3 Levantamentos detalhados de centros urbanos

Este trabalho foi realizado a partir da varredura a *laser* de 30 km de todo o centro histórico da cidade de Brescia (Itália) contendo castelo medieval, ruas estreitas e praças principais, com a utilização do sistema cinemático terrestre Lynx Mobile Mapper (figura 22).

Figura 22 - Utilitário com os componentes do sistema cinemático Lynx Mobile Mapper.



Fonte: CONFORTI e ZAMPA, 2011.

O objetivo deste projeto foi à obtenção de modelos fiéis a partir da reconstrução tridimensional de alguns edifícios principais na área histórica, possibilitando assim a documentação precisa dos mesmos (figura 23).

Figura 23 - Nuvem de pontos do centro da cidade de Brescia.



Fonte: CONFORTI e ZAMPA, 2011.

Devido às ruas serem estreitas e os edifícios altos, os receptores GPS perderam o sinal algumas vezes e a IMU corrigiu a localização através do DMI. O DMI estava montado na roda traseira esquerda e com o mesmo foi possível medir precisamente a distância linear percorrida. Essas medições possibilitaram a IMU medir velocidades de forma adequada o que ajudou a corrigir as derivas sofridas durante a perda de sinal por parte dos receptores GPS. Devido ao tráfego de toda a área, a varredura a *laser* foi realizada a uma velocidade média de 25 km/h, coletando dados com um espaçamento de 4 cm entre os pontos. Em 20 minutos, foram coletados 5 blocos contendo um total de 144 milhões de pontos.

2.2 RAZÕES PARA DOCUMENTAÇÃO PRECISA DO PATRIMÔNIO CULTURAL

O patrimônio cultural é o testemunho da atividade humana passada e, como tal variedade cultural do patrimônio, exibe grandes objetivos em sua natureza, dimensão e complexidade, desde pequenos artefatos e artigos contidos em um museu até chegar nas paisagens culturais, a partir de edifícios históricos, monumentos antigos até os centros das cidades e sítios arqueológicos (PATIAS et al., 2008 apud GRUSSENMEYER e HANKE, 2010).

Nem sempre o projeto arquitetônico original, conforme está esboçado em planta (quando esta existe), confere com os atuais detalhes e medidas da edificação.

A obtenção das características de uma edificação quando de sua construção só pode ser obtida pela procura em documentos literários que retratem o estilo e época em que se elevou o monumento (RENUNCIO e LOCH, 1997 apud CERQUEIRA et al., 2003).

Segundo Pires Jr (2003), o levantamento e registro preciso do patrimônio cultural, são essenciais para:

- acumular conhecimento e propiciar compreensão da herança cultural e sua progressão;
- ajudar a manutenção e a preservação do patrimônio de modo fiel a seu aspecto físico, material, construtivo e significado histórico e cultural;

- possibilitar controle, embasado, de modificações e de trabalhos no patrimônio cultural.

Ainda segundo o mesmo autor a documentação precisa do patrimônio cultural deve:

- fornecer registro detalhado, permanente, de monumentos com importância histórica, arquitetônica e arqueológica, em vias de destruição ou alteração de qualquer forma;
- fornecer informação suficiente aos administradores e planejadores do Governo local e nacional, possibilitando políticas de controle e de desenvolvimento;
- fornecer informações de base, para programas de manutenção, gerenciamento, trabalhos e serviços;
- assessorar na identificação de usos adequados e sustentáveis.

Para que os objetivos da documentação das formas arquitetônicas sejam realizados de maneira precisa, se faz necessário antes do levantamento cadastral arquitetônico determinar a precisão das medidas que está referida à escala desejada para representação do objeto cadastrado.

Segundo Buill et al. (2007), a escala de trabalho condiciona o detalhe mínimo a representar e sua precisão. Não podemos esquecer que uma representação gráfica geralmente tem uma tolerância estabelecida que não pode ser superada no levantamento em uma determinada porcentagem (geralmente entre 60% e 90% de todos os elementos representados). Então, se a tolerância gráfica considerada for a conhecida de 0,2 mm na escala do levantamento, em um plano na escala 1/E a tolerância será de $(0,2 \times E)$ mm. No quadro 5 são apresentadas as tolerâncias admitidas para as escalas de trabalhos mais comuns.

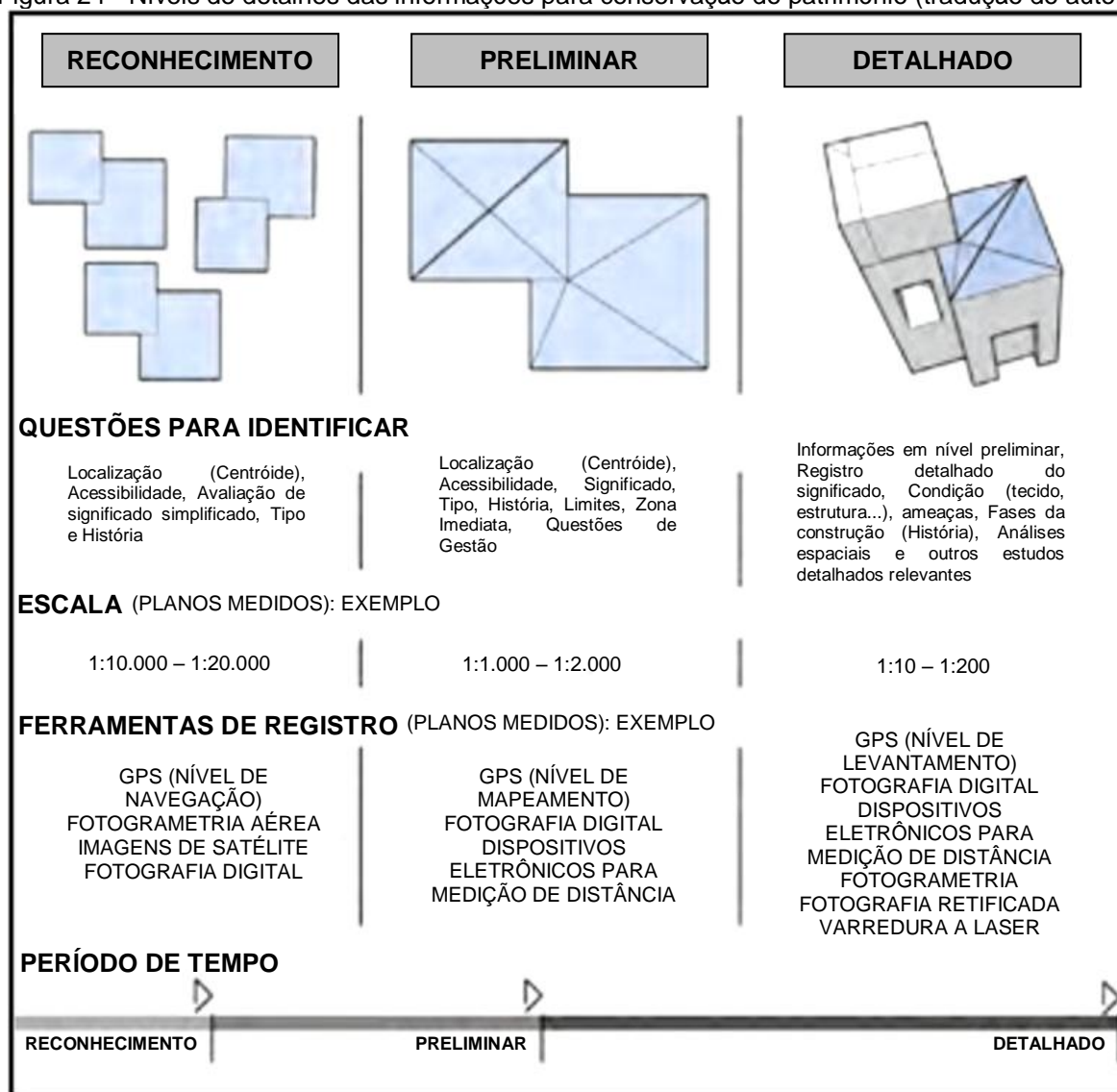
Segundo Patias e Santana (2011, p.11), a acurácia de um registro detalhado pode variar entre aproximadamente ± 5 mm (para detalhes) e ± 25 mm (para os planos da construção). Na figura 24 temos os níveis de detalhes das informações para conservação do patrimônio, seja para levantamentos de reconhecimento, preliminares ou detalhados.

Quadro 5 - Relação entre as escalas e as tolerâncias admitidas.

Escala	Tolerância
1/200	4 cm
1/100	2 cm
1/50	1 cm
1/20	4 mm
1/10	2 mm
1/5	1 mm
1/1	0,2 mm

Fonte: Adaptado de BUILL et al., 2007.

Figura 24 - Níveis de detalhes das informações para conservação do patrimônio (tradução do autor).



Fonte: Adaptado de PATIAS e SANTANA, 2011.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS DURANTE A PESQUISA

3.1.1 *Laser scanner* terrestre estático Zoller+Fröhlich Z+F IMAGER 5010

Em parceria com a empresa privada CPE Tecnologia foi cedido para esta pesquisa o *laser scanner* terrestre estático Zoller+Fröhlich Z+F IMAGER 5010. Na figura 25 tem-se uma visão geral deste equipamento e da câmara M-Cam (acessório). Nos quadros 6 e 7 têm-se as especificações técnicas deste equipamento.

Figura 25 - Visão geral do *laser scanner* Z+F IMAGER 5010 e da câmara M-Cam.

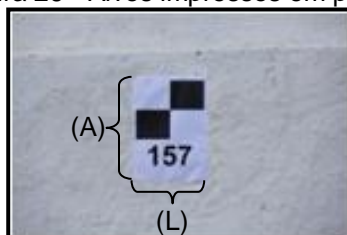


Fonte: Adaptado de ZOLLER+FRÖHLICH.

Os acessórios que foram utilizados em conjunto com o *laser scanner* Z+F IMAGER 5010 estão listados abaixo:

- 01 (uma) câmara panorâmica digital colorida (externa), modelo M-Cam, com 5 *Megapixels*;
- 01 (um) tripé de alumínio da marca Manfrotto;
- 17 (dezessete) alvos impressos em papel, com largura (L) de 20 cm e altura (A) de 30 cm (figura 26).

Figura 26 - Alvos impressos em papel.



Fonte: O AUTOR (2011).

Quadro 6 - Especificações Técnicas – *Laser Scanner Z+F IMAGER 5010* (tradução do autor) – Parte 1.

Sistema <i>laser</i>			
Classe do <i>laser</i>	1		
Divergência do feixe	< 0,3 mrad		
Diâmetro do feixe	Aproximadamente 3,5 mm (a partir de uma distância de 0,1 m)		
Alcance	187,3 m (intervalo de ambiguidade)		
Distância mínima	0,3 m		
Faixa de resolução	0,1 mm		
Taxa de aquisição de dados	Máximo de 1,016 milhões de pontos/segundo		
Erro de linearidade	≤ 1 mm		
Intervalo de ruído	Preto 14%	Cinza 37%	Branco 80%
Intervalo de ruído, 10 m	0,5 mm RMS	0,4 mm RMS	0,3 mm RMS
Intervalo de ruído, 25 m	1,0 mm RMS	0,6 mm RMS	0,5 mm RMS
Intervalo de ruído, 50 m	2,7 mm RMS	1,2 mm RMS	0,8 mm RMS
Intervalo de ruído, 100 m	10 mm RMS	3,8 mm RMS	2,0 mm RMS
Desvio de temperatura	Desprezível		
Unidade de deflexão			
Sistema vertical	Espelho rotativo completamente encapsulado		
Sistema horizontal	Dispositivo gira sobre seu eixo vertical		
Campo de visão vertical	320°		
Campo de visão horizontal	360°		
Resolução vertical	0,0004°		
Resolução horizontal	0,0002°		
Acurácia vertical	0,007° RMS		
Acurácia horizontal	0,007° RMS		
Velocidade de varredura	Máximo de 50 revoluções/segundo (3.000 revoluções/minuto)		

Fonte: Adaptado de ZOLLER+FRÖHLICH.

Quadro 7 - Especificações Técnicas – *Laser Scanner Z+F IMAGER 5010* (tradução do autor) – Parte 2.

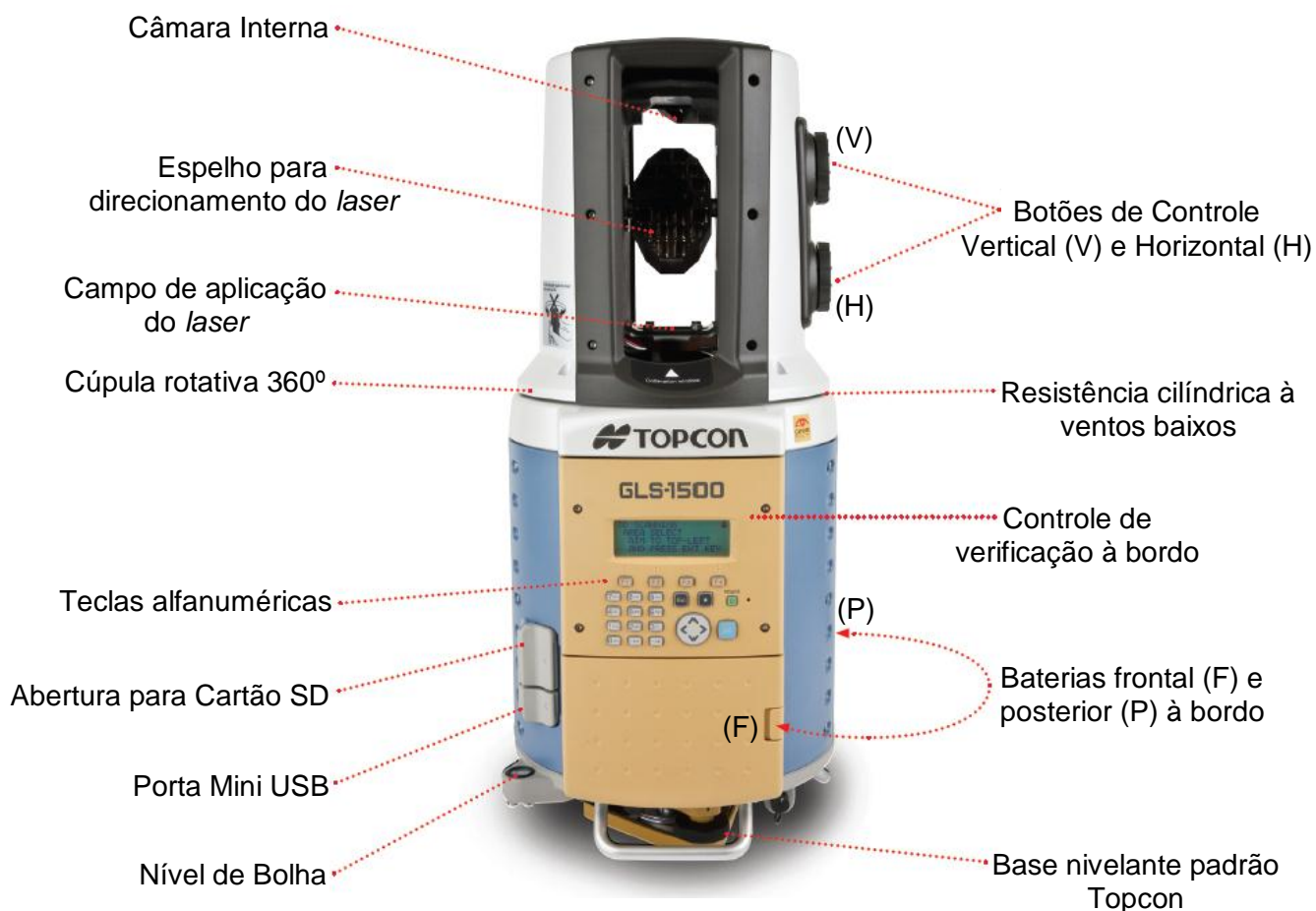
Diversos	
Duplo compensador de eixos	Resolução: 0,001°; Faixa de medição: $\pm 0,5^\circ$ Acurácia: < 0,007° opção ligado / desligado
Prumo <i>laser</i>	Classe do <i>laser</i> : 2 Acurácia do prumo: 0,5 mm / 1 m Diâmetro do ponto <i>laser</i> : < 1,5 mm a 1,5 m
Visualização do nivelamento	Nível eletrônico com exibição a bordo e LRC
Comunicação	Rede de área local / Rede de área local sem fio
Armazenamento de dados	Placa interna <i>flash</i> de 64GB, 2 x USB <i>flash drive</i> externo de 32 GB
Transmissão de dados	Rede de área local ou USB 2.0
Painel de funcionamento integrado	Operação por tela sensível ao toque, painel colorido para visualizar dados <i>laser</i> em 3D e imagens coloridas com medições e funções de navegação.
Interfaces	2 x USB, conexões LEMO 9-pin e LEMO 7-pin para M-Cam e sensores externos como GPS, odômetro, etc.
Fonte de alimentação	
Tensão de entrada	24 V corrente contínua (<i>scanner</i>) 100 – 240 V corrente alternada (unidade de alimentação)
Consumo de energia	< 65 W (em média)
Tempo de funcionamento	> 2,5 horas (bateria interna)
Condições ambientais	
Temperatura de operação	-10° C até +45° C
Temperatura de armazenamento	-20° C até +50° C
Condições de iluminação	Em todas as condições de operação, mesmo sob luz solar intensa ou escuridão
Umidade	Sem-condensação
Classe de proteção	IP 53
Dimensões e pesos	
Dimensões (largura x profundidade x altura) e peso do <i>scanner</i>	170 mm x 286 mm x 395 mm e 9,8 kg
Dimensões (largura x profundidade x altura) e peso da bateria	170 mm x 88 mm x 61 mm e 1,2 kg
Dimensões (largura x profundidade x altura) e peso da unidade de alimentação (corrente alternada)	35 mm x 67 mm x 167 mm e 0,54 kg

Fonte: Adaptado de ZOLLER+FRÖHLICH.

3.1.2 Laser scanner terrestre estático Topcon GLS-1500

Em parceria com a empresa privada Santiago & Cintra Geotecnologias foi cedido para esta pesquisa o *laser scanner* terrestre estático Topcon GLS-1500. Na figura 27 e no quadro 8 tem-se uma visão geral e as especificações técnicas deste equipamento, respectivamente. Ele possui uma câmara interna de 2 *Megapixels*.

Figura 27 - Visão geral do *laser scanner* Topcon GLS-1500 (tradução do autor).



Fonte: TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC (b).

Os acessórios que foram utilizados em conjunto com o *laser scanner* Topcon GLS-1500 estão listados abaixo:

- 01 (um) alvo quadrado refletor da marca Topcon;
- 01 (um) bastão de fibra de carbono da marca Topcon;
- 01 (um) bipé para bastão da marca Topcon;

- 01 (um) tripé de madeira para o *laser scanner* da marca Topcon;
- 01 (um) *laptop* da marca Dell, modelo Precision M4400.

Quadro 8 - Especificações Técnicas – *Laser Scanner* Topcon GLS-1500 (tradução do autor).

Especificações do Sistema		
Alcance máximo na refletividade especificada		1100 pés (330 m) a 90% 500 pés (150 m) a 18%
Modo de longo alcance		1640 pés (500 m) a 90% 731 pés (223 m) a 18%
Acurácia em um único ponto		Distância: 0,16 polegadas a partir de 3,28 pés até 500 pés (4 mm a partir de 1 m até 150 m)
Duplo compensador de eixos		Ângulo (vertical): Acurácia de 6" Ângulo (horizontal): Acurácia de 6"
Sistema de varredura a laser		
Tipo		Pulso
Cor		Invisível (<i>laser</i> seguro aos olhos)
Classe do <i>laser</i>		Classe 1
Taxa de varredura		30.000 pontos/segundo
Densidade da varredura (Resolução)	Tamanho do ponto	0,24 polegadas a 130 pés (6 mm a 40 m)
	Densidade máxima da amostra	0,04 polegadas a 328 pés (1 mm a 100 m)
Características Ambientais e Físicas		
Temperatura de operação		+32° F até +104° F (0° C até +40° C)
Poeira/Humidade		IP 52
Dimensões		9,5 polegadas x 9,5 polegadas x 22,3 polegadas (240 mm x 240 mm x 566 mm)
Peso		35 libras (16 kg) – sem bateria à bordo e base nivelante
Controle da Varredura		
Equipamento de controle		Computador à bordo ou computador pessoal
Método de comunicação com o computador pessoal		Rede de área local sem fio
Unidade de visualização		LCD 20 caracteres x 4 linhas
Teclado		21 teclas
Armazenamento de dados		Cartão SD

Fonte: TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC (b).

3.1.3 Câmara fotográfica digital Canon EOS 60D

A câmara utilizada para adquirir as imagens digitais que compõem esta dissertação foi uma Canon EOS 60D (figura 28) de 19 *Megapixels* totais. Esta câmara trabalha com uma matriz CMOS de 22,3 mm x 14,9 mm e 18 *Megapixels* efetivos. O *pixel* é quadrado com dimensão de 4 μm . A máxima resolução existente na câmara é de 5184 *pixels* x 3456 *pixels*. As imagens são gravadas em um cartão de memória de 16 *Gigabytes*, no formato JPEG e/ou RAW (arquivo original, sem nenhum processamento).

O sistema de lentes da marca Canon tem *zoom* ótico e distância focal (18 mm a 200 mm) variáveis. A focalização pode ser automática ou manual. As imagens são transferidas para o computador pessoal através da porta de comunicação USB.

Figura 28 - Câmara Não-Métrica Digital Canon EOS 60D.



Fonte: DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW.

3.1.4 Acessórios adicionais

- 01 (uma) Trena de fibra de vidro de 20 metros;
- 01 (um) Escalímetro de 30 cm.

3.1.5 Estação de trabalho

A estação de trabalho utilizada para processar os dados desta pesquisa possuía as especificações técnicas que estão contidas no quadro 9.

Quadro 9 - Especificações técnicas da estação de trabalho.

Componente	Quantidade e Especificação
Processador	01 (um) Intel Core i7 2600K de 3,40 GHz
Placa-mãe	01 (uma) Intel DP67BG/B3
Memória RAM	04 (quatro) módulos de 4 GB Corsair XMS3 Vengeance DDR3 de 1.600 MHz
Disco Rígido	01 (um) SSD Intel X25 de 160 GB
	01 (um) Western Digital Caviar Black SATA 3 (7200 RPM) de 1 TB
Placa de aceleração gráfica	01 (uma) AMD Radeon HD 6970 (Processador de 880 MHz e Memória de 2 GB GDDR5)
Gravador Blu-ray/Dvd	01 (um) LG SATA BH10LS30
Fonte	01 (uma) Corsair Professional Series Gold AX850 (850W)
Gabinete	01 (um) Cooler Master HAF 932 <i>Advanced</i> (RC-932-KKN5-GP)
Monitor	02 (dois) Dell D2201 de 21,6 polegadas e resolução máxima de 1920 <i>pixels</i> x 1080 <i>pixels</i>
Teclado	01 (um) Microsoft <i>Wired Keyboard</i> 600
Mouse	01 (um) Microsoft <i>Basic Optical</i> Mouse
No-Break	01 (um) APC Stay 1400 VA

Fonte: O AUTOR (2012).

3.1.6 Aplicativos utilizados

Os aplicativos utilizados para processar os dados e elaboração desta dissertação foram os seguintes:

- Autodesk AutoCAD 2012, versão educacional de 64 bits;
- Kubit PointCloud Pro, versão de avaliação 8.0.4.7 (licença completa);
- Topcon ScanMaster, versão 2.60.0.2508 (licença para visualização de dados do *Laser Scanner* Topcon GLS-1500);
- Microsoft Windows 7 Professional, versão de 64 bits;
- Microsoft Office 2010, versão *Home and Student*.

3.1.7 Dados auxiliares

- elevação da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus, registro nº 223, em meio analógico, na escala 1:100, de 6 de abril de 1955 [Fonte:

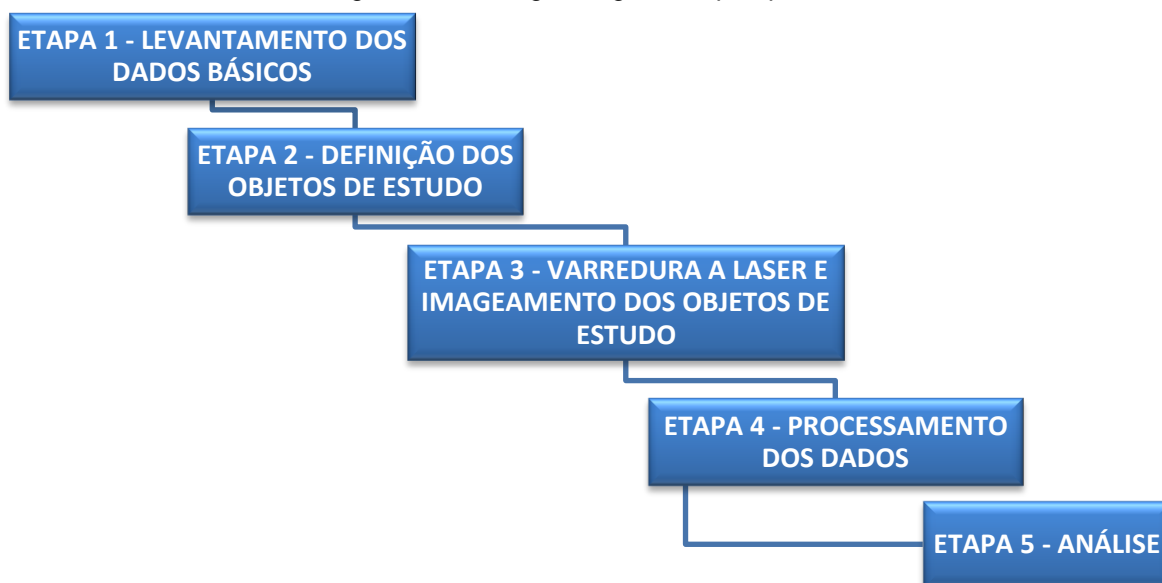
Biblioteca da 5ª Superintendência Regional (5ª SR) do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em Pernambuco] – ANEXO A;

- elevação arquitetônica da fachada principal da Igreja dos Santos Cosme e Damião, registro nº 2376, em meio analógico, na escala 1:50, de 24 de agosto de 2000 [Fonte: Biblioteca da 5ª Superintendência Regional (5ª SR) do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em Pernambuco] - ANEXO B;
- elevação arquitetônica da fachada principal e fachada oeste da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda, registro nº P06/13, em meio digital, na escala 1:100, de janeiro de 2001 [Fonte: Biblioteca da 5ª Superintendência Regional (5ª SR) do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em Pernambuco] - ANEXO C.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos executados nesta pesquisa estão ilustrados no fluxograma da figura 29, e os detalhamentos da metodologia proposta estão descritos nas seções a seguir.

Figura 29 - Fluxograma geral da pesquisa.



Fonte: O AUTOR (2012).

3.2.1 Levantamento dos dados básicos

Através de visita à biblioteca da 5ª SR do IPHAN, localizada no Palácio da Soledade – Rua Oliveira Lima, nº 824, Boa Vista, Recife-PE, foram coletadas informações históricas e elevações arquitetônicas de frontispícios (fachadas principais) de igrejas em Igarassu e Olinda, para posterior seleção dos objetos de estudo desta pesquisa.

3.2.2 Definição dos objetos de estudo

Através do levantamento dos dados básicos, foram escolhidas nesta pesquisa as seguintes igrejas como objetos de estudo, devido à disponibilidade de informações históricas, ao fácil acesso e desobstrução nos seus entornos:

3.2.2.1 Objeto de Estudo 1 - Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus

Localização: Largo dos Santos Cosme e Damião - Centro, Igarassu/PE.

Data da construção: Século XVIII.

Autor do Projeto: Não Identificado.

Proprietário: Arquidiocese de Olinda e Recife.

Tombamento: Processo n.º 359-T, Inscrição n.º 287, Livro História, fls. 48, e Inscrição n.º 400, Livro Belas-Artes, fls. 77. Data: 25.10.1951.

FUNDARPE – Lei n.º 7970 (18.08.1979).

Finalidade atual: Culto religioso e escola.

Resumo histórico:

O convento data do século XVIII e foi construído em 1743. Fundado pelos padres Malagrida e Sepúlveda. Está sob a guarda de religiosas que mantêm uma pequena escola (CARRAZZONI, 1980).

Descrição arquitetônica:

O convento é de construção simples com dois pavimentos. No térreo, porta ladeada por duas pequenas janelas, óculos e o portão do antigo colégio, com frontão arcado, monograma e pináculo. A igreja, de sólida construção, tem frontispício vazado por conjunto de portada, janelas do coro guarnecidas por gradil e cornijamento reto. O frontão, em curvas e contracurvas, é ornado por pináculos e cruz, trazendo no tímpano o monograma da Ordem. A torre, bulbosa com pináculos. Onde seria construída outra torre, foi feito o coroamento, por frontão simples, dividido com pináculos (CARRAZZONI, 1980). A figura 30 representa a igreja em outubro de 2011, durante o levantamento de campo desta pesquisa.

Figura 30 - Fachada principal da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus.



Fonte: O AUTOR (2011).

3.2.2.2 Objeto de Estudo 2 - Igreja dos Santos Cosme e Damião

Localização: Largo dos Santos Cosme e Damião - Centro, Igarassu/PE.

Data da construção: Séculos XVI e XVIII.

Autor do Projeto: Não Identificado.

Proprietário: Arquidiocese de Olinda e Recife.

Tombamento: Processo n.º 359-T, Inscrição n.º 284, Livro História, fls. 48, e Inscrição n.º 397, Livro Belas-Artes, fls.77. Data: 25.05.1951.

FUNDARPE – Lei n.º 7970 (18.08.1979).

Finalidade Atual: Culto religioso.

Resumo histórico:

Considerada a igreja mais antiga do Brasil, teve sua construção iniciada no século XVI, mas somente foi concluída na segunda metade do século XVII. Foi mandada construir pelo donatário Duarte Coelho, que a dedicou aos santos Cosme e Damião – responsáveis, segundo ele, por inestimável ajuda na vitória definitiva que obteve sobre os franceses e os potiguaras. O templo primitivo, construído pelos franciscanos, foi incendiado pelos holandeses. A atual data é de 1755, mas teve sua feição original descaracterizada em 1955, quando substituíram o frontão reto por outro de curvas e contracurvas, modificaram as janelas e substituíram por um só os nichos existentes (CARRAZZONI, 1980). A figura 31 representa a igreja em outubro de 2011, durante o levantamento de campo desta pesquisa.

Figura 31 - Fachada principal da Igreja dos Santos Cosme e Damião.



Fonte: O AUTOR (2011).

Descrição arquitetônica:

É evidente a influência renascentista na sóbria portada. De nave única, com frontispício sobre o quadrado, encimado por frontão triangular. A torre sineira traz cúpula em forma de coroa e foi construída no século XVIII. O interior é sóbrio, as paredes nuas e brancas de cal, onde se destacam as cantarias de perfis delicados. Os altares da capela-mor foram levantados em fins da época setecentista. No interior, há um altar com belo arco entalhado. Na sacristia acham-se “ex-votos” e quadros datados de 1729, sobre a vida da cidade e episódios da Guerra Holandesa, e também alguns alusivos aos primeiros colonizadores. Há também um lavatório em pedra lavrada, ricamente trabalhado com motivos florais e peixes, e imagem de Sant’ Ana, em pedra (CARRAZZONI, 1980).

3.2.2.3 Objeto de Estudo 3 - Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda

Localização: Praça da Liberdade, s/n. Carmo - Olinda/PE.

Data da construção: Século XVII.

Autor do Projeto: Atribuído a arquitetos portugueses.

Proprietário: Província Carmelitana de Pernambuco.

Tombamento: Processo n.º 148-T, Inscrição n.º 108, Livro História, fls. 19, e Inscrição n.º 217, Livro Belas-Artes, fls. 38. Data: 05.10.1938.

Finalidade Atual: Culto religioso.

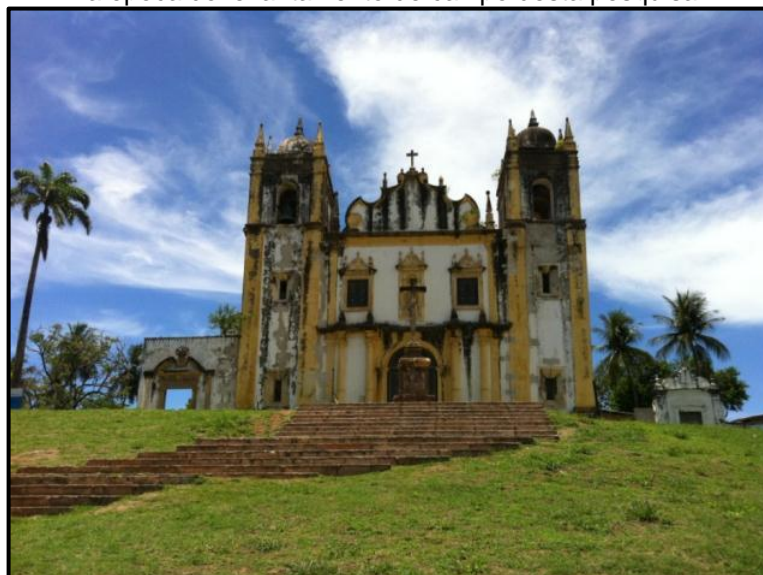
Resumo histórico:

Documentos de 1630 já registram a existência da igreja e do convento, este ainda inacabado. Incendiada por ocasião da Invasão Holandesa, a igreja foi muito danificada, desaparecendo um terço. As obras de reconstrução foram feitas em épocas diferentes. Em 1704, estando já concluído o frontispício, foram feitas obras internas, sendo também erguido o cruzeiro fronteiro. A torre do lado sul foi concluída em 1726. Várias obras foram realizadas, depois, sem alterar a sua originalidade. Em 1897, frei Marinho do Monte Carmelo Gordon fez obras de restauração na capela-

mor e mandou construir sólido e esbelto camarim com suas arcadas, pilastras e abóbada. Sofreu restauração em 1966 e 1968 pela SPHAN (CARRAZZONI, 1980).

As figuras 32 e 33 representam respectivamente a situação da igreja em fevereiro de 2011 (durante o levantamento de campo desta pesquisa) e em junho de 2012, na finalização de sua restauração, que foi concluída no início de agosto de 2012 após um atraso de 18 anos.

Figura 32 - Fachada Principal da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda na época do levantamento de campo desta pesquisa.



Fonte: O AUTOR (2011).

Figura 33 - Fachada Principal da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda na época da finalização de sua restauração.



Fonte: O AUTOR (2012).

Descrição arquitetônica:

Nave única. Frontispício com porta principal em arco pleno e ombreiras, ladeada por conjunto simétrico de colunas com capitel jônico e coroamento por pináculo piramidal. Janelas do coro de verga reta, nicho central e, entre as janelas, cornija reta, frontão em volutas com pináculos e cruz. Torres sineiras com aberturas em seteiras, janela sineira em arco, cúpula e pináculos. A portada do lado direito é o que restou do acesso principal do convento. A fachada lateral direita, com arcada e, no piso correspondente ao evangelho, conjunto de janelas de vergas retas. A fachada lateral esquerda apresenta janelas em arco abatido alternadas por outras retas. Cobertura da nave, em duas águas, sem forro, com madeiramento aparelhado. Coro guarnecido por grade de balaustrada, tribunas com balaústres torneados. Púlpitos pintados com douração e sanefas do mesmo estilo. Havia treze capelas laterais, hoje completamente alteradas pela sua transformação em altares laterais, com vários tipos de composição nos seus retábulos. Capela-mor com pinturas no teto. Piso em mosaicos. Presbitério no mesmo nível até atingir os cadeirais laterais em madeira, com entalhes. O retábulo da talha, com douração, apresenta colunas de estilo clássico. Altar-mor com sacrários. Entre as colunas, nichos com as imagens, sendo o arco cruzeiro do nicho central com trono e imagem (CARRAZZONI, 1980).

3.2.3 Varredura a *laser* e imageamento dos objetos de estudo

3.2.3.1 Objeto de estudo 1

Após um reconhecimento preliminar no entorno da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus, foram fixados 11 alvos impressos em papel (20 cm x 30 cm) sobre algumas regiões da mesma (figura 34). Estes alvos representam pontos fixos que foram necessários para combinar as diversas varreduras de uma mesma cena (fachada principal) em um sistema topográfico local.

Figura 34 - Localizações dos alvos (contidos nos retângulos vermelhos).



Fonte: O AUTOR (2011).

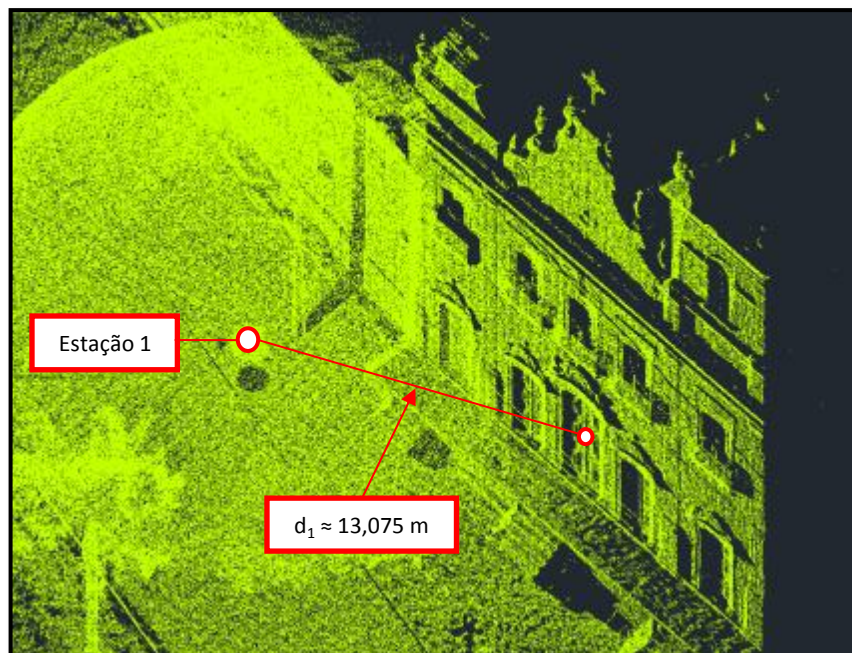
Posteriormente, o *laser scanner* Z+F Imager 5010 em conjunto com a câmara panorâmica M-Cam foi configurado em uma resolução (modo *high*) igual à largura do passo angular (horizontal e vertical) de $0,036^\circ$. Isto resultou em uma resolução angular (horizontal/vertical) de 10.000 pontos/ 360° (127.000 pontos/segundo). O diâmetro do feixe *laser* foi de aproximadamente 3,5 mm. O campo de visão do *laser scanner* foi limitado em 320° na direção vertical e 360° na direção horizontal. Este equipamento utiliza a técnica de medição por diferença de fase (*Phase-shift*) para medir a distância até um objeto que reflete o feixe *laser* emitido. É um instrumento autônomo, sem necessidade de um *laptop* ou eletricidade no campo. A câmara panorâmica foi configurada para obter imagens em 360° a partir de três ângulos verticais fixos, permitindo assim a visualização em vista de bolha (*Bubble View*). A visão geral do levantamento de campo do objeto de estudo 1, com 4 estações, pode ser visualizada através da figura 35. Inicialmente foi realizada a varredura a *laser* na estação 1 (figura 36), onde o espelho desviou o feixe *laser* em direções preestabelecidas a partir do eixo vertical durante cada etapa de rotação horizontal, necessitando de apenas 182° de rotação horizontal para cobrir o total de 360° em azimute. Em cada estação utilizada, após a conclusão da varredura a *laser*, foram obtidas imagens da igreja e seu entorno imediato através da câmara panorâmica M-Cam.

Figura 35 - Visão geral do levantamento de campo do objeto de estudo 1.



Fonte: O AUTOR (2011).

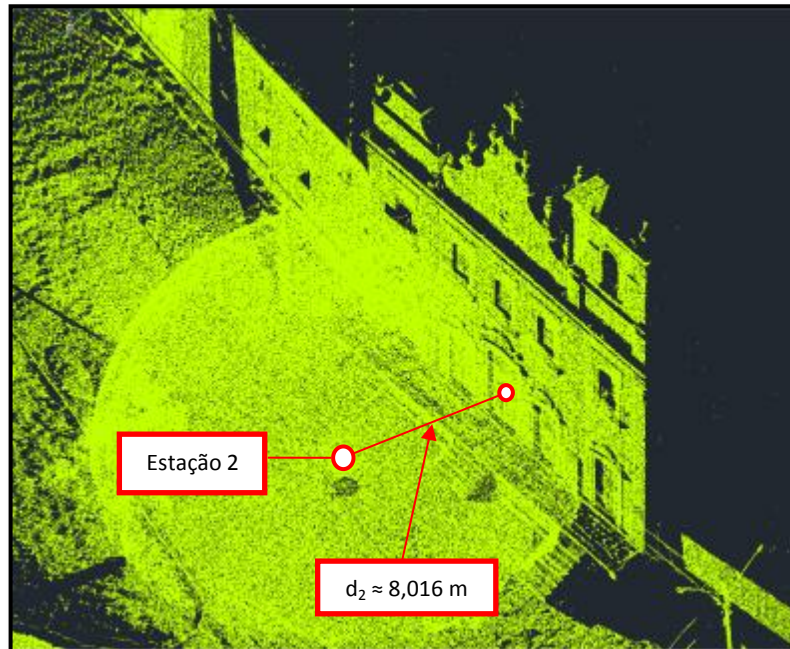
Figura 36 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 1.



Fonte: O AUTOR (2012).

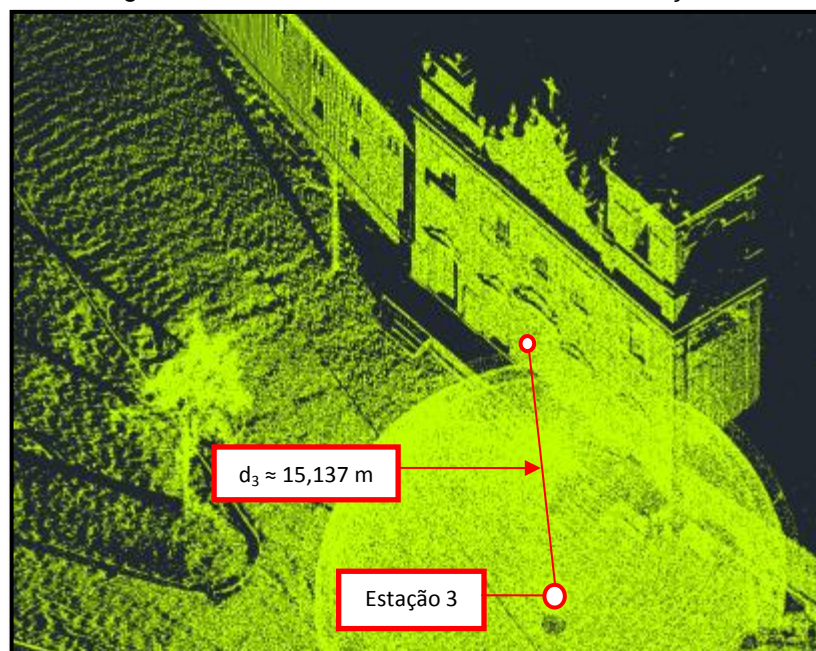
Em procedimento análogo ao realizado na estação 1, procedeu-se à varredura a *laser* e imageamento na estação 2 (figura 37), estação 3 (figura 38) e estação 4 (figura 39). O tempo utilizado para todo o levantamento foi de 1 hora e 20 minutos.

Figura 37 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 2.



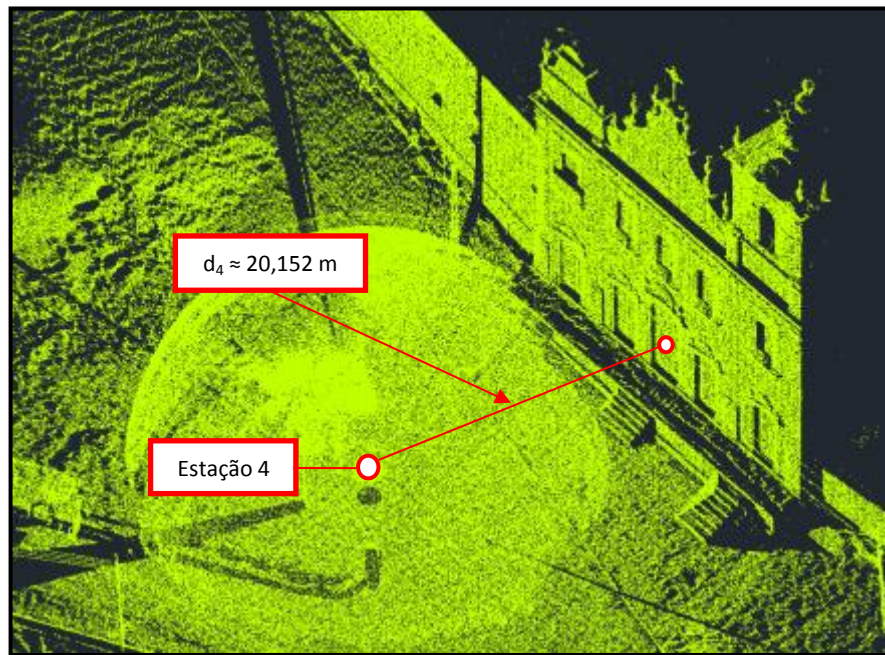
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 38 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 3.



Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 39 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 4.



Fonte: O AUTOR (2012).

3.2.3.2 Objeto de estudo 2

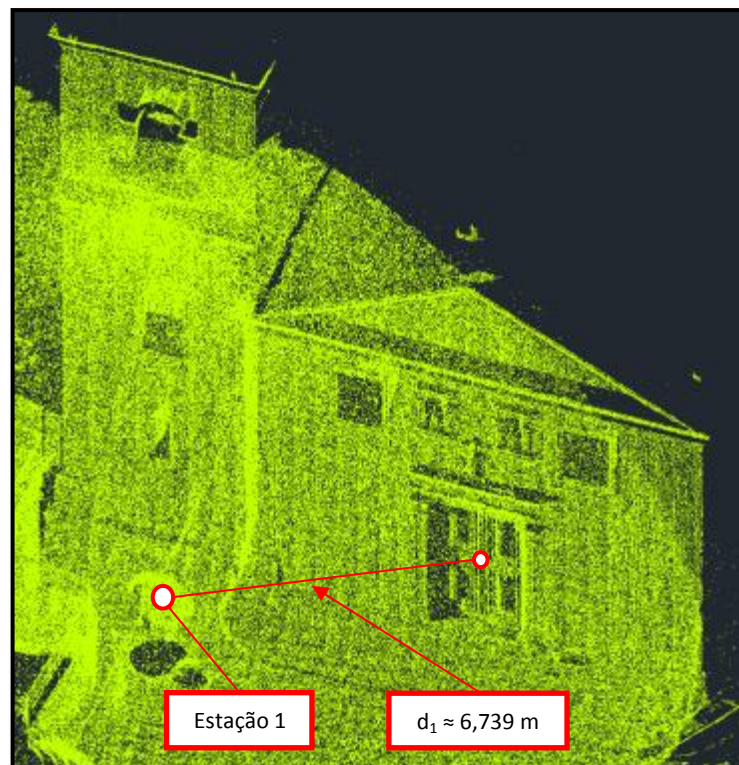
Após o término da varredura a *laser* e imageamento da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus, foi executado o reconhecimento preliminar da Igreja dos Santos Cosme e Damião, que está localizada próxima da igreja anterior. No objeto de estudo 2 foram fixados 6 alvos impressos em papel (20 cm x 30 cm) sobre algumas regiões do mesmo. Os equipamentos (*laser scanner* Z+F Imager 5010 em conjunto com a câmara panorâmica M-Cam) permaneceram com as mesmas configurações que foram utilizadas na varredura a *laser* e imageamento do objeto de estudo 1. A visão geral do levantamento de campo do objeto de estudo 2, com 3 estações, pode ser visualizada através da figura 40. Os detalhes das varreduras a *laser* nas estações 1, 2 e 3, estão demonstrados através das figuras 41, 42 e 43, respectivamente. O tempo utilizado para todo o levantamento foi de 40 minutos.

Figura 40 - Visão geral do levantamento de campo do objeto de estudo 2.



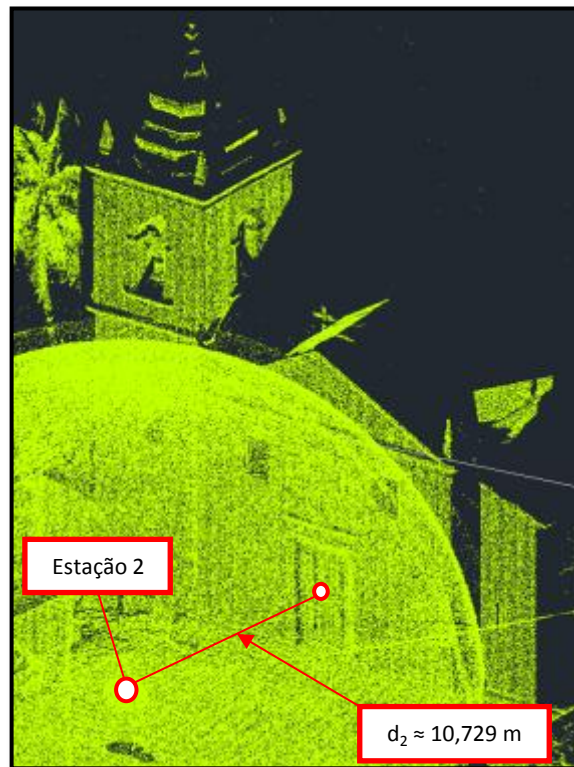
Fonte: O AUTOR (2011).

Figura 41 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 1.



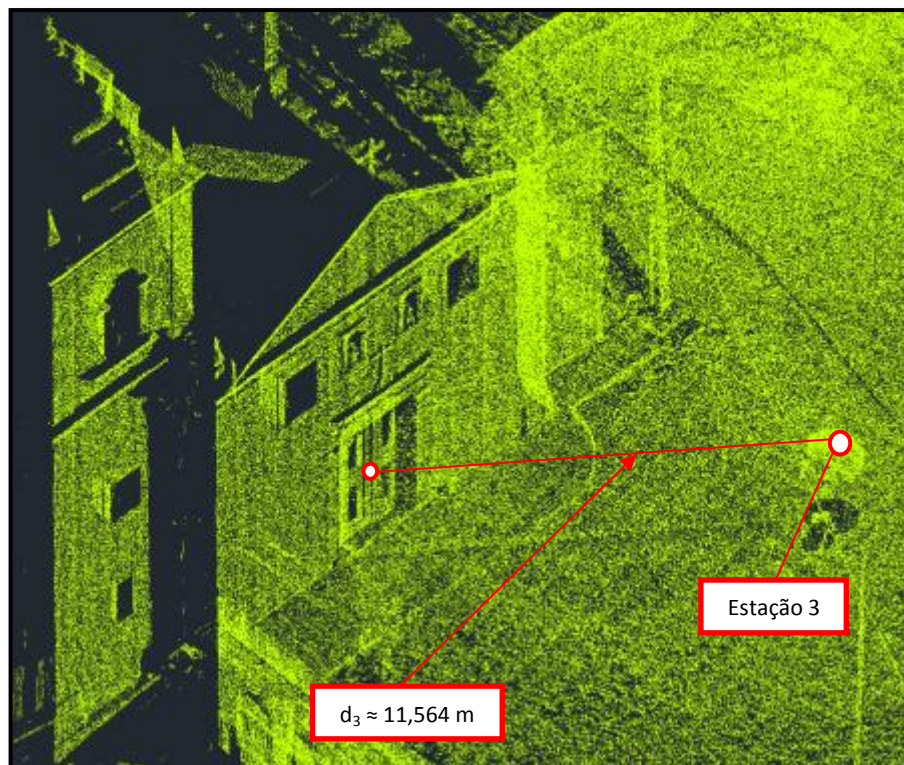
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 42 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 2.



Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 43 - Detalhe da varredura a *laser* na estação 3.



Fonte: O AUTOR (2012).

3.2.3.3 Objeto de estudo 3

Inicialmente, foi realizado um reconhecimento preliminar para definir os locais onde seria estacionado o *laser scanner*. Posteriormente o *laser scanner* Topcon GLS-1500 foi configurado para uma taxa de varredura de 30.000 pontos/segundo e com diâmetro do feixe *laser* de aproximadamente 6 mm. Em seguida, o equipamento foi posicionado na estação 1 (figura 44) e foram realizadas medições do mesmo até 3 pontos de amarração (detalhe de um destes pontos, pode ser visto na figura 45) sobre o terreno, de modo a definir um sistema topográfico local. Depois que o *laser scanner* estava devidamente orientado, obteve-se as imagens da igreja e seu entorno imediato através da câmara interna. Concluído o imageamento, o equipamento realizou a varredura a *laser* na estação 1 (figura 46).

Figura 44 - *Laser scanner* Topcon GLS-1500 posicionado na estação 1 e orientando-se em relação ao ponto de amarração 1 (P1).



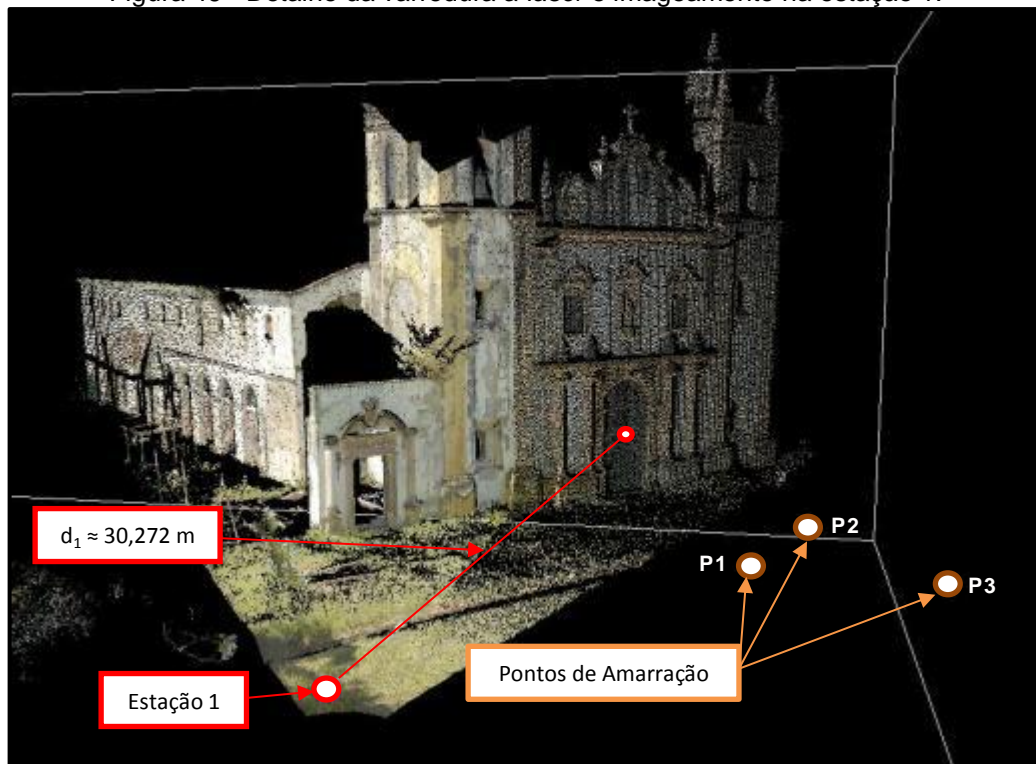
Fonte: O AUTOR (2011).

Figura 45 - Detalhe do ponto de amarração 3 (P3) da varredura a *laser*.



Fonte: O AUTOR (2011).

Figura 46 - Detalhe da varredura a *laser* e imageamento na estação 1.



Fonte: O AUTOR (2011).

Em procedimento análogo ao realizado na estação 1, procedeu-se ao imageamento e à varredura a *laser* na estação 2 (figura 47).

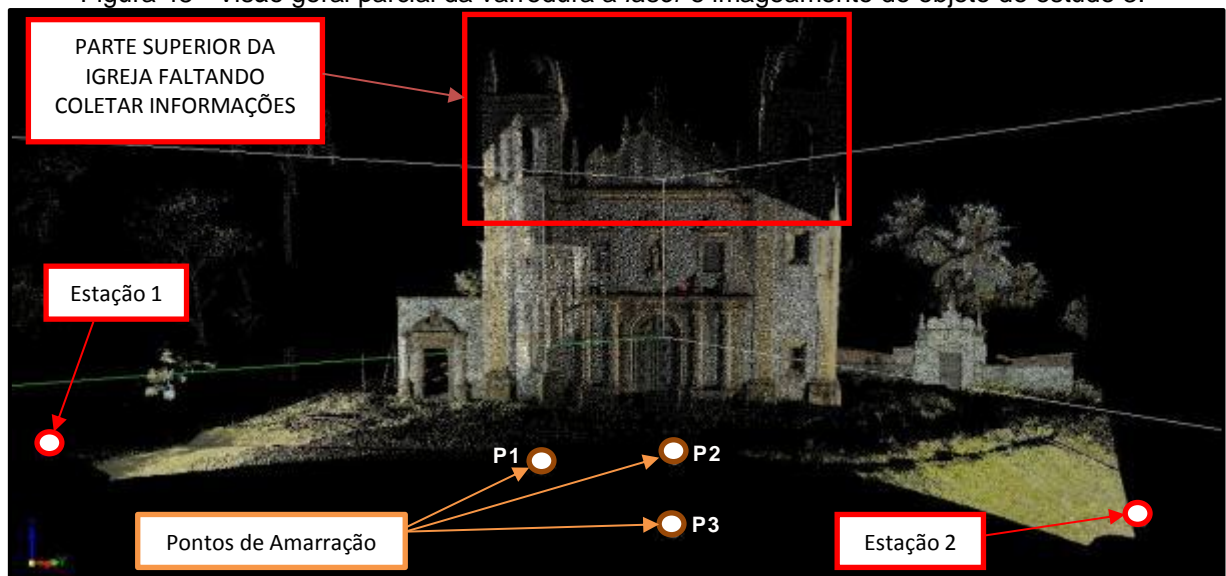
Figura 47 - Detalhe da varredura a *laser* e imageamento na estação 2.



Fonte: O AUTOR (2011).

Após a realização dos levantamentos nas estações 1 e 2, foi feito o descarregamento dos dados no *laptop* para verificar se necessitaria coletar mais alguma informação. Constatou-se que ficou faltando coletar informações da parte superior da igreja (figura 48).

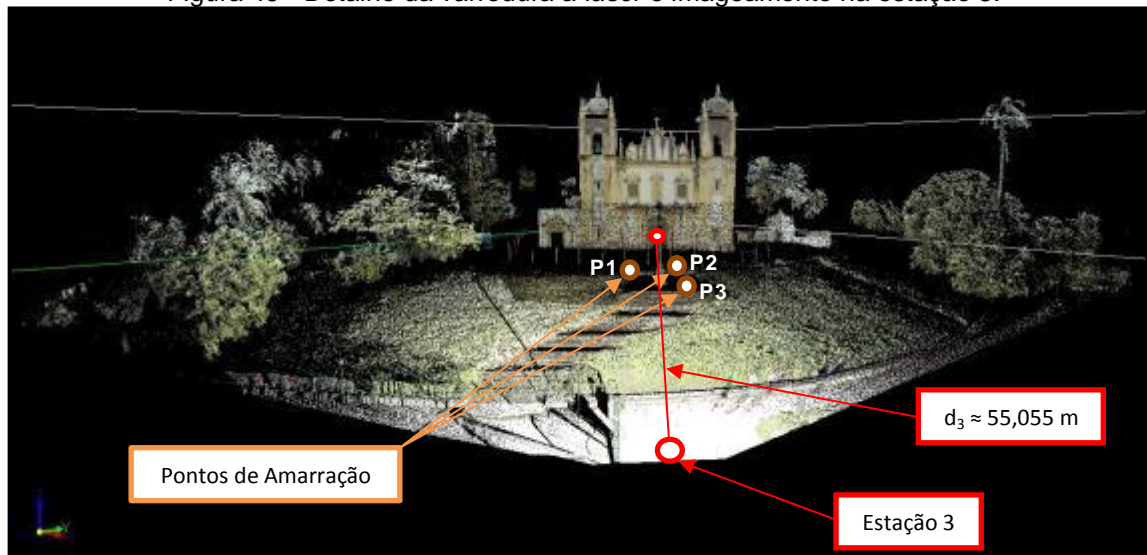
Figura 48 - Visão geral parcial da varredura a *laser* e imageamento do objeto de estudo 3.



Fonte: O AUTOR (2011).

Em função desta situação foi necessário colocar o *laser scanner* em uma nova estação (estação 3) de modo a coletar as informações restantes da parte superior da igreja (figura 49), concluindo o levantamento das informações necessárias desta igreja em 3 horas e 20 minutos.

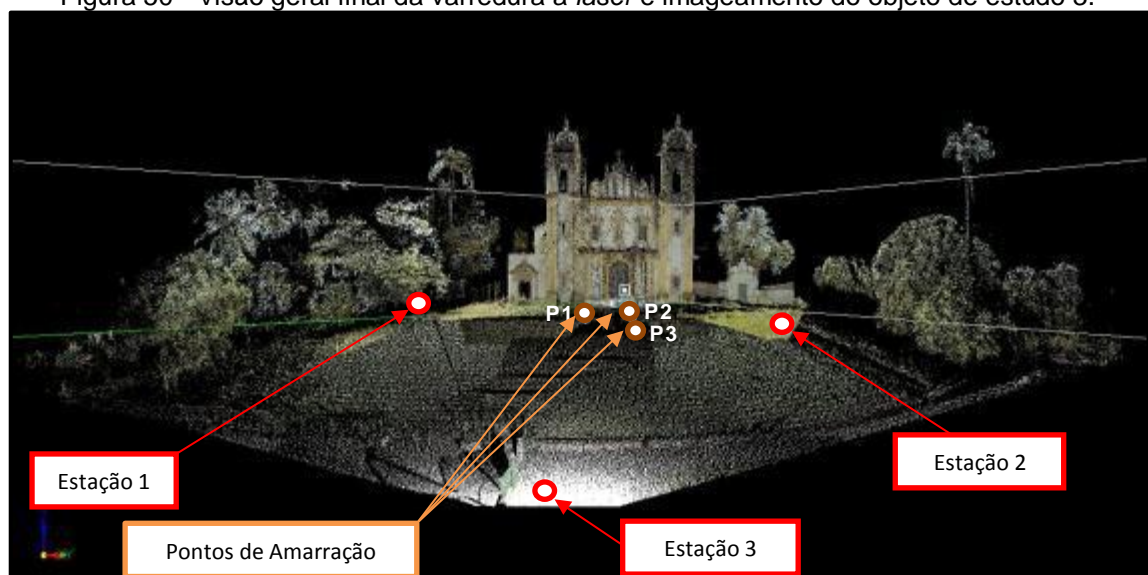
Figura 49 - Detalhe da varredura a *laser* e imageamento na estação 3.



Fonte: O AUTOR (2011).

A visão geral final da varredura a *laser* e imageamento pode ser visualizada através da figura 50.

Figura 50 - Visão geral final da varredura a *laser* e imageamento do objeto de estudo 3.



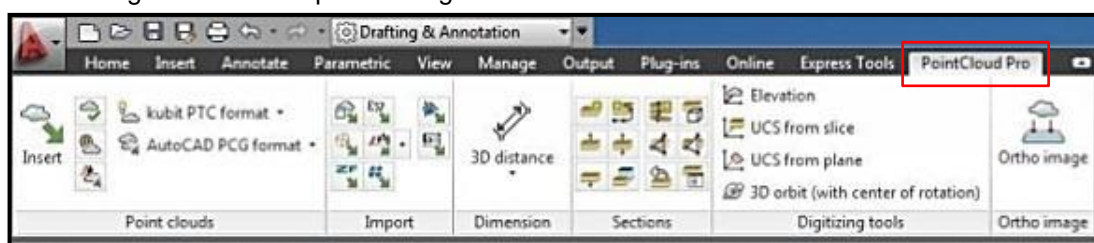
Fonte: O AUTOR (2011).

3.2.4 Processamento dos dados

3.2.4.1 Objeto de Estudo 1

Os arquivos brutos (originais) obtidos através do *laser scanner* Z+F Imager 5010 possuem o formato (*.zfs) e puderam ser importados no *software* proprietário AutoCAD 2012, através do *software* proprietário PointCloud Pro, da empresa Kubit, que consiste em uma aplicação para visualização e processamento de nuvem de pontos obtidos a partir de varredura a *laser*. O PointCloud Pro, ao ser instalado, torna-se uma guia (contendo ferramentas) no AutoCAD 2012 (figura 51) e possibilita a importação de dados de varredura a *laser* de diversos fabricantes.

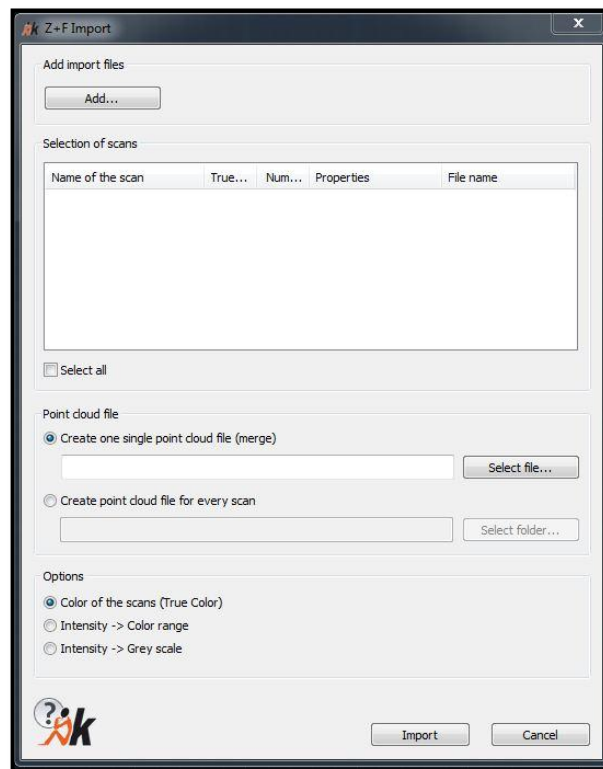
Figura 51 - Visão parcial da guia de ferramentas do *software* PointCloud Pro.



Fonte: O AUTOR (2012).

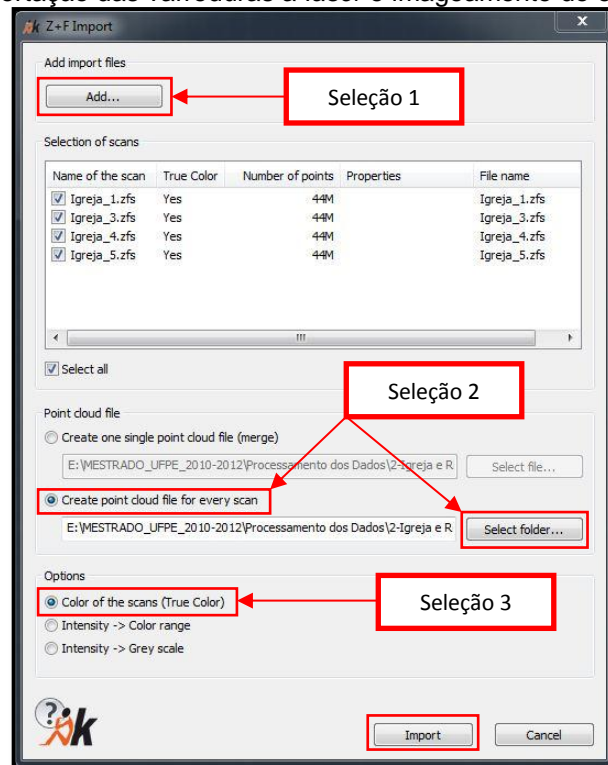
A importação dos arquivos no formato (*.zfs) e conversão dos mesmos para o formato nativo para nuvem de pontos *laser* (*.pcg) do AutoCAD, pôde ser realizada através da ferramenta *Import Z+F* contido no painel *Import* do PointCloud Pro. Após executar a ferramenta citada, apareceu a janela *Z+F Import* conforme a figura 52. Nesta janela, foram inseridas as varreduras a *laser* das 4 estações do objeto de estudo 1 (Seleção 1), definiu-se que deveria ser criado um arquivo separado no formato (*.pcg) para cada estação e o local onde os arquivos deveriam ser armazenados (Seleção 2), e também que as nuvens de pontos deveriam ser demonstradas com as cores verdadeiras do objeto de estudo 1 (Seleção 3). O procedimento foi concluído clicando-se no ícone *Import* (figura 53). Após a importação dos dados, foram definidas as unidades de comprimento na varredura a *laser* e no desenho como sendo em metros (figura 54).

Figura 52 - Janela Z+F Import.



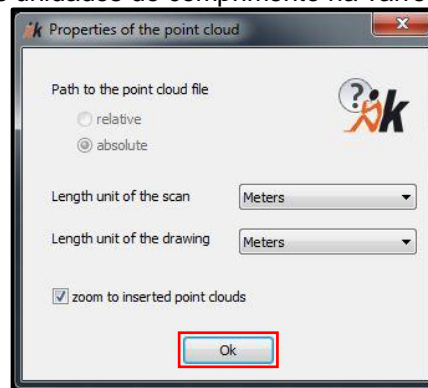
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 53 - Importação das varreduras a laser e imageamento do objeto de estudo 1.



Fonte: O AUTOR (2012).

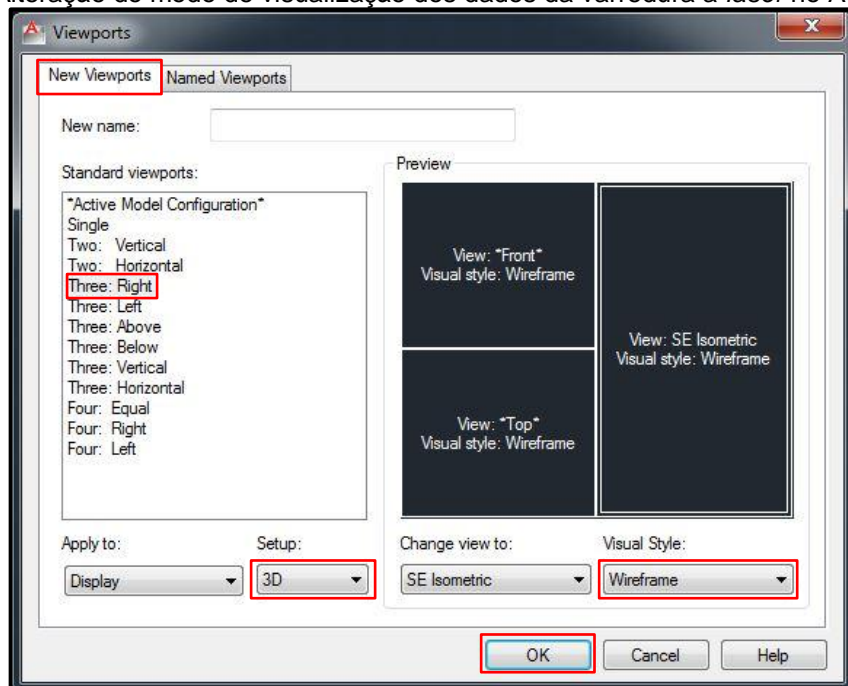
Figura 54 - Definição das unidades de comprimento na varredura a *laser* e no desenho.



Fonte: O AUTOR (2012).

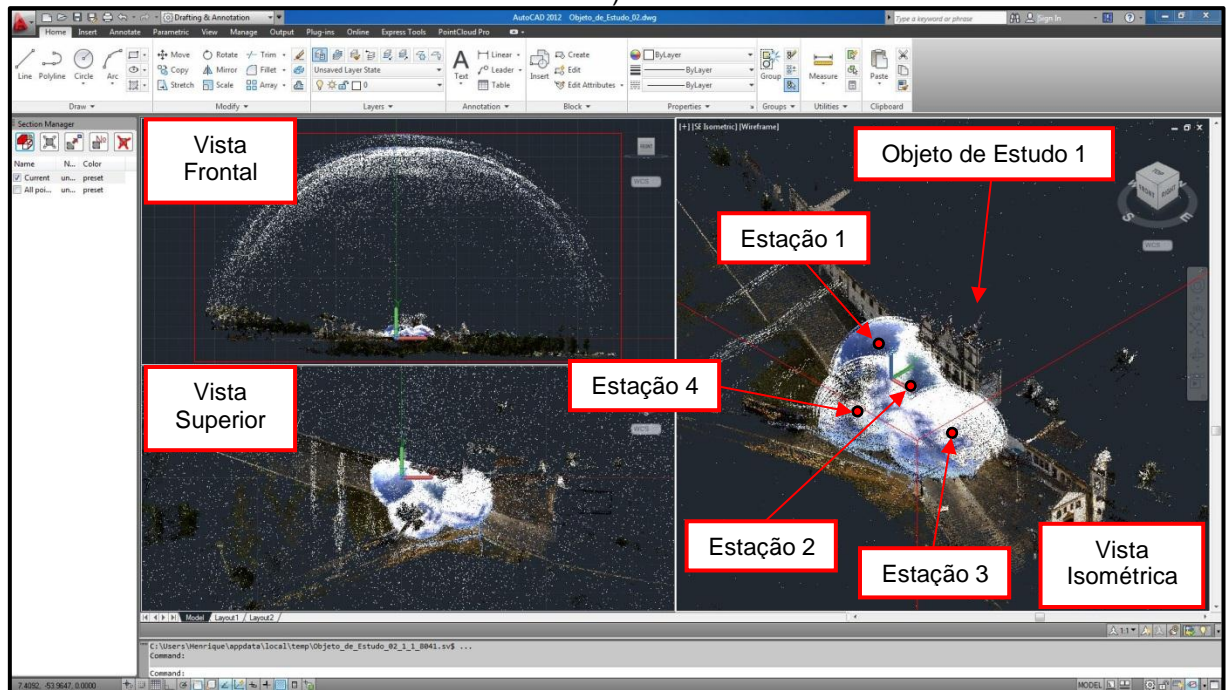
Através da guia *View* e do painel *Viewports* (ferramenta *Named*), no AutoCAD 2012, alterou-se a visualização dos dados importados para três vistas diferentes (frontal, superior e isométrica), representação em três dimensões espaciais (3D) e o estilo visual para *Wireframe* (armação de arame), conforme a figura 55 (retângulos vermelhos). Após esta configuração, os dados puderam ser visualizados como demonstrado na figura 56.

Figura 55 - Alteração do modo de visualização dos dados da varredura a *laser* no AutoCAD 2012.



Fonte: O AUTOR (2012).

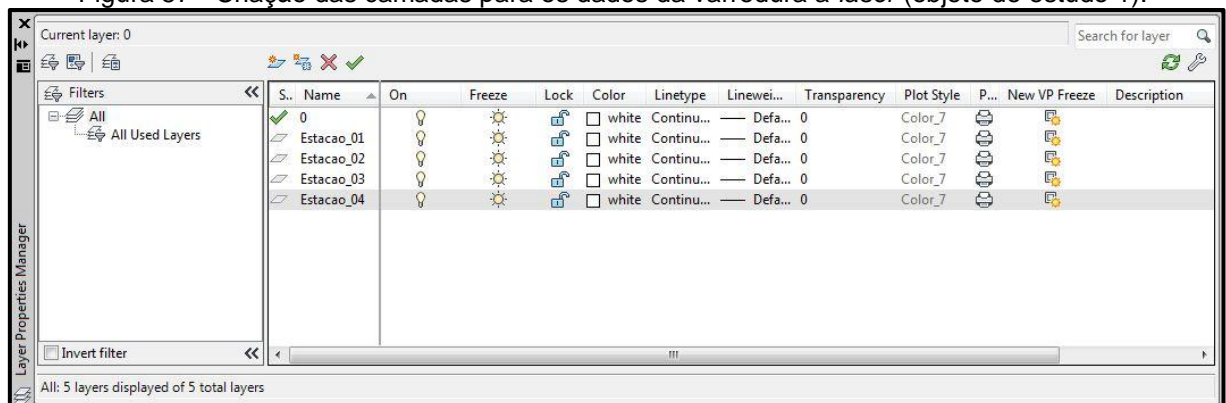
Figura 56 - Visualização dos dados da varredura a *laser* em três vistas diferentes (objeto de estudo 1).



Fonte: O AUTOR (2012).

Posteriormente, criaram-se quatro camadas (*layers*) separadas no AutoCAD 2012, uma para cada uma das estações (Estacao_01, Estacao_02, Estacao_03 e Estacao_04), como mostrado na figura 57 e inseriu-se a varredura de cada estação na sua respectiva camada. Os dados obtidos a partir das quatro estações juntas possuíam um total de 105 milhões de pontos.

Figura 57 - Criação das camadas para os dados da varredura a *laser* (objeto de estudo 1).

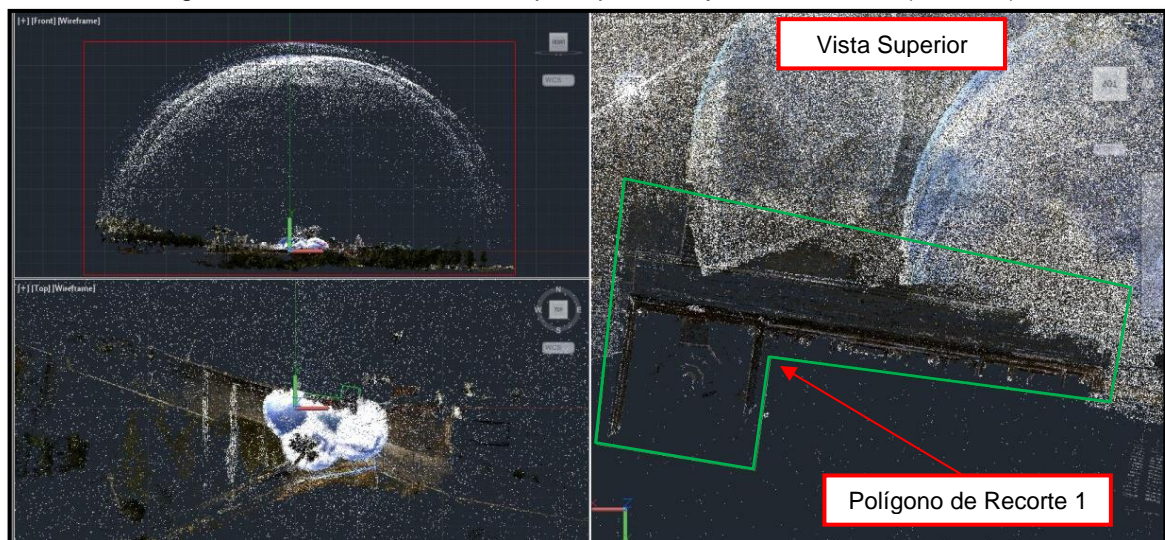


Fonte: O AUTOR (2012).

Utilizando-se como referência os dados obtidos a partir da estação 4 (posição mais perpendicular em relação à fachada principal), referenciou-se as demais estações (1, 2 e 3) em um único sistema de coordenadas através de feições naturais

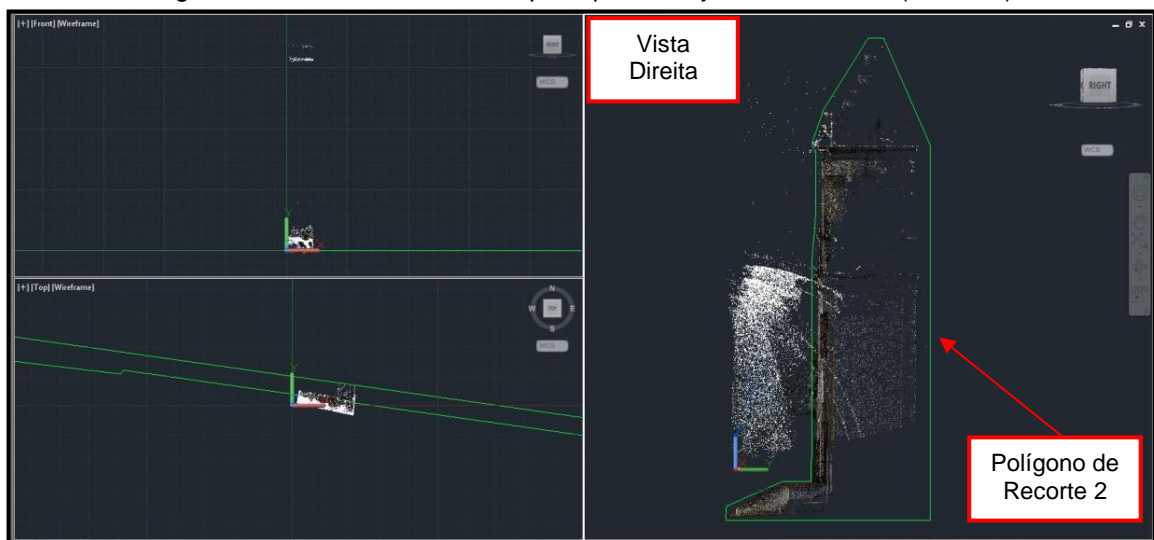
e dos alvos que foram utilizados durante o levantamento de campo. Com os dados das quatro estações orientados entre si, executou-se o recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (polígonos verdes) em três passos (figuras 58, 59 e 60), através da ferramenta *Define clipping polygon* do painel *Sections* no PointCloud Pro. O recorte final pode ser visto através da figura 61, contendo a fachada principal em três dimensões e com a textura fotorealística.

Figura 58 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (Passo 1).



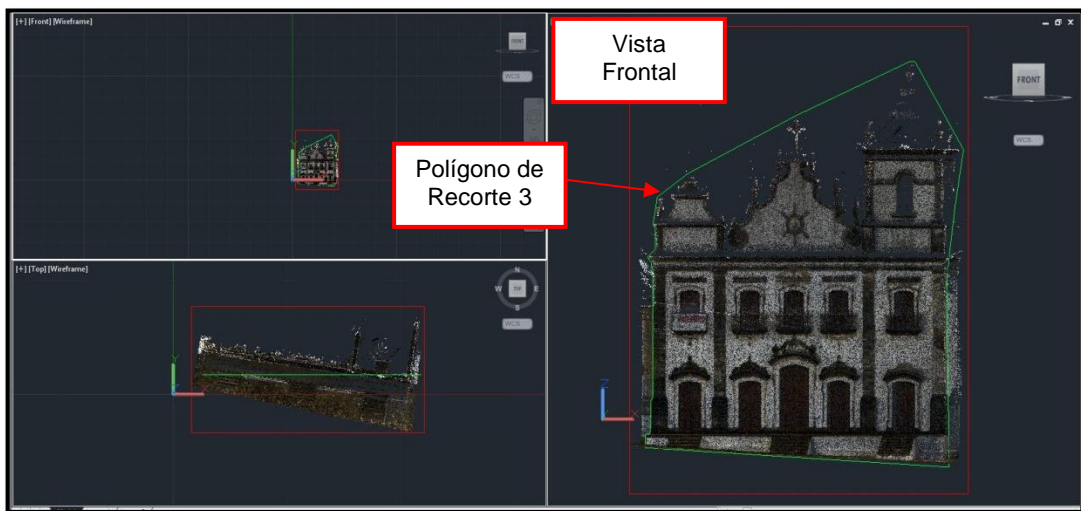
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 59 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (Passo 2).



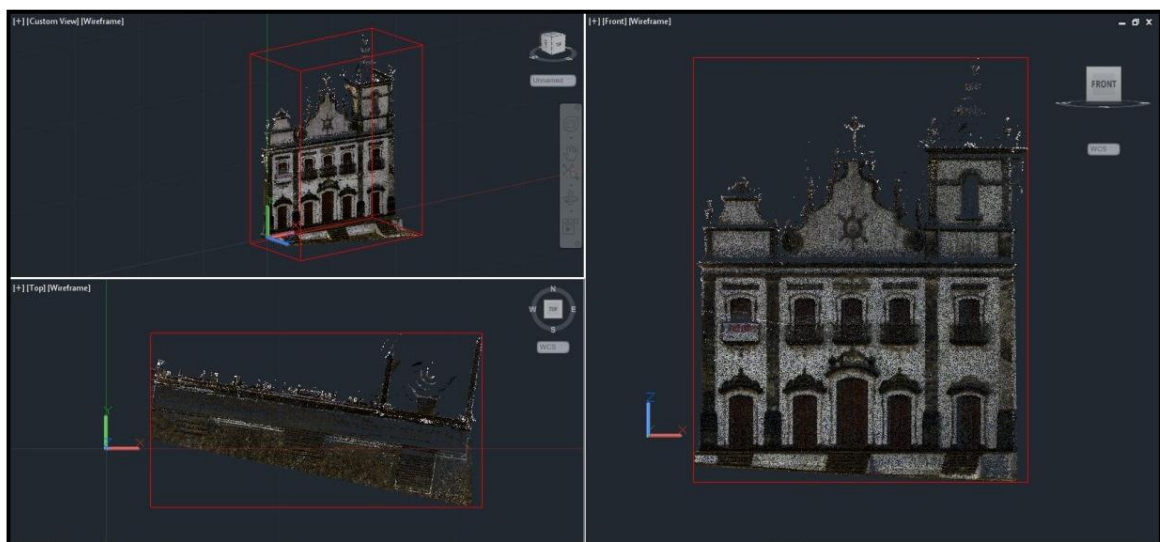
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 60 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 1 (Passo 3).



Fonte: O AUTOR (2012).

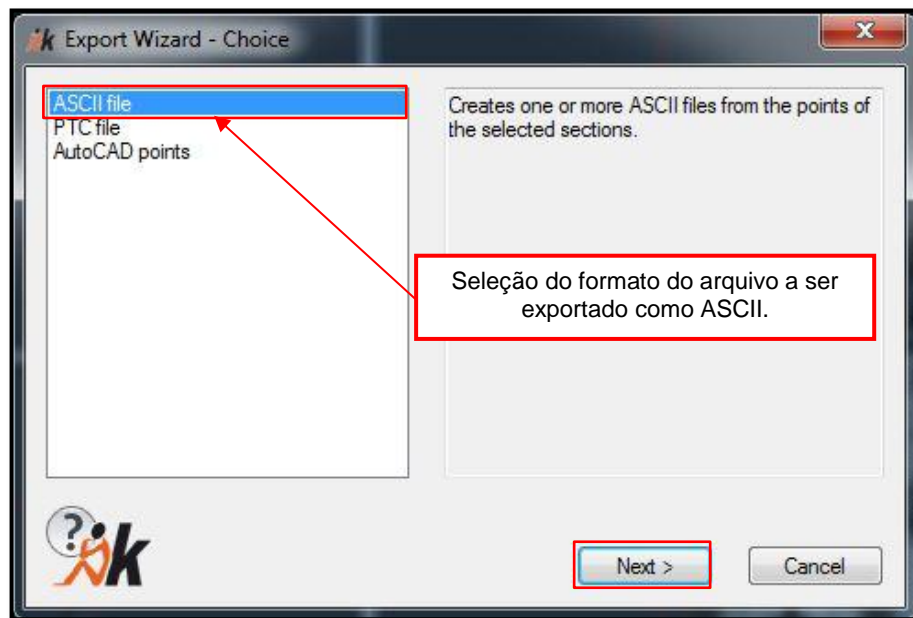
Figura 61 - Recorte final da fachada principal do objeto de estudo 1 em três dimensões e com textura fotorealística.



Fonte: O AUTOR (2012).

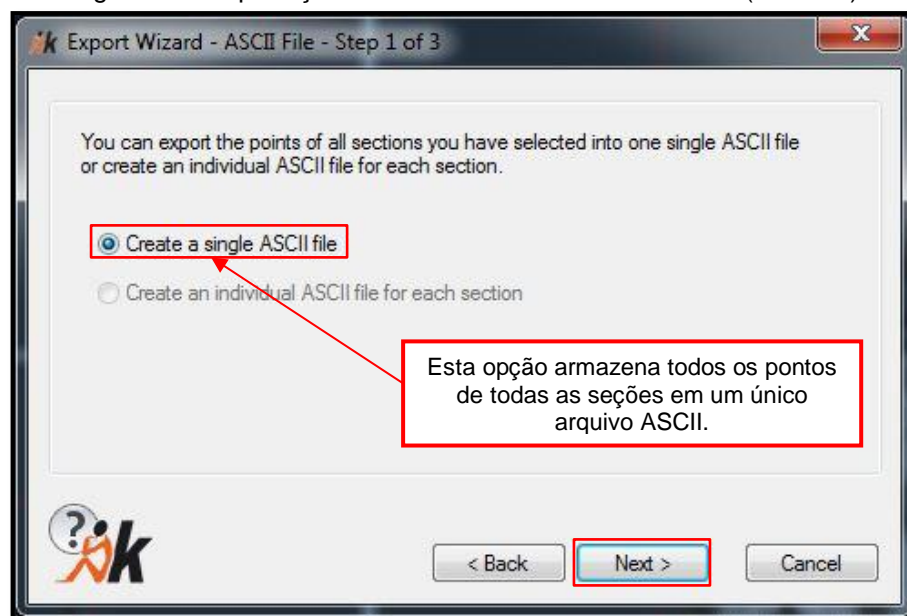
O recorte final precisou ser exportado através da ferramenta *Export selected sections*, no PointCloud Pro, para o formato ASCII (figura 62), contendo as coordenadas (X,Y,Z) e a cor no sistema RGB (*Red-Green-Blue* – Vermelho-Verde-Azul) de cada ponto da varredura a *laser*. Este procedimento foi executado em três passos (figura 63, 64 e 65):

Figura 62 - Exportação do recorte final no formato ASCII.



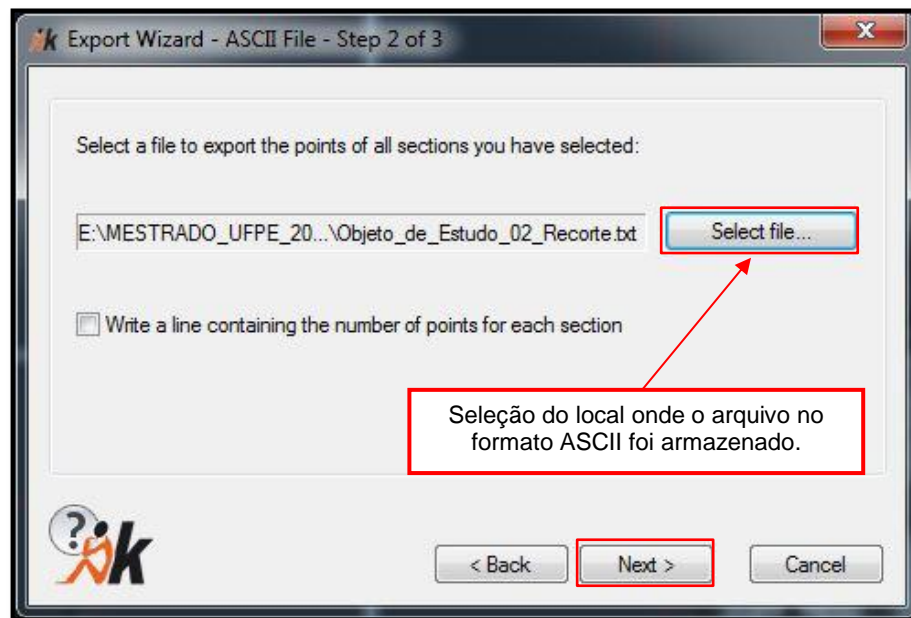
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 63 - Exportação do recorte final no formato ASCII (Passo 1).



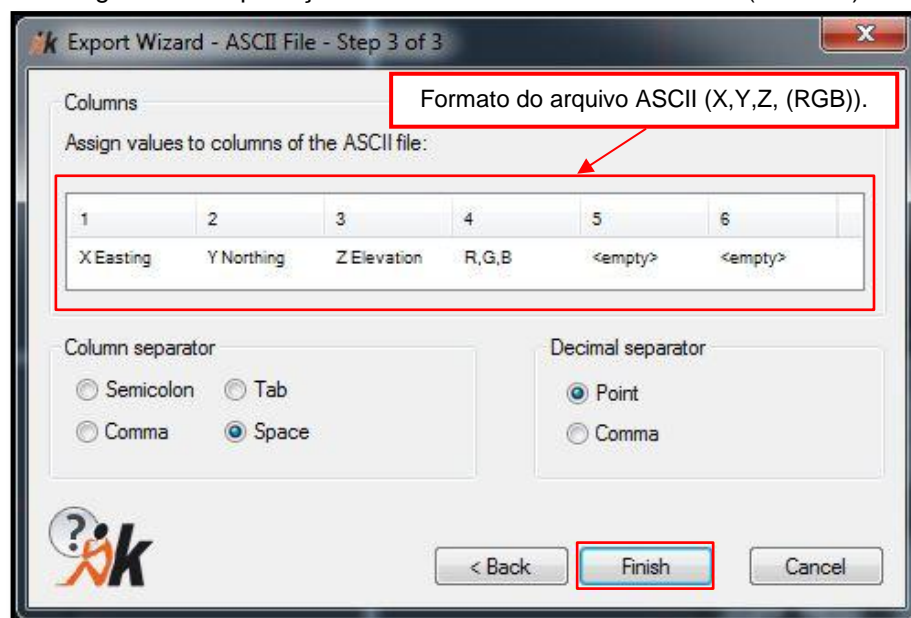
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 64 - Exportação do recorte final no formato ASCII (Passo 2).



Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 65 - Exportação do recorte final no formato ASCII (Passo 3).



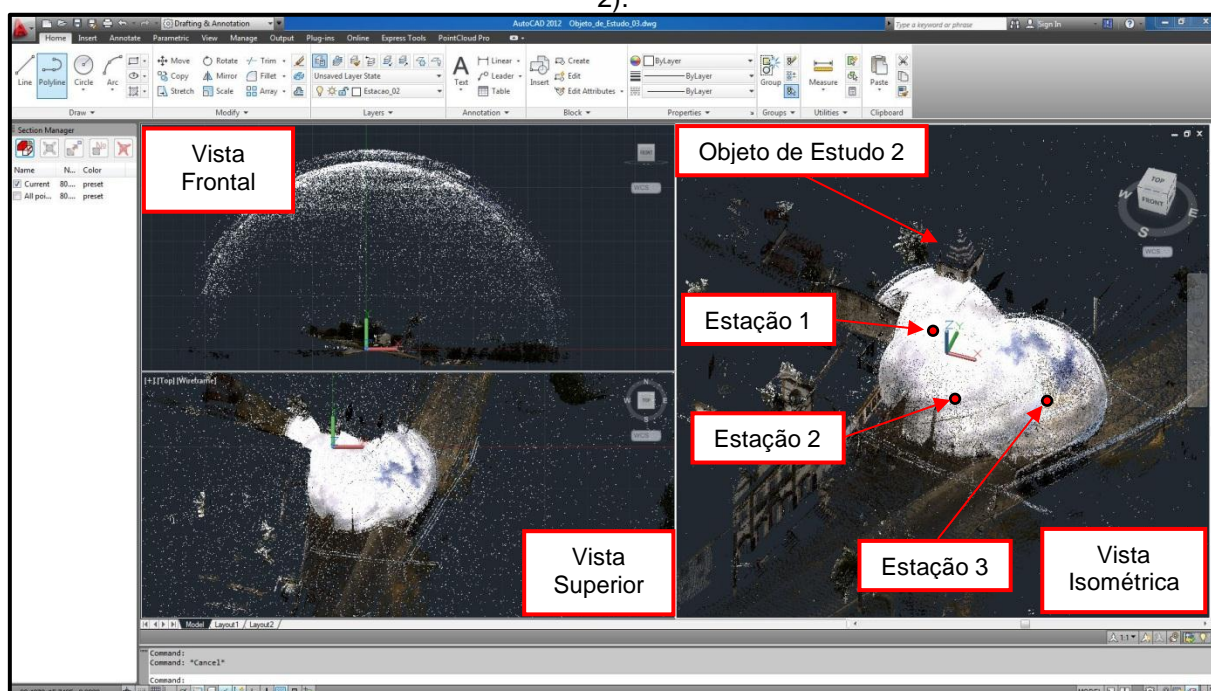
Fonte: O AUTOR (2012).

O recorte final no formato ASCII foi depois importado no AutoCAD 2012, no formato (*.pcg), através do painel *Import* e executando a ferramenta *Import point cloud* (ASCII). Através do ANEXO D pode-se visualizar o resultado final (escala 1:100) contendo 16,3 milhões de pontos na vista frontal e em perspectiva isométrica.

3.2.4.2 Objeto de Estudo 2

Através de procedimento semelhante ao que foi executado no item 3.2.4.1 (objeto de estudo 1) foram importados os arquivos das três estações no formato (*.zfs) e que foram convertidos para o formato (*.pcg) no AutoCAD 2012. Após a conversão, os dados puderam ser demonstrados em três vistas diferentes (frontal, superior e isométrica) conforme a figura 66.

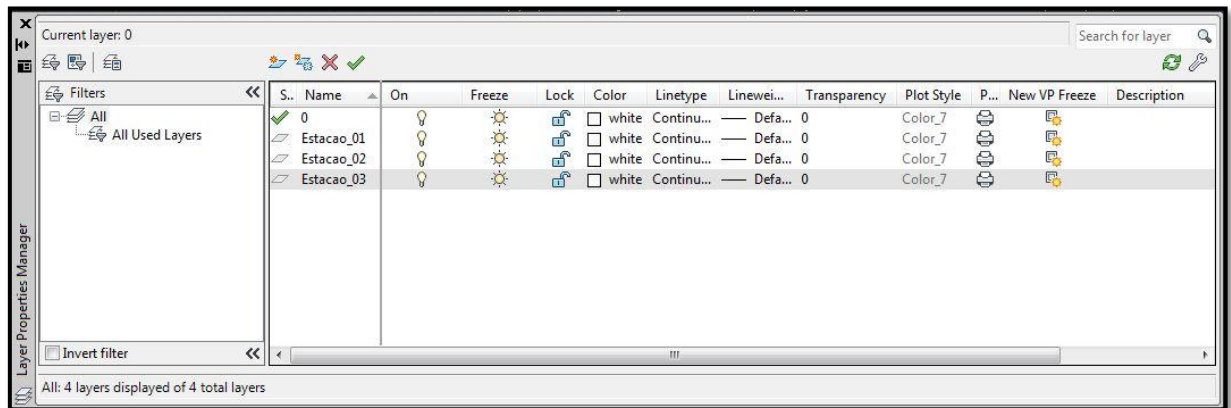
Figura 66 - Visualização dos dados da varredura a laser em três vistas diferentes (objeto de estudo 2).



Fonte: O AUTOR (2012).

Posteriormente criaram-se três camadas (*layers*) separadas no AutoCAD 2012, uma para cada uma das estações (Estacao_01, Estacao_02 e Estacao_03), como mostrado na figura 67 e inseriu-se a varredura de cada estação na sua respectiva camada. Os dados obtidos a partir das três estações juntas possuíam um total de 80,2 milhões de pontos.

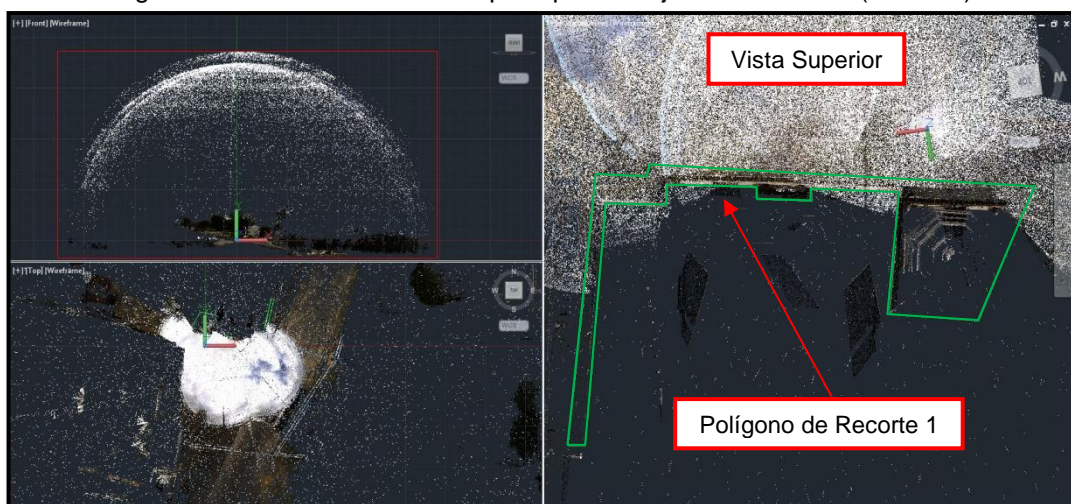
Figura 67 - Criação das camadas para os dados da varredura a *laser* (objeto de estudo 2).



Fonte: O AUTOR (2012).

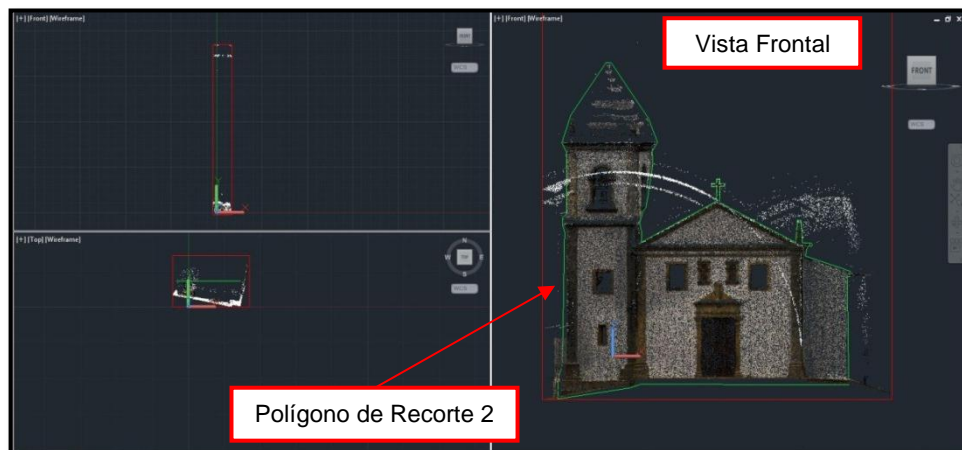
Utilizando-se como referência os dados obtidos a partir da estação 2 (posição mais perpendicular em relação a fachada principal), referenciou-se as demais estações (1 e 3) em um único sistema de coordenadas através de feições naturais e dos alvos que foram utilizados durante o levantamento de campo. Com os dados das três estações orientados entre si, executou-se o recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (polígonos verdes) em três passos (figuras 68, 69 e 70) através da ferramenta *Define clipping polygon* do painel *Sections* no PointCloud Pro. O recorte final pode ser visto através da figura 71, contendo a fachada principal em três dimensões e com a textura fotorealística.

Figura 68 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (Passo 1).



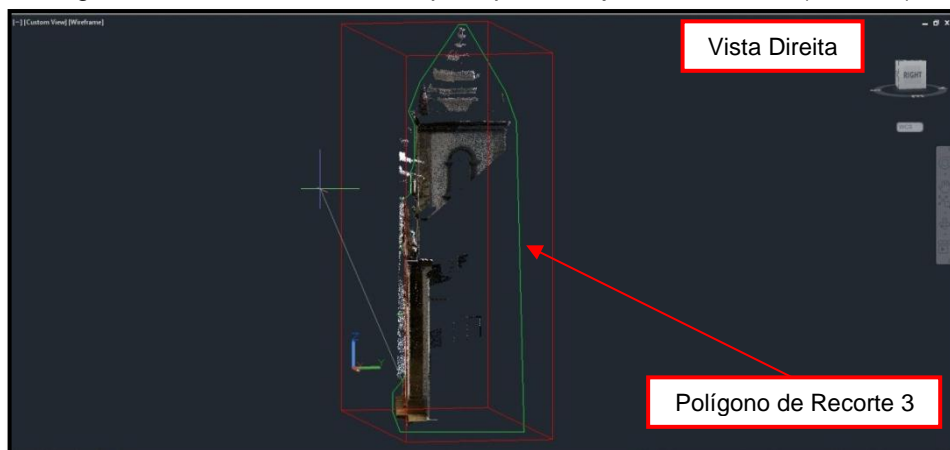
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 69 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (Passo 2).



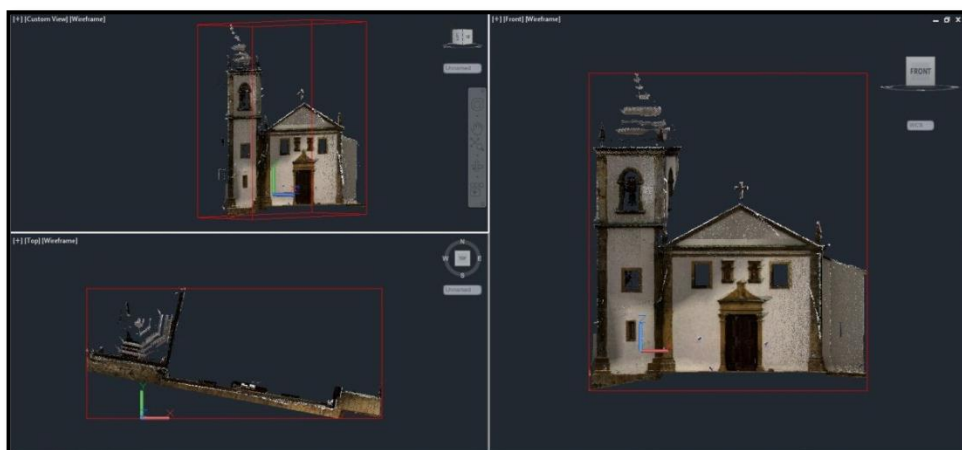
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 70 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 2 (Passo 3).



Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 71 - Recorte final da fachada principal do objeto de estudo 2 em três dimensões e com textura fotorealística.



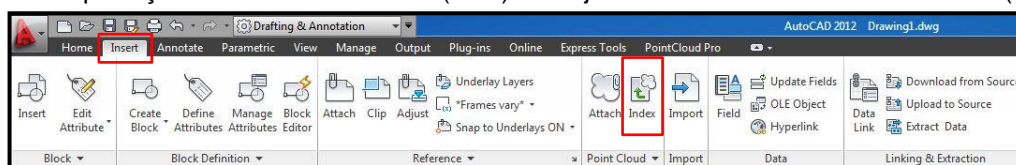
Fonte: O AUTOR (2012).

Como já demonstrado no item anterior, o recorte final foi exportado para o formato ASCII, através do *software* PointCloud Pro, e depois importado no AutoCAD 2012 no formato (*.pcg). Através do ANEXO E, pode-se visualizar o resultado final (escala 1:100), contendo 10,5 milhões de pontos na vista frontal e em perspectiva isométrica.

3.2.4.3 Objeto de Estudo 3

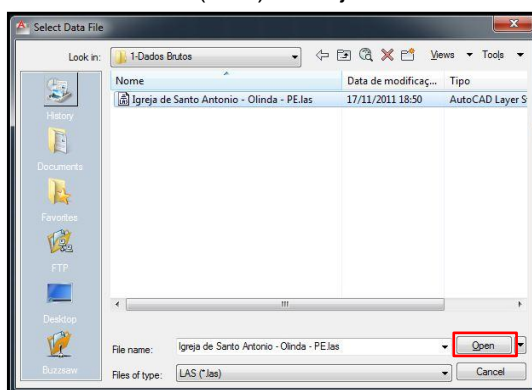
As nuvens de pontos das três estações da varredura a *laser* do objeto de estudo 3 foram fornecidas, orientadas e unidas em um único arquivo no formato (*.las). Este formato de arquivo binário é público para o intercâmbio de dados de varredura a *laser* entre fornecedores e clientes, pois mantém informações específicas como, por exemplo, as coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) bem como a cor (obtida a partir do imageamento) no sistema RGB de cada ponto da varredura a *laser*. Este arquivo foi importado no AutoCAD 2012 em dois passos, através da guia *Insert* e do painel *Point Cloud* (ferramenta *Index*), conforme as figuras 72 e 73. Após a importação, foi solicitada a conversão do mesmo para o formato nativo (*.pcg) e o local de destino onde este seria armazenado (figura 74).

Figura 72 - Importação da varredura a *laser* (*.las) do objeto de estudo 3 no AutoCAD 2012 (Passo 1).



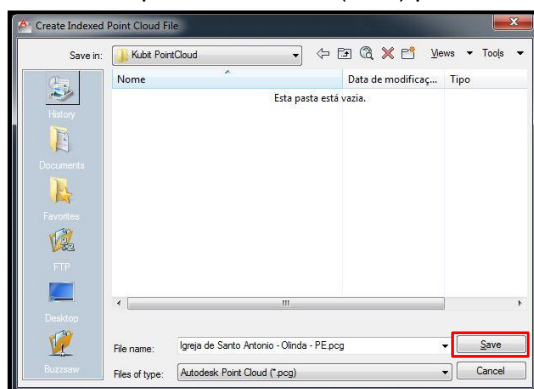
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 73 - Importação da varredura a *laser* (*.las) do objeto de estudo 3 no AutoCAD 2012 (Passo 2).



Fonte: O AUTOR (2012).

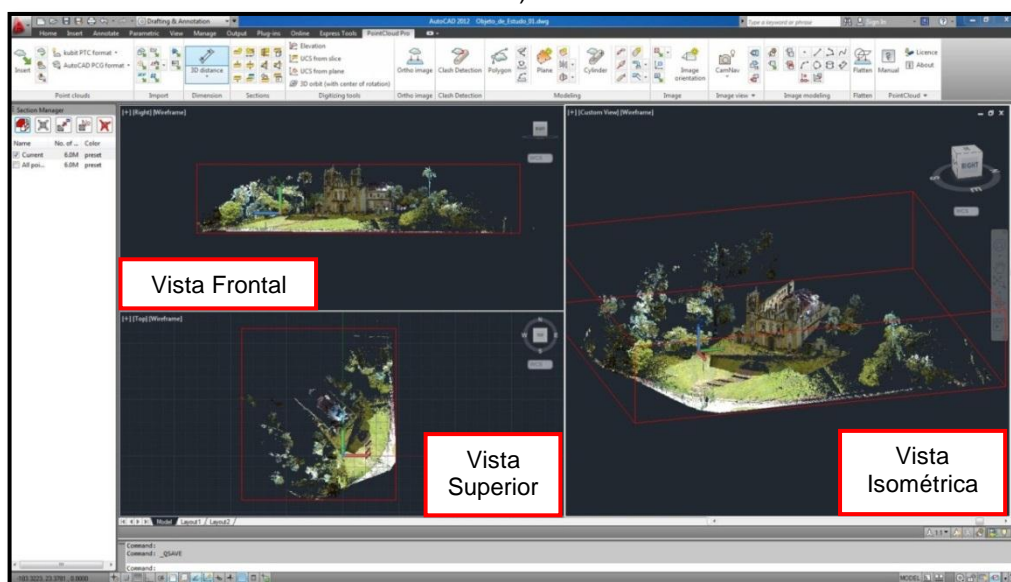
Figura 74 - Conversão do arquivo no formato (*.las) para o formato nativo (*.pcg).



Fonte: O AUTOR (2012).

Com o arquivo criado no formato (*.pcg) e inserido no AutoCAD 2012, os dados puderam ser demonstrados em três vistas diferentes (frontal, superior e isométrica) conforme a figura 75. Os dados obtidos a partir das três estações juntas possuíam um total de 6 milhões de pontos.

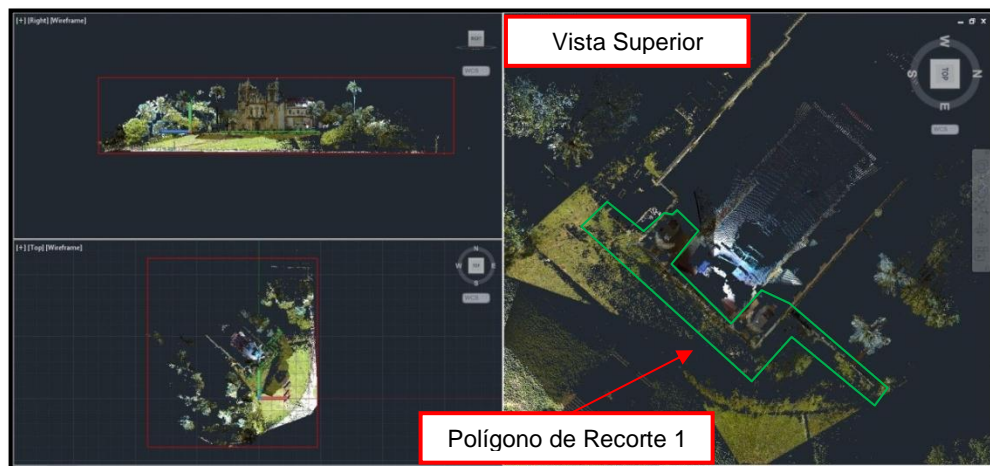
Figura 75 - Visualização dos dados da varredura a laser em três vistas diferentes (objeto de estudo 3).



Fonte: O AUTOR (2012).

Com os dados das três estações já orientados entre si executou-se o recorte da fachada principal do objeto de estudo 3 (polígonos verdes) em dois passos (figuras 76 e 77), através da ferramenta *Define clipping polygon* do painel *Sections* no PointCloud Pro. O recorte final pode ser visto através da figura 78, contendo a fachada principal em três dimensões e com a textura fotorealística.

Figura 76 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 3 (Passo 1).



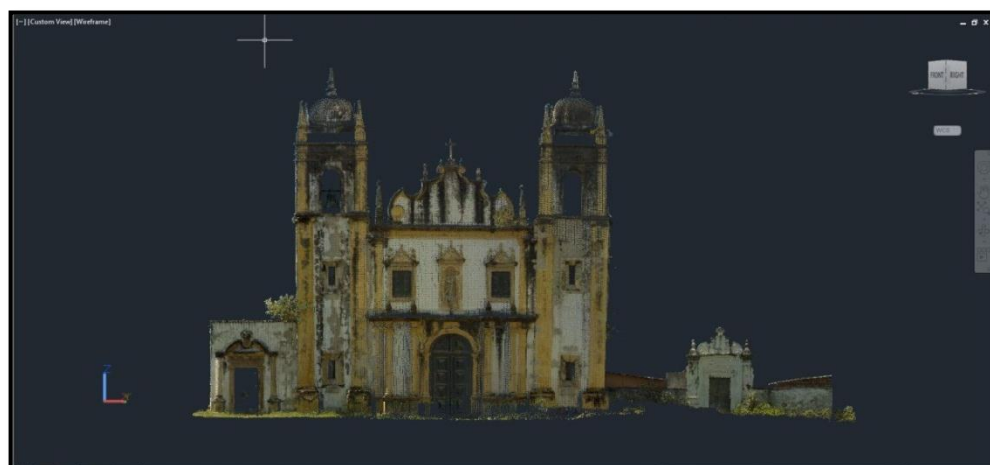
Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 77 - Recorte da fachada principal do objeto de estudo 3 (Passo 2).



Fonte: O AUTOR (2012).

Figura 78 - Recorte final da fachada principal do objeto de estudo 3 em três dimensões e com textura fotorealística.



Fonte: O AUTOR (2012).

Como já demonstrado nos itens anteriores, o recorte final foi exportado para o formato ASCII, através do *software* PointCloud Pro, e depois importado no AutoCAD 2012 no formato (*.pcg). Através do ANEXO F, pode-se visualizar o resultado final (escala 1:150) contendo 1,1 milhões de pontos na vista frontal.

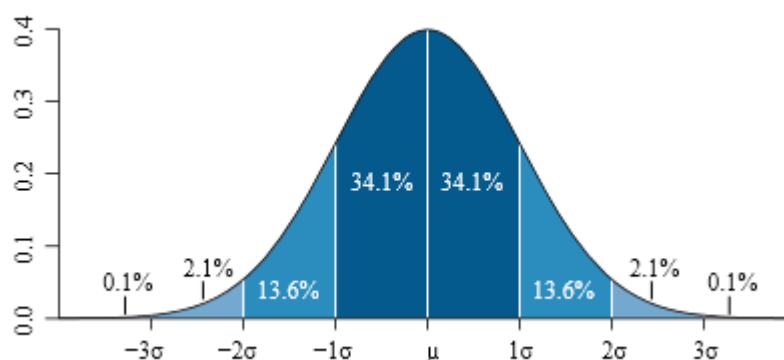
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De modo a validar os resultados (modelos 3D fotorrealísticos) obtidos no processamento dos dados (item 3.2.4) para os objetos de estudo 1, 2 e 3 comparou-se os modelos 3D com informações métricas de referência que estavam disponíveis durante o período desta pesquisa.

As medidas de tendência central fornecem informações de grande valia mas, em geral, não são suficientes para discriminar e descrever um dado conjunto com diferentes observações. As medidas de dispersão e variabilidade por sua vez, permitem visualizar a distribuição dos dados em torno do valor central. Assim, a análise realizada nesta pesquisa vem por compreender a dependência espacial e identificar a variabilidade espacial.

Em uma distribuição normal de probabilidade (figura 79) 68,3% dos valores encontram-se dentro da faixa de um desvio padrão, tanto para mais quanto para menos (1σ e -1σ) em relação à média; 95,4% dos valores encontram-se dentro da faixa de dois desvios padrão, tanto para mais quanto para menos (2σ e -2σ) em relação à média; 99,7% dos valores encontram-se dentro da faixa de três desvios padrão, tanto para mais quanto para menos (3σ e -3σ) em relação à média.

Figura 79 - Distribuição Normal de Probabilidade



Fonte: WIKIPÉDIA.

4.1 Objeto de Estudo 1

Dentre as informações métricas obtidas da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus, não havia nenhuma elevação da fachada principal, apenas plantas baixas como a elevação de registro nº 223, na escala 1:100, de 6 de abril de 1955 (ANEXO A), contendo poucas informações da fachada principal. Por isso, foram realizadas em campo, através de uma trena, medições de distâncias entre pontos sobre a fachada principal para serem utilizadas como referência (ANEXO G) para posterior comparação com o modelo 3D conforme demonstrado na tabela 1.

Tabela 1 - Comparações entre medições de distâncias em campo e no modelo 3D.

NÚMERO DA DISTÂNCIA	PONTOS DE MEDIÇÕES DAS LINHAS RETAS	DISTÂNCIA MEDIDA EM CAMPO	DISTÂNCIA MEDIDA NO MODELO 3D	ERRO	MÉDIA (μ)	DESVIO PADRÃO (σ)
1	P01 – P02	1,310 m	1,327 m	0,017 m	0,003 m	0,018 m
2	P03 – P04	1,305 m	1,315 m	0,010 m		
3	P05 – P06	2,330 m	2,306 m	-0,024 m		
4	P05 – P07	0,908 m	0,885 m	-0,023 m		
5	P08 – P09	19,730 m	19,704 m	-0,026 m		
6	P10 – P11	1,542 m	1,548 m	0,006 m		
7	P12 – P13	2,210 m	2,226 m	0,016 m		
8	P14 – P15	1,542 m	1,555 m	0,013 m		
9	P16 – P17	2,004 m	2,018 m	0,014 m		
10	P17 – P18	1,616 m	1,628 m	0,012 m		
11	P19 – P20	0,580 m	0,588 m	0,008 m		
12	P21 – P22	1,552 m	1,564 m	0,012 m		
13	P23 – P24	1,096 m	1,072 m	-0,024 m		
14	P25 – P26	1,544 m	1,564 m	0,020 m		
15	P27 – P28	2,200 m	2,225 m	0,025 m		
16	P29 – P30	1,308 m	1,295 m	-0,013 m		

Fonte: O AUTOR (2012).

Para os erros obtidos a partir do estudo 1 pode-se obter os seguintes valores:

$$\mu + 1\sigma = 0,003 \text{ m} + (1 \times 0,018 \text{ m}) = 0,021 \text{ m}$$

$$\mu - 1\sigma = 0,003 \text{ m} - (1 \times 0,018 \text{ m}) = -0,015 \text{ m}$$

$$\mu + 2\sigma = 0,003 \text{ m} + (2 \times 0,018 \text{ m}) = 0,039 \text{ m}$$

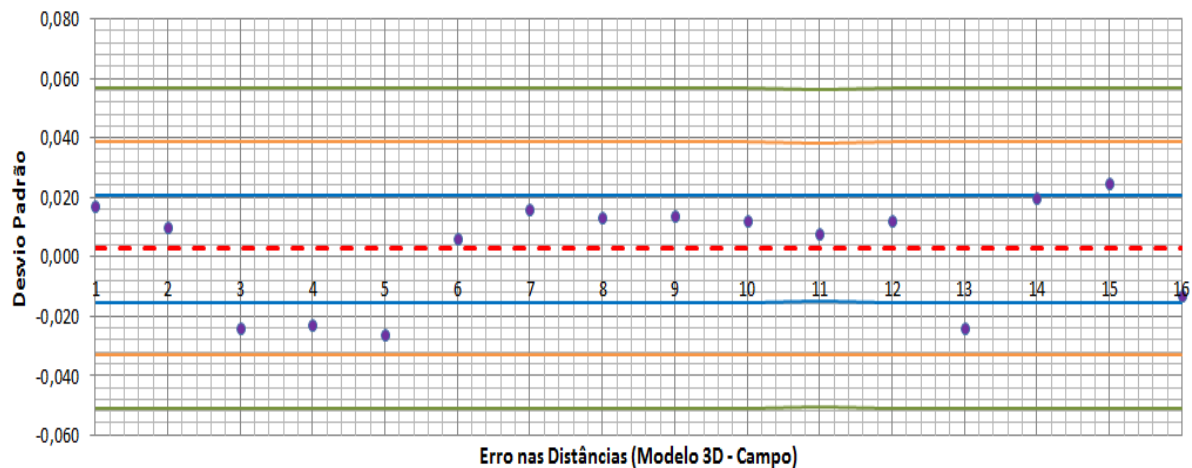
$$\mu - 2\sigma = 0,003 \text{ m} - (2 \times 0,018 \text{ m}) = -0,033 \text{ m}$$

$$\mu + 3\sigma = 0,003 \text{ m} + (3 \times 0,018 \text{ m}) = 0,057 \text{ m}$$

$$\mu - 3\sigma = 0,003 \text{ m} - (3 \times 0,018 \text{ m}) = -0,051 \text{ m}$$

Na figura 80 temos a representação gráfica da variabilidade espacial no estudo 1. Em vermelho tracejado temos a média dos valores de erro; entre as linhas azuis temos os valores de erro encontrados dentro de mais um e menos um desvio padrão (1σ e -1σ); entre as linhas laranjas temos os valores de erro encontrados dentro de mais dois e menos dois desvios padrão (2σ e -2σ); entre as linhas verdes temos os valores de erro encontrados dentro de mais três e menos três desvios padrão (3σ e -3σ).

Figura 80 - Variabilidade Espacial no Estudo 1.

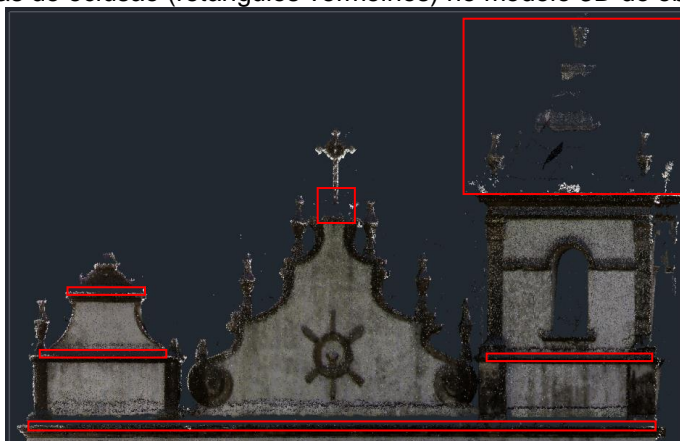


Fonte: O AUTOR (2012).

Conclui-se através da análise de controle acima, que o processo está sob controle estatístico, já que dentre as 16 medições realizadas, 5 medições (P05 – P06; P05 – P07; P08 – P09; P23 – P24 e P27 – P28) tiveram erros afastados 2σ (dois sigmas) da média.

Na figura 81 tem-se, como exemplo, seis zonas de oclusão, ou seja, zonas que são necessárias para serem escanerizadas, mas que não foram adquiridas durante a varredura a *laser*. Outras zonas de oclusão podem ser visualizadas através do ANEXO D.

Figura 81 - Zonas de oclusão (retângulos vermelhos) no modelo 3D do objeto de estudo 1.



Fonte: O AUTOR (2012).

Estas zonas poderiam ser eliminadas com o posicionamento do *laser scanner* em uma plataforma que pudesse ficar próxima da parte superior da igreja, permitindo assim que o mesmo realizasse um adequado recobrimento desta parte, o que não foi possível de ser executado durante esta pesquisa.

4.2 Objeto de Estudo 2

No caso da Igreja dos Santos Cosme e Damião, escolheu-se como referência a elevação arquitetônica da fachada principal de registro nº 2376, na escala 1:50, de 24 de agosto de 2000 (ANEXO B) e comparou-se as distâncias entre pontos, efetuadas sobre a mesma, com as distâncias sobre os mesmos pontos no modelo 3D, conforme demonstrado na tabela 2. O esquema contendo a localização destes pontos está inserido no ANEXO H.

Tabela 2 - Comparações entre medições de distâncias realizadas na elevação analógica e no modelo 3D.

NÚMERO DA DISTÂNCIA	PONTOS DE MEDIÇÕES DAS LINHAS RETAS	DISTÂNCIA MEDIDA NA ELEVAÇÃO ANALÓGICA	DISTÂNCIA MEDIDA NO MODELO 3D	ERRO	MÉDIA (μ)	DESVIO PADRÃO (σ)
1	P01 – P02	0,800 m	0,942 m	0,142 m	0,004 m	0,039 m
2	P03 – P04	3,100 m	3,111 m	0,011 m		
3	P05 – P06	3,080 m	3,070 m	-0,010 m		
4	P06 – P07	8,350 m	8,331 m	-0,019 m		
5	P08 – P09	1,225 m	1,241 m	0,016 m		

6	P10 – P11	8,890 m	8,898 m	0,008 m		
7	P10 – P12	6,490 m	6,473 m	-0,017 m		
8	P13 – P14	1,775 m	1,761 m	-0,014 m		
9	P15 – P16	0,650 m	0,641 m	-0,009 m		
10	P17 – P18	1,350 m	1,366 m	0,016 m		
11	P19 – P20	2,830 m	2,812 m	-0,018 m		
12	P21 – P22	1,850 m	1,836 m	-0,014 m		
13	P23 – P24	2,880 m	2,869 m	-0,011 m		
14	P25 – P26	0,890 m	0,881 m	-0,009 m		
15	P27 – P28	6,500 m	6,486 m	-0,014 m		
16	P29 – P30	6,300 m	6,309 m	0,009 m		

Fonte: O AUTOR (2012).

Para os erros obtidos a partir do estudo 2 pode-se obter os seguintes valores:

$$\mu + 1\sigma = 0,004 \text{ m} + (1 \times 0,039 \text{ m}) = 0,043 \text{ m}$$

$$\mu - 1\sigma = 0,004 \text{ m} - (1 \times 0,039 \text{ m}) = -0,035 \text{ m}$$

$$\mu + 2\sigma = 0,004 \text{ m} + (2 \times 0,039 \text{ m}) = 0,082 \text{ m}$$

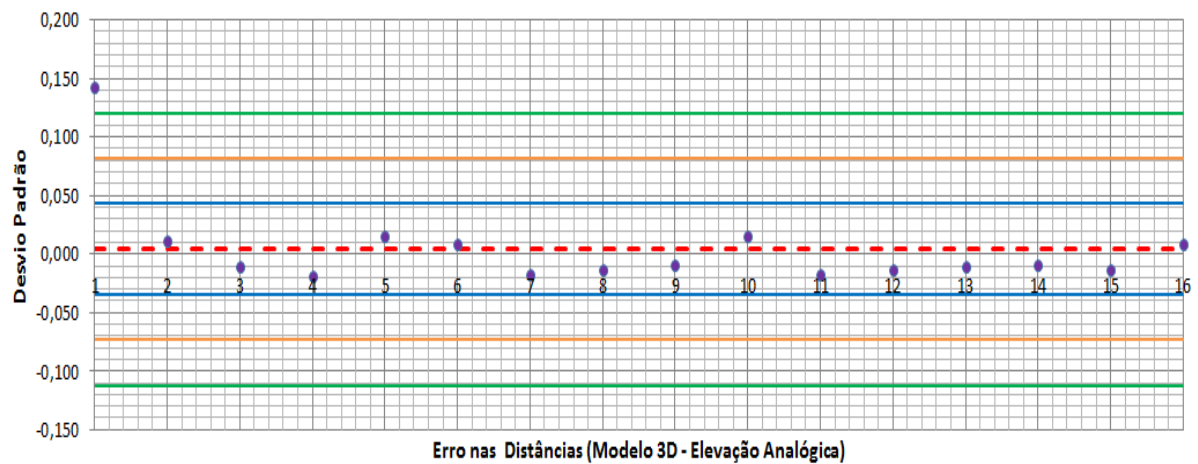
$$\mu - 2\sigma = 0,004 \text{ m} - (2 \times 0,039 \text{ m}) = -0,073 \text{ m}$$

$$\mu + 3\sigma = 0,004 \text{ m} + (3 \times 0,039 \text{ m}) = 0,121 \text{ m}$$

$$\mu - 3\sigma = 0,004 \text{ m} - (3 \times 0,039 \text{ m}) = -0,112 \text{ m}$$

Na figura 82 temos a representação gráfica da variabilidade espacial no estudo 2. Em vermelho tracejado temos a média dos valores de erro; entre as linhas azuis temos os valores de erro encontrados dentro de mais um e menos um desvio padrão (1σ e -1σ); entre as linhas laranjas temos os valores de erro encontrados dentro de mais dois e menos dois desvios padrão (2σ e -2σ); entre as linhas verdes temos os valores de erro encontrados dentro de mais três e menos três desvios padrão (3σ e -3σ).

Figura 82 - Variabilidade Espacial no Estudo 2.



Fonte: O AUTOR (2012).

Assim como no estudo anterior, concluiu-se através da análise de controle acima, que o processo está sob controle estatístico, já que dentre as 16 medições realizadas, apenas uma medição (P01 – P02) teve erro afastado 3σ (três sigmas) da média. Vale ressaltar que este erro considerável (14,2 cm) na distância entre os pontos 01 e 02 sobre um pináculo no alto da torre sineira (próximo à cúpula), ocorreu por que existe uma discrepância na forma do pináculo que consta na elevação arquitetônica analógica comparada com a forma do mesmo no objeto de estudo 2 em campo (forma correta).

Na figura 83 tem-se seis zonas de oclusão. Estas zonas poderiam ser eliminadas conforme já discutido nos resultados do objeto de estudo 1.

Figura 83 - Zonas de oclusão no modelo 3D do objeto de estudo 2.



Fonte: O AUTOR (2012).

4.3 Objeto de Estudo 3

No caso da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda, escolheu-se como referência a elevação arquitetônica da fachada principal de registro nº P06/13, na escala 1:100, de janeiro de 2001 (ANEXO C) e comparou-se as distâncias entre pontos, efetuadas sobre a mesma, com as distâncias sobre os mesmos pontos no modelo 3D, conforme demonstrado na tabela 3. O esquema contendo a localização destes pontos está inserido no ANEXO I.

Tabela 3 - Comparações entre medições de distâncias realizadas na elevação digital e no modelo 3D.

NÚMERO DA DISTÂNCIA	PONTOS DE MEDIÇÕES DAS LINHAS RETAS	DISTÂNCIA MEDIDA NA ELEVACÃO DIGITAL	DISTÂNCIA MEDIDA NO MODELO 3D	ERRO	MÉDIA (μ)	DESVIO PADRÃO (σ)
1	P01 – P02	0,410 m	0,387 m	-0,023 m	0,057 m	0,139 m
2	P03 – P04	2,400 m	2,411 m	0,011 m		
3	P05 – P06	11,324 m	11,351 m	0,027 m		
4	P07 – P08	1,142 m	1,455 m	0,313 m		
5	P09 – P10	0,889 m	0,911 m	0,022 m		
6	P11 – P12	0,833 m	1,298 m	0,465 m		
7	P13 – P14	9,092 m	9,115 m	0,023 m		
8	P15 – P16	1,866 m	1,867 m	0,001 m		
9	P17 – P18	0,662 m	0,660 m	-0,002 m		
10	P19 – P20	1,364 m	1,357 m	-0,007 m		
11	P21 – P22	2,527 m	2,550 m	0,023 m		
12	P23 – P24	1,198 m	1,187 m	-0,011 m		
13	P25 – P26	1,262 m	1,281 m	0,019 m		
14	P27 – P28	2,489 m	2,462 m	-0,027 m		
15	P29 – P30	11,324 m	11,338 m	0,014 m		

Fonte: O AUTOR (2012).

Para os erros obtidos a partir do estudo 2 pode-se obter os seguintes valores:

$$\mu + 1\sigma = 0,057 \text{ m} + (1 \times 0,139 \text{ m}) = 0,196 \text{ m}$$

$$\mu - 1\sigma = 0,057 \text{ m} - (1 \times 0,139 \text{ m}) = -0,083 \text{ m}$$

$$\mu + 2\sigma = 0,057 \text{ m} + (2 \times 0,139 \text{ m}) = 0,335 \text{ m}$$

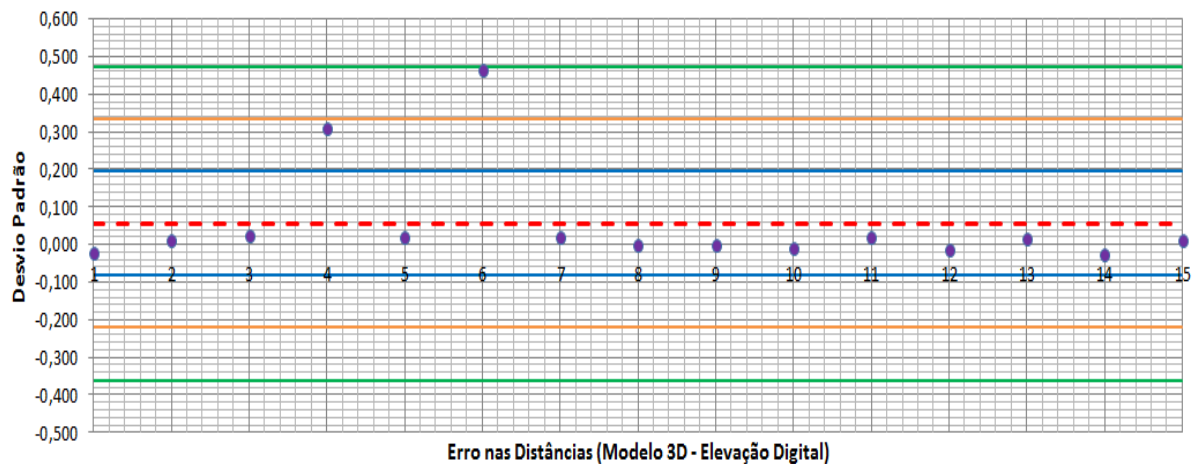
$$\mu - 2\sigma = 0,057 \text{ m} - (2 \times 0,139 \text{ m}) = -0,222 \text{ m}$$

$$\mu + 3\sigma = 0,057 \text{ m} + (3 \times 0,139 \text{ m}) = 0,474 \text{ m}$$

$$\mu - 3\sigma = 0,057 \text{ m} - (3 \times 0,139 \text{ m}) = -0,361 \text{ m}$$

Na figura 84 temos a representação gráfica da variabilidade espacial no estudo 3. Em vermelho tracejado temos a média dos valores de erro; entre as linhas azuis temos os valores de erro encontrados dentro de mais um e menos um desvio padrão (1σ e -1σ); entre as linhas laranjas temos os valores de erro encontrados dentro de mais dois e menos dois desvios padrão (2σ e -2σ); entre as linhas verdes temos os valores de erro encontrados dentro de mais três e menos três desvios padrão (3σ e -3σ).

Figura 84 - Variabilidade Espacial no Estudo 3.

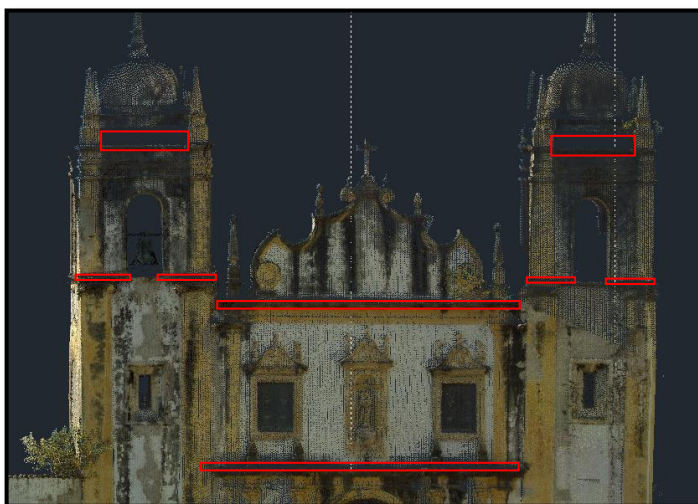


Fonte: O AUTOR (2012).

Contrariamente aos estudos anteriores, concluiu-se através da análise de controle acima, que o processo não está sob controle estatístico, já que ocorreram erros fora de controle nas medidas de distância entre os pontos P07-P08 e entre os pontos P11-P12. Vale ressaltar que estes erros consideráveis nestas duas medições de distâncias entre os pontos 07 e 08 (31,3 cm) e entre os pontos 11 e 12 (46,5 cm) sobre dois pináculos, ocorreram por que existem discrepâncias acentuadas na forma dos pináculos que constam na representação arquitetônica digital comparada com a forma dos mesmos no objeto de estudo 3 em campo (forma correta).

Na figura 85 temos oito zonas de oclusão. Outras zonas de oclusão podem ser visualizadas através do ANEXO F. Estas zonas poderiam ser eliminadas conforme já discutido nos resultados do objeto de estudo 1.

Figura 85 - Zonas de oclusão no modelo 3D do objeto de estudo 3.



Fonte: O AUTOR (2012).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados obtidos pode-se analisar algumas vantagens e desvantagens da técnica de varredura a *laser* para documentação do patrimônio histórico. Como vantagens citam-se os seguintes fatores:

- alta qualidade geométrica dos dados;
- baixo tempo para captura dos dados em campo;
- visualização em tempo real dos dados coletados em campo;
- obtenção de informações tridimensionais e da textura do objeto no momento do levantamento;
- reaproveitamento dos dados para responder a futuras solicitações.

Já com relação às desvantagens, citam-se os seguintes fatores:

- alto custo dos equipamentos e programas computacionais no momento;
- necessidade de estações de trabalho robustas para armazenamento e processamento dos dados.

Mundialmente, vários grupos científicos e instituições ligadas à conservação de monumentos e sítios têm procurado a técnica da varredura a *laser*, pois como visto neste trabalho, a mesma tem possibilitado processos mais eficientes para o

cadastramento de formas arquitetônicas, visto que um dos maiores problemas existentes para a preservação do patrimônio histórico, consiste na falta de registros. A documentação precisa dos monumentos é uma etapa fundamental para sua conservação e restauração, e também uma forma de divulgação para o público em geral. E a varredura a *laser* tem muito a contribuir, não só para a documentação do patrimônio histórico e cultural, como para o levantamento de edificações e ambientes urbanos comuns.

Com a ampla divulgação e utilização da tecnologia de varredura a *laser* será possível em breve a integração de dados adquiridos por sistemas terrestres (estáticos e/ou dinâmicos) e aéreos (embarcados em aviões), possibilitando assim, a reconstrução 3D de edificações e extração dos contornos de telhados e fachadas por algoritmos automáticos de segmentação de forma precisa.

REFERÊNCIAS

BUILL, F.; NÚÑEZ, M. A.; RODRÍGUEZ, J. J. **Fotogrametría arquitectónica**. Barcelona: Edicions UPC, 2007.

CARRAZZONI, M. E. **Guia dos Bens Tombados**. Rio de Janeiro: Expressão e Cultura, 1980.

CENTENO, Jorge Antonio Silva et al. Sensoriamento Remoto por LIDAR (LIDAR Remote Sensing). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Curso...** Florianópolis: 2007.

Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/pdf/curso10/Centeno/centeno.pdf>>. Acesso em: 26.jul.2010.

CERQUEIRA, R. W.; SOUZA, P. P.; ARAÚJO, R. L. Utilização do software PhotoModeler na conservação e restauração de monumentos. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21, 2003, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: 2003.

Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/106-F09.pdf>. Acesso em: 20.nov.2011.

CONFORTI, D.; ZAMPA, F. Lynx Mobile Mapper for Surveying City Centers and Highways. In: 3D-ARCH 2011: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 2011, Trento. **Anais eletrônicos...** Trento, 2011. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W16/pdf/conforti_zampa.pdf>. Acesso em: 01.mai.2012.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3 ed. Curitiba: Editora da UFPR, 2004.

DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW: **Canon EOS 60D Review**. Disponível em: <<http://www.dpreview.com/reviews/canoneos60D>>. Acesso em: 20.jul.2011.

FARO. **Faro Laser Scanner Focus 3D: Features, Benefits & Technical Specifications**. Disponível em: <<http://www.faro.com/site/resources/share/944>>. Acesso em: 05.jul.2012.

GRUSSENMEYER, P.; HANKE, K. Cultural Heritage Applications. In: VOSSELMAN, G.; MAAS, H-G. **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. Scotland, UK: CRC Press, 2010. cap. 8, p. 271-290.

HERITAGE, G. L.; LARGE, A. R. G. **Laser Scanning for the Environmental Sciences**. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 2009.

LEICA GEOSYSTEMS (a). **HDS 8800 Brochure**. Disponível em: <http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/zz/hds/HDS8800/brochures/HDS8800_BRO_en.pdf>. Acesso em: 01.jul.2012.

LEICA GEOSYSTEMS (b). **HDS 7000 Datasheet**. Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/HDS7000/brochures-datasheet/HDS7000_DAT_en.pdf>. Acesso em: 05.jul.2012.

MCGLONE, J. C. **Manual of photogrammetry**. 5th ed. Bethesda, MA, USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.

OPTECH (a). **ILRIS-LR Summary Specification Sheet**. Disponível em: <http://www.optech.ca/pdf/ILRIS_LR_SpecSheet_110304_Web.pdf>. Acesso em: 01.jul.2012.

OPTECH (b). **Lynx Mobile Mapper Brochure**. Disponível em: <http://www.optech.ca/pdf/EN_lynx_brochure_SS_111031_web.pdf>. Acesso em: 01.jul.2012.

OPTECH (c). **Lynx Mobile Mapper: Summary Specification Sheet**. Disponível em: <http://www.optech.ca/pdf/Lynx_SpecSheet_110909_web.pdf>. Acesso em: 01.jul.2012.

PATIAS, P.; GRUSSENMEYER, P.; HANKE, K. Applications in cultural heritage documentation. In: LI, Z.; CHEN, J.; BALTSAVIAS, E. **Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book**. London, UK: CRC Press, 2008. cap. 27, p.363-383.

PATIAS, P.; SANTANA, M. Introduction to Heritage Documentation. In: STYLIANIDIS, E.; PATIAS, P.; QUINTERO, M. S. **CIPA Heritage Documentation: Best Practices and Applications**. Greece: CIPA, 2011. cap. 1, p. 9-13.

Disponível em:

<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/RELATED%20LITERATURE/CIPA_Series_1__2007-9.pdf>. Acesso em: 01.jun.2012.

PIRES JR, C. D. Cadastro Fotogramétrico do Castelo da Torre de Garcia D'Avila. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21, 2003, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...**Belo Horizonte: 2003.

Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/204-F24.pdf>. Acesso em: 20.nov.2011.

REMONDINO, Fabio et al. 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures – The “3D-ARCH” Project. In: 3D-ARCH 2009: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 2009, Trento. **Anais eletrônicos...**Trento, 2009. Disponível em:

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W1/pdf/remondino_et al.pdf>. Acesso em: 08.mar.2011.

RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS. **RIEGL VZ-4000 Preliminary Data Sheet**. Disponível em: <http://products.rieglusa.com/Asset/10_DataSheet_VZ-4000_03-04-2012_PRELIMINARY.pdf>. Acesso em: 01.jul.2012.

TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC (a). **GLS-1500 Catalogue**. Disponível em: <http://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/GLS-1500L_GE.pdf>. Acesso em: 01.jul.2012.

TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC (b). **GLS-1500 Laser Scanning System – Brochure**. Disponível em: <http://www.topconpositioning.com/sites/default/files/GLS_1500_Broch_7010_2076RevC_lg_0.pdf>. Acesso em: 28.fev.2011.

TRIMBLE (a). **Trimble FX Scanner Datasheet**. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-397918/022504-105A_Trimble_FX_DS_0309_lr.pdf>. Acesso em: 05.jul.2012.

TRIMBLE (b). **Trimble CX 3D Laser Scanner Datasheet**. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-494044/Trimble_CX_3D_Scanner.pdf>. Acesso em: 05.jul.2012.

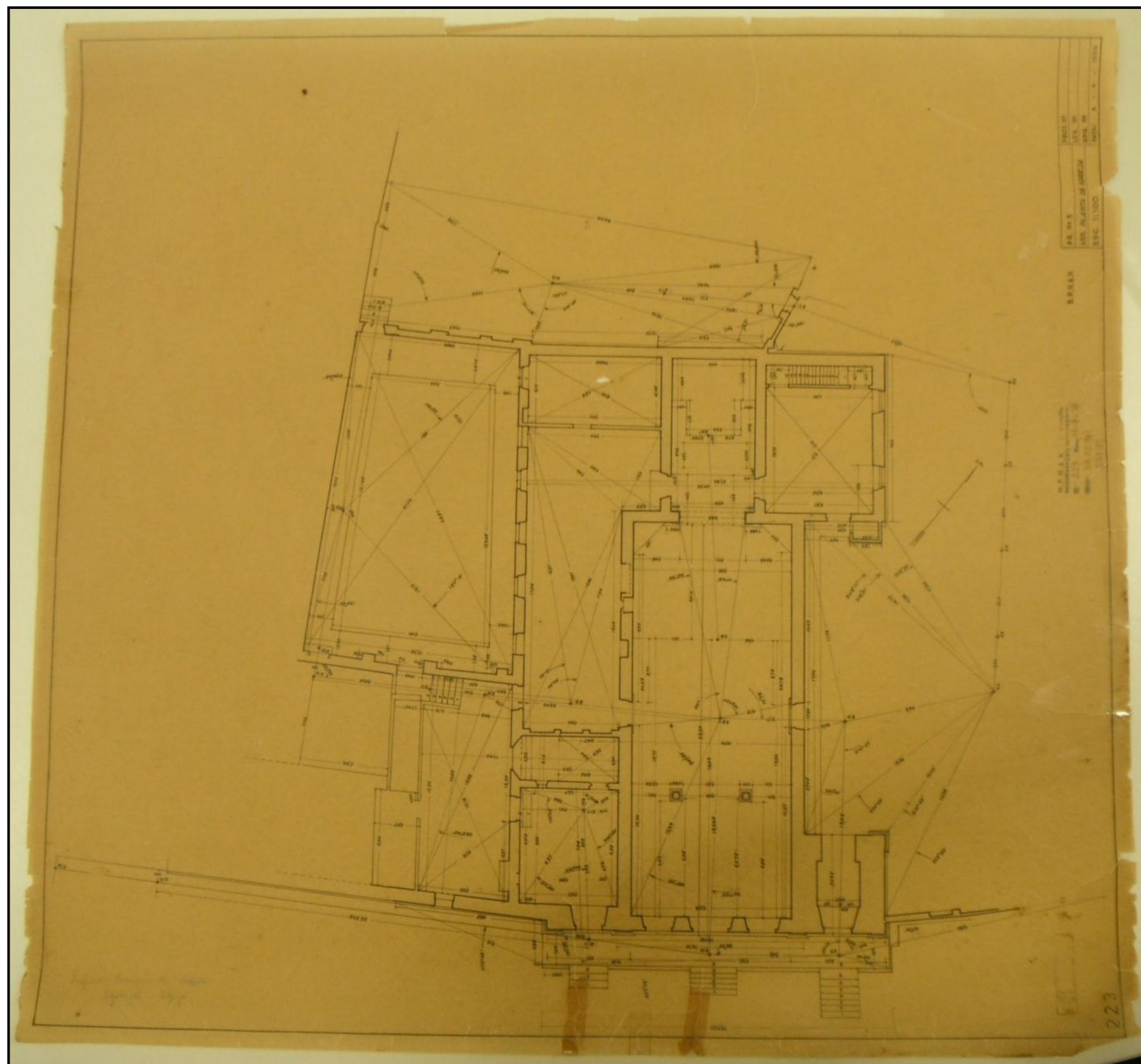
VERNIZZI, C.; GHIRETTI, A. Methodologies Capture Three-Dimensional High-Definition of Sixteenth Wooden Frames. The Case of Works by Correggio. In: 3D-ARCH 2009: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 2009, Trento. **Anais eletrônicos...**Trento, 2009. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/5-W1/pdf/vernizzi_ghiretti.pdf>. Acesso em: 21.ago.2011.

ZOLLER+FRÖHLICH. **Z+F IMAGER 5010 - Brochure**. Disponível em: <http://www.zf-uk.com/downloads/Brochure_5010.pdf>. Acesso em: 05.jul.2012.

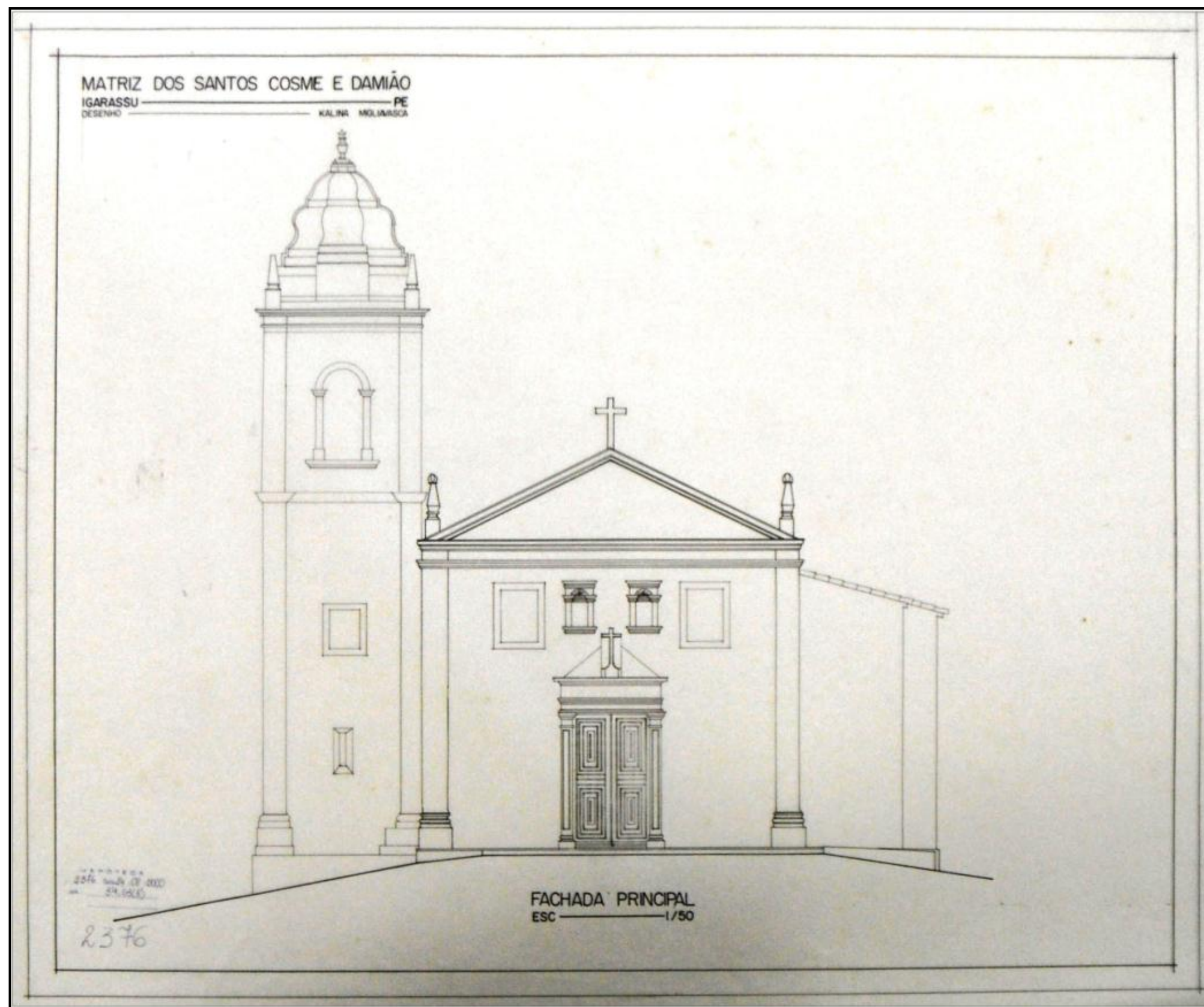
WERNER, T.; MORRIS, D. 3D Laser Scanning for Masonry Arch Bridges. In: FIG International Congress 2010, 24, 2010, Sydney. **Anais eletrônicos...**Sydney: 2010. Disponível em: <http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/ts04d%5Cts04d_werner_morris_4436.pdf>. Acesso em: 09.fev.2011.

WIKIPÉDIA. **Distribuição normal**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_normal>. Acesso em: 10.jul.2012.

ANEXO A – Elevação da Igreja e Recolhimento do Sagrado Coração de Jesus, registro nº 223, em meio analógico, na escala 1:100, de 6 de abril de 1955



ANEXO B – Elevação arquitetônica da fachada principal da Igreja dos Santos Cosme e Damião, registro nº 2376, em meio analógico, na escala 1:50, de 24 de agosto de 2000



ANEXO C – Elevação arquitetônica da fachada frontal e fachada oeste da Igreja do Antigo Convento de Nossa Senhora do Carmo de Olinda, registro nº P 06/13, em meio digital, na escala 1:100, de janeiro de 2001



ANEXO D – Resultado Final do Objeto de Estudo 1

VISTA FRONTAL
ESCALA 1:100

0 5 10
Metros

PERSPECTIVA ISOMÉTRICA
ESCALA 1:100

ANEXO E – Resultado Final do Objeto de Estudo 2

VISTA FRONTAL
ESCALA 1:100

0 5 10
Metros

PERSPECTIVA ISOMÉTRICA
ESCALA 1:100

ANEXO F – Resultado Final do Objeto de Estudo 3

VISTA FRONTAL
ESCALA 1:150



0 5 10
Metros

ANEXO G – Esquema utilizado para definir a localização dos pontos de medições sobre o objeto de estudo 1



ANEXO H - Esquema utilizado para definir a localização dos pontos de medições sobre o objeto de estudo 2



ANEXO I - Esquema utilizado para definir a localização dos pontos de medições sobre o objeto de estudo 3

