



Filipe Dmengeon Pedreiro Balbino

**Caracterização Metrológica de Scanners Ópticos
Tridimensionais por Projeção de Luz Estruturada
Aplicados a Ensaios de Coletes Balísticos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa
Coorientadora: Khriissy Aracélly Reis Medeiros

Rio de Janeiro
fevereiro de 2021



Filipe Dmengeon Pedreiro Balbino

**Caracterização Metrológica de Scanners Ópticos
Tridimensionais por Projeção de Luz Estruturada
Aplicados a Ensaios de Coletes Balísticos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Khrissy Aracélly Reis Medeiros

Coorientadora

Departamento de Engenharia Mecânica (DEM)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Pedro Bastos Costa

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Prof. Carlos Frederico de Matos Chagas

Seção de Ensino de Engenharia Mecânica (SE/4)
Instituto Militar de Engenharia (IME)

Rio de Janeiro, 12 de fevereiro de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Filipe Dmengeon Pedreiro Balbino

Formado pela Academia Militar das Agulhas Negras em 2007 e em Engenharia Mecânica e de Armamento pelo Instituto Militar de Engenharia em 2013. As áreas de atual interesse são Balística, Metrologia, Digitalização 3D e Processamento e Análise de Imagens. Atualmente mestrando do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI) pela PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Balbino, Filipe Dmengeon Pedreiro

Caracterização metrológica de scanners ópticos tridimensionais por projeção de luz estruturada aplicados a ensaios de coletes balísticos / Filipe Dmengeon Pedreiro Balbino; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa; coorientadora: Khrissy Aracélly Reis Medeiros. – 2021.

173 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2021.

Inclui bibliografia

1. Metrologia - Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação - Teses. 3. Metrologia. 4. Scanner 3D. 5. Nuvem de pontos. 6. Ensaio balísticos. 7. Medição de profundidade. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Medeiros, Khrissy Aracélly Reis. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

À minha Família, meu porto seguro.

Agradecimentos

A Deus que permitiu que eu chegasse até aqui e que a cada manhã renova em mim o dom da vida. Que o ar que inspiro seja sempre uma lembrança de que sou apenas pó e que minha gratidão ao Senhor seja uma marca em minha vida!

À minha esposa Maria Fernanda que, com seu apoio, doçura e compreensão, me ajudou a transpor as dificuldades diárias na realização deste curso de mestrado. Obrigado por sonhar comigo os meus sonhos!

Aos meus pais Terezinha e Américo que, com carinho, possibilitaram meu crescimento e amadurecimento me ensinando que “tudo passa”. O apoio de vocês foi e continuará sendo importante alicerce para minhas conquistas e o incentivo ao estudo ficará sempre em minha memória assim como os cartões com as letras da minha alfabetização e os estudos para o concurso do Colégio Militar.

Aos meus irmãos Camila, Maria Rosa e Adriano, cujas amizades alegram e enriquecem minha vida.

Ao meu orientador Carlos Roberto Hall Barbosa por todo o apoio prestado desde o início do curso de mestrado e principalmente por acreditar em meu trabalho.

À minha coorientadora Khrissy Aracélly Reis Medeiros pela paciência e por me auxiliar a transpor obstáculos tão vultuosos ao longo desses dois anos.

Ao Prof. Élcio Cruz de Oliveira pela inestimável contribuição com sugestões que enriqueceram o conteúdo este trabalho.

Ao Exército Brasileiro por esta oportunidade ímpar de realizar este curso de mestrado e possibilitar meu aprimoramento técnico-profissional.

Ao Centro de Avaliações do Exército e ao Arsenal de Guerra do Rio, que forneceram meios para realização dos experimentos e aquisições de dados desta pesquisa.

Ao Giancarlo Gomez Gonzáles que gentilmente contribuiu com a aquisição de parte dos dados utilizados.

Aos membros da comissão examinadora por suas contribuições a este trabalho.

Aos professores, alunos e funcionários do PósMQI por todo o aprendizado e convivência.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Resumo

Balbino, Filipe Dmengen Pedreiro; Barbosa, Carlos Roberto Hall; Medeiros, Khrissy A. R. **Caracterização Metrológica de Scanners Ópticos Tridimensionais por Projeção de Luz estruturada Aplicados a Ensaio de Coletes Balísticos. Rio de Janeiro, 2021. 173p.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação tem por objetivo realizar a caracterização metrológica de scanners ópticos tridimensionais por projeção de luz estruturada com vistas à aplicação em ensaios de coletes balísticos. Técnicas de digitalização tridimensional vêm ganhando popularidade nas últimas décadas, entretanto o recente emprego de equipamentos de digitalização 3D em ensaios de coletes balísticos constitui uma nova aplicação para estes equipamentos, em especial na caracterização dos traumas originados pelos impactos de projéteis, o que motivou a realização do estudo. A metodologia empregada fundamentou-se nas pesquisas bibliográfica, documental, experimental e de laboratório que tiveram por objetivo coletar dados utilizando *scanner* por projeção de luz estruturada no contexto de ensaios de coletes balísticos e compará-los com valores de referência. Foram sugeridos processos de alinhamento, segmentação, filtragem e estabelecimento de planos de referência que se mostraram adequados ao tratamento das nuvens de pontos obtidas nos ensaios de coletes balísticos. Os resultados confirmaram os erros sistemáticos relatados na literatura para equipamentos de digitalização por luz estruturada e possibilitaram uma estimativa da incerteza de medição para o equipamento em questão. Concluiu-se que os valores críticos de medição de traumas são corretamente medidos pelo instrumento de digitalização 3D e por meio da utilização do método sugerido para tratamento de nuvens de pontos neste contexto.

Palavras-chave

Metrologia; Scanner 3D; Nuvem de Pontos; Ensaio Balísticos; Medição de Profundidade; Artefatos de Calibração

Abstract

Balbino, Filipe Dmengen Pedreiro; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor); Medeiros, Khrissy A. R. (Co-advisor). **Metrological Characterization of Three-dimensional Optical Scanners by Structured Light Projection Applied to Ballistic Vests Tests**. Rio de Janeiro, 2021. 173 p. – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation aims at performing the metrological characterization of three-dimensional optical scanners by structured light projection for application in ballistic vest tests. Three-dimensional scanning techniques have been gaining popularity in recent decades, however the recent use of 3D scanning equipment in ballistic vests testing is a new application for these devices, especially in the characterization of traumas caused by projectile impacts, which motivated the realization of the study. The methodology used was based on bibliographic, documentary, experimental and laboratory research aimed at collecting data using a structured light projection scanner in the context of ballistic vests tests and comparing them with reference values. Procedures for alignment, segmentation, filtering and establishment of reference planes were suggested, which proved to be adequate for the treatment of point clouds obtained from ballistic vest tests. The results confirmed the systematic errors reported in the literature for structured light scanning equipment and made it possible to estimate the measurement uncertainty for the equipment in question. It was concluded that the critical trauma measurement values are correctly measured by the 3D scanning instrument and by using the suggested method for treating point clouds in this context.

Keywords

Metrology; 3D scanner; Point Cloud; Ballistic Tests; Depth Measurement, Calibration Artifacts.

Sumário

1	Introdução	20
1.1.	Definição do problema de pesquisa	25
1.2.	Motivação	27
1.3.	Objetivos: geral e específicos	28
1.4.	Estrutura da dissertação	29
2	Ensaio de coletes balísticos	30
2.1.	Fundamentos Teóricos	30
2.2.	Normas aplicáveis a ensaios de coletes balísticos	35
2.2.1.	Procedimento experimental de ensaio de coletes balísticos baseado na norma NIJ 01.01.04	38
2.2.2.	Outras normas sobre ensaios de coletes balísticos em uso atualmente	41
2.3.	Particularidades da medição de traumas em ensaios de coletes balísticos	42
2.3.1.	Medição convencional e limitações	42
2.3.2.	Abordagem Estatística da NIJ 01.01.06	46
3	Técnicas de digitalização tridimensional	49
3.1.	Classificação Geral	50
3.2.	Métodos Passivos	51
3.2.1	Triangulação Estéreo (Par de Imagens)	52
3.3.	Métodos Ativos	53
3.3.1.	Triangulação Estéreo Ativa (Par de Imagens)	54
3.3.2.	Tempo de voo	54
3.3.3.	Luz Estruturada	55
3.3.3.1.	Formulação matemática para scanners de luz estruturada	57
3.3.4.	Braço de medição por Coordenadas (AACMM)	61

3.3.5. Máquina Tridimensional de Coordenadas	63
3.4. Incertezas de medição e principais limitações dos scanners ópticos tridimensionais	65
4 Nuvens de Pontos	68
4.1. Definições e Conceitos	69
4.1.1. Segmentação e Classificação	70
4.1.2. Alinhamento ou registro de faixa	76
4.1.3. Estimativa de normais em nuvens de pontos	79
4.1.4. Reconstrução	80
4.2. Ruídos e Outliers	83
5 Avaliação de Desempenho de Scanners 3D	87
5.1. Equipamentos utilizados para digitalizações 3D	87
5.2. Digitalização de Semiesferas usinadas em aço	89
5.2.1. Processo de confecção e limitações	92
5.2.2. Digitalização utilizando <i>Scanner óptico 3D Faro^{3D} Objects</i>	94
5.2.3. Digitalização utilizando o braço de medição <i>FARO Quantum^M FaroArm</i> (Ponta de apalpação)	97
5.3. Digitalização de endentações usinadas em madeira	99
5.3.1. Usinagem de relevo representativo em placa de madeira	100
5.3.2. Digitalização utilizando a técnica de reconstrução 3D	102
5.3.3. Digitalização utilizando o <i>Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	105
5.3.4. Digitalização utilizando o scanner óptico presente no braço de medição <i>FARO Quantum^M FaroArm</i>	106
5.3.5. Tratamento das nuvens de pontos utilizando o <i>Software CloudCompare</i>	107
6 Análise comparativa de desempenho do <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	110
6.1. Análise de resultados obtidos pela digitalização de calotas esféricas de aço	110
6.1.1. Obtenção de resultados de D1 e D2 para o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	110

6.1.2. Obtenção de resultados de D1 e D2 para o <i>Scanner FARO Quantum^M FaroArm</i>	111
6.1.3. Remoção de outliers e filtragem de ruídos dos dados obtidos pelo <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	112
6.1.4. Tratamento estatístico dos dados	113
6.2. Análise comparativa de desempenho entre scanner tridimensional de luz estruturada e reconstrução tridimensional	119
7 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	122
Referências bibliográficas	127
Anexo A – Rótulo da plastilina Roma nº 01 – Utilizada em ensaios de coletes balísticos	142
Anexo B – Artigo Publicado - CBM 2019	143
Anexo C – Desenho Técnico - Usinagem das Calotas Esféricas	151
Anexo D – Artigo Publicado - Sensors 2020	152
Apêndice A – Testes Estatísticos Aplicados	169

Lista de Siglas e Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
3MF	3D Manufacturing Format
AACMM	Articulate Arm Coordinate Measuring Machine
ACP	Automatic Colt Pistol
AGR	Arsenal de Guerra do Rio
AP	Armor Piercing
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BABT	Behind Armor Blunt Trauma
BPA	Ball Pivoting Algorithm
CAEx	Centro de Avaliações do Exército
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIC	Digital Image Correlation
FPH	Feature Point Histogram
GOST	Gosudarstvennyy Standart
HOSDB	Home Office Scientific Development Branch
ICP	Iterative Closest Point
IMU	Inertial Measurement Unit
ISO	International Organization for Standardization
LR	Long Rifle
Mag	Magnum
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NIJ	National Institute of Justice
OBJ	Object file
PCL	Point Cloud Library
PósMQI	Programa de Pós-graduação em Metrologia

PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RANSAC	Random Sample Consensus
RMS	Root Mean Square
S&W	Smith & Wesson
SOR	Statistical Outlier Removal
STL	Stereolithography
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPAM	Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen

Lista de figuras

Figura 1 – Aparato experimental para ensaio de coletes balísticos composto de: (a) Sistema de disparo; (b) Barreira Balística e; (c) Material Suporte	21
Figura 2 – Deformações observadas no material suporte (plastilina) após a realização de disparos contra colete balístico e sua retirada para avaliação dos traumas	22
Figura 3 – Registro em raios-x de impacto de projétil 7,62 mm em blindagem balística e conseqüente deformação em tórax animal ocasionada pela onda de choque	23
Figura 4 – Superfície gerada pela digitalização da endentação do impacto balístico no material suporte	23
Figura 5 – Medição de profundidade utilizando paquímetro convencional	24
Figura 6 – Exemplo de <i>Scanner</i> 3D: Modelo <i>FARO FreeStyle^{3D} Objects</i>	24
Figura 7 – Sistema de disparo: (a) Provetes de diversos calibres para uso em laboratório balístico e; (b) Sistema de disparo de projéteis composto de provete, receptor e estativa	31
Figura 8 – Barreira balística empregada para ensaios em colete balístico composta de: (a) Feixes de infravermelho e; (b) Contadores de tempo com sistema de processamento e transmissão de dados	32
Figura 9 – (a) Radar balístico Doppler e; (b) Resultados da medição realizada com radar para munição 7,62 mm, onde é possível observar o espectro eletromagnético e a velocidade desenvolvida desde a saída da boca do provete até o impacto em 15 m	32
Figura 10 – (a) Blindagem metálica sob impacto de projétil .50 de 42 g a uma velocidade de aproximadamente 850 m/s e os instantes após o impacto; (b) $t = 3,53 \times 10^{-5}$ s e; (c) $t = 7,06 \times 10^{-5}$ s. Imagens capturadas com auxílio de câmera de alta velocidade	33
Figura 11 – Composição do colete balístico: (a) Partes que compõem um colete balístico e (b) Penetração parcial de projétil em algumas camadas de tecido de Kevlar	34
Figura 12 – (a) Modelo de torso humano confeccionado em gelatina balística e; (b) Tabela contendo algumas propriedades mecânicas do torso humano que são reproduzidas em gelatina balística	35
Figura 13 – Energia cinética dos projéteis de acordo com NIJ 01.01.04	36
Figura 14 – Impacto de projétil sobre tecido balístico onde é possível visualizar o valor de 44 mm como sendo o valor absoluto máximo admissível para profundidades de endentação	37
Figura 15 – Teste de consistência da plastilina: (a) Teste de queda e; (b) Medição de profundidade de endentação após o teste	39

Figura 16 – Setup de ensaio de coletes balísticos: (a) Posicionamento do sistema de disparo, barreira balística e colete balístico e; (b) Posicionamento do colete balístico sobre a caixa de plastilina (material suporte)	39
Figura 17 – Processo de medição de profundidade de trauma: (a) Plastilina sendo nivelada com auxílio de “faca” confeccionada para esta finalidade, (b) Plastilina após raspagem com endentação evidenciada e; (c) Medição de profundidade com auxílio do paquímetro	40
Figura 18 – Desenho esquemático encontrado na NIJ 01.01.06 referente aos traumas ocasionados pelo disparo de projéteis sobre o material balístico: (a) Caixa de plastilina antes do impacto e; (b) Medição de profundidade após o impacto	43
Figura 19 – Deformações na plastilina após disparos contra painel balístico curvo: (a) Deformação causada pelo primeiro disparo contra painel balístico curvo e; (b) Deformações causadas pelos 6 disparos contra o painel balístico curvo	44
Figura 20 – (a) Dispositivo conhecido como “ <i>Bridge Gauge</i> ”, no qual existe a adaptação de um paquímetro de profundidade e; (b) Uso do instrumento para medição da profundidade de trauma	44
Figura 21 – Dispositivo para medição de trauma utilizado atualmente pelo CAEx	45
Figura 22 – Classificação geral de métodos de digitalização, com técnicas relevantes para este trabalho em destaque.	51
Figura 23 – Triangulação estéreo	52
Figura 24 – Triangulação estéreo. (a) Correspondência entre mesmos pontos e; (b) Correspondência otimizada.	53
Figura 25 – Triangulação estéreo ativa	54
Figura 26 – <i>Scanner</i> 3D de tempo de voo: (a) Princípio de funcionamento; (b) <i>Scanner</i> Leika BLK 360; (c) <i>Scanner</i> Faro Focus e; (d) Cálculo da distância com base no tempo entre emissão e recepção de pulsos luminosos	55
Figura 27 – <i>Scanner</i> de luz estruturada: (a) Câmera fixa e variação de padrões luminosos sobre objeto e; (b) Rotação da câmera ao redor do objeto com mesmo padrão luminoso	56
Figura 28 – <i>Scanner</i> 3D FARO Freestyle ^{3D} Objects (a) Vista do equipamento; (b) Posicionamento de sensores, câmera e projetor e; (c) Projeção de padrão infravermelho pelo <i>Scanner</i> 3D FARO Freestyle ^{3D} Objects, visto com auxílio de câmera de visão noturna	57
Figura 29 – Aquisição de informações tridimensionais para sistemas de luz estruturada	58
Figura 30 – Calibração do <i>Scanner</i> 3D FARO Freestyle ^{3D} Objects: (a) Placa de calibração e; (b) Processo de digitalização em andamento	61
Figura 31 – Braço de medição FARO Quantum ^M FaroArm: (a) Vista do equipamento. e; (b) Sistemas de coordenadas atribuídas a cada grau de liberdade do braço de medição	62
Figura 32 – Digitalização de objeto utilizando Braço de medição por contato: (a) Apalpação manual de objeto de interesse; (b) Pontos medidos sendo mostrados em tempo real por meio do <i>software</i>	

Poliworks™ e; (c) Resultado da digitalização apresentado em nuvem de pontos sob duas perspectivas	62
Figura 33 – Exemplo de Máquina tridimensional de Coordenadas	63
Figura 34 – Modelo Probabilístico para erros da digitalização, indicando duas diferentes digitalizações, seus erros e direção de aquisição de dados	65
Figura 35 – Diversas causas para incerteza nos sistemas ópticos tridimensionais.	66
Figura 36 – (a) Modelo digital do coração humano (formato de arquivo .STL); (b) Nuvens de pontos com 1000000 pontos; (c) 500000 pontos e (d) 100000 pontos	68
Figura 37 – Segmentação de nuvem de pontos realizada em tempo real para aplicações de veículos autônomos	71
Figura 38 – Taxonomia dos métodos de segmentação de nuvens de pontos	72
Figura 39 – Ajuste ótimo de reta utilizando o RANSAC: (a) 1ª Iteração; (b) 2ª Iteração e; (c) N-ésima Iteração	74
Figura 40 – Erros de alinhamento ou registro	77
Figura 41 – <i>Iterative Closest Point</i> : (a) Exemplo de aplicação bidimensional do algoritmo ICP; (b) Algoritmo aplicado a duas nuvens de pontos do famoso modelo conhecido como <i>The "Stanford Bunny"</i> e; (c) Alinhamento das duas nuvens realizado com sucesso.(d), (e) e (f) correspondem à limitação de alinhamento do algoritmo	78
Figura 42 – Estimativa de normais para nuvem de pontos com auxílio do <i>software MeshLab</i> : (a) Nuvem de pontos referente à digitalização de superfície aerodinâmica e; (b) Apresentação das normais estimadas para o conjunto de dados	80
Figura 43 – Classificação dos algoritmos de reconstrução de superfície	81
Figura 44 – Aplicação do algoritmo <i>Ball-Pivoting</i> à nuvem de pontos e criação de malha com auxílio do <i>software MeshLab</i>	81
Figura 45 – Aplicação da técnica de reconstrução de superfície de Poisson e criação de malha com auxílio do <i>software MeshLab</i>	83
Figura 46 – Hierarquização e comparação de classificação para métodos de filtragem de ruídos em nuvens de pontos	84
Figura 47 – Representação das distâncias em relação a determinado ponto para aplicação do algoritmo de remoção de <i>outliers</i> SOR implementado no <i>software CloudCompare</i>	85
Figura 48 – Algoritmo de remoção de ruídos <i>Noise Filter</i> implementado no <i>software CloudCompare</i>	86
Figura 49 – Equipamentos utilizados para aquisição dos dados: (a) <i>Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects</i> ; (b) braço de medição <i>FARO Quantum^M FaroArm</i> e; (c) Equipamento <i>VIC Gauge 3D Camera system</i>	88
Figura 50 – Semelhança geométrica entre deformações e artefatos confeccionados: (a) Nuvem de pontos de deformação real em plastilina com indicação da distância máxima a ser medida e; (b) Calota esférica com indicação da mesma distância da deformação real	90

Figura 51 – Fluxograma explicativo do procedimento experimental realizado para comparações entre diversas digitalizações de objetos de referência	91
Figura 52 – Calotas esféricas usinadas em aço (4340) (a) Calota “A”; (b) Calota “B”; (c) Calota “C” e; (d) calota “D”	91
Figura 53 – (a) Máquina tridimensional de coordenadas e; (b) Detalhe da realização de medição na calota esférica “C”	92
Figura 54 – (a) Nuvem de pontos obtida através da digitalização da calota esférica “B” utilizando uma máquina tridimensional de coordenadas e; (b) Superposição do modelo computacional do artefato “B” para visualização dos pontos medidos. Figuras apresentadas com o auxílio do <i>software CloudCompare</i>	93
Figura 55 – Calotas esféricas após receber o tratamento superficial de fosfatização (Oxidação Negra). (a) Calota “A”; (b) Calota “B”; (c) Calota “C” e; (d) calota “D”	94
Figura 56 – Nuvem de pontos obtida por meio da digitalização da calota esférica “D” e apresentada com o auxílio do <i>software CloudCompare</i>	95
Figura 57 – (a) Nuvem de pontos “B” antes da aplicação do algoritmo RANSAC e; (b) Nuvem de pontos “B” após a aplicação do algoritmo, com a identificação de dois planos e uma calota esférica	96
Figura 58 – Distâncias D1 e D2 que foram medidas em cada nuvem de pontos após processos de segmentação. Figuras elaboradas com auxílio do <i>software CloudCompare</i>	97
Figura 59 – Resultados da digitalização realizada com o <i>FARO Quantum^M FaroArm</i> (ponta de apalpação) e apresentados com o auxílio do <i>software CloudCompare</i> : (a) Nuvem de pontos obtida através da digitalização das 4 calotas esféricas em um mesmo arquivo e; (b) Segmentação realizada para a calota esférica “D”	98
Figura 60 – Calota esférica “A” dividida nas três regiões de interesse	99
Figura 61 – Metodologia empregada para comparação entre técnicas de digitalização	100
Figura 62 – (a) Digitalização da plastilina e; (b) Tratamento, limpeza e reconstrução de superfície para região de interesse pelo método de Poisson	101
Figura 63 – Fresagem: (a) Fresa e; (b) Modelo físico confeccionado em madeira	102
Figura 64 – Marcação de pontos aleatórios para captura: (a) e (b) Pigmentação manual amostra e; (c) Amostra fixa na posição de captura das imagens	103
Figura 65 – Captura: (a) Calibração e; (b) Aquisição de imagens do modelo físico em madeira	104
Figura 66 – (a) Processo de captura e correspondência; (b) Correspondência realizada com atribuição de coordenadas tridimensionais; e (c) Nuvem de pontos gerada do modelo físico em madeira	104
Figura 67 – Digitalização da placa usinada em madeira após pigmentação, utilizando o <i>Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	105

Figura 68 – (a) <i>FARO Quantum^M FaroArm</i> e; (b) Nuvem de pontos gerada pelo processo de digitalização e apresentada com o auxílio do <i>Software CloudCompare</i>	107
Figura 69 – (a) Extração de região de interesse com os traumas e; (b) Regiões de interesse das nuvens A, B, C e D	108
Figura 70 – Ajuste de planos e identificação das regiões de interesse nas nuvens B, C e D	109
Figura 71 – Fluxograma descritivo do tratamento estatístico realizado nos conjuntos de dados	113
Figura 72 – Tendência e incerteza em milímetros representadas para os conjuntos 1 e 2 em relação aos valores de referência	117
Figura 73 – Tendência e incerteza como representação percentual dos valores de referência	118
Figura 74 – Representação gráfica das medidas realizadas considerando cada nuvem de pontos e as deformações de cada trauma	120

Lista de tabelas

Tabela 1- Níveis de proteção estabelecidos pela norma NIJ 01.01.04	36
Tabela 2 – Limite superior de tolerância calculado para diversos cenários, considerando 12 medições de profundidade, variação nos valores de média amostral e também nos valores de desvio padrão amostral	47
Tabela 3 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do primeiro conjunto de medições realizadas com o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	111
Tabela 4 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do segundo conjunto de medições realizadas com o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	111
Tabela 5 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do conjunto de medições realizadas com o braço de medição por coordenadas <i>FARO Quantum^M FaroArm</i>	112
Tabela 6 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do primeiro conjunto de medições realizadas com o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i> , após processo de filtragem	112
Tabela 7 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do segundo conjunto de medições realizadas com o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i> , após processo de filtragem	113
Tabela 8 – Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para conjuntos de medição D1 e D2	113
Tabela 9 – Comparação entre duas medições utilizando o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i>	114
Tabela 10 – Resultados da comparação entre duas medições utilizando o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i> e o braço de medição por coordenadas	115
Tabela 11 – Resultados da comparação entre duas medições utilizando o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i> e o braço de medição por coordenadas (AACMM) após processo de filtragem	116
Tabela 12 – Resultados para incerteza e tendência utilizando o <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i> antes e depois do processo de filtragem	116
Tabela 13 – Estimativas de profundidades para <i>Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects</i> , Reconstrução 3D e <i>FARO Quantum^M FaroArm</i> com ponta de apalpação	119
Tabela 14 – Diferenças em mm das nuvens B e D em relação à nuvem D	120

Lista de Quadros

Quadro 1 – Normas para ensaio de coletes balísticos mais utilizadas atualmente	41
--	----

“Não há lugar para a sabedoria onde não há paciência”

Santo Agostinho

1 Introdução

O Exército Brasileiro possui a responsabilidade de estabelecer requisitos de segurança e desempenho de diversos materiais de proteção balística [1], dentre os quais se podem citar blindagens opacas e transparentes, capacetes e coletes balísticos.

O laboratório balístico do Centro de Avaliações do Exército (CAEx) desempenha as atividades supracitadas e, até o decreto nº 10.030 de 30 de setembro de 2019 [1], era o único habilitado a executá-las no Brasil, principalmente por possuir capacidade técnica e infraestrutura para tal.

A comprovação da conformidade dos materiais de proteção perante o Comando do Exército, tomando por referência as normas aplicáveis a cada material, habilita empresas fabricantes a comercializarem seus materiais de proteção no mercado nacional. Desta maneira, a empresa não só cumpre a legislação vigente como também assegura ao mercado consumidor que seu produto apresenta características de qualidade e segurança, indispensáveis ao usuário final.

Cada um desses materiais de proteção é avaliado de acordo com normas específicas, que asseguram a uniformidade e repetibilidade dos ensaios e requisitos verificados.

No caso específico dos coletes balísticos, utiliza-se a norma americana *National Institute of Justice* (NIJ) 01.01.04 [2], que estabelece os requisitos a serem cumpridos por determinado colete balístico. Por se tratar de ensaio destrutivo, são de fato realizados diversos disparos contra os painéis frontal e dorsal de cada colete balístico, conforme especificações desta norma.

Na Figura 1 é possível observar o aparato experimental para a realização de ensaios em coletes balísticos [3], composto de:

- a) Sistema de disparo composto de estativa, receptor de provetes e provete.

Este último se constitui em um cano raiado que tem por objetivo realizar o disparo

de determinado calibre e tipo de munição, podendo ser trocado conforme a necessidade do ensaio;

b) Barreira balística composta por dois sistemas de cronógrafos (dois *starts* e dois *stops*) para realizar a medição da velocidade do projétil; e

c) Caixa de aço que contém o material suporte (plastilina) com colete balístico, posicionada a 5 m ou 15 m da boca do provete, de acordo com o nível balístico que se deseja ensaiar.

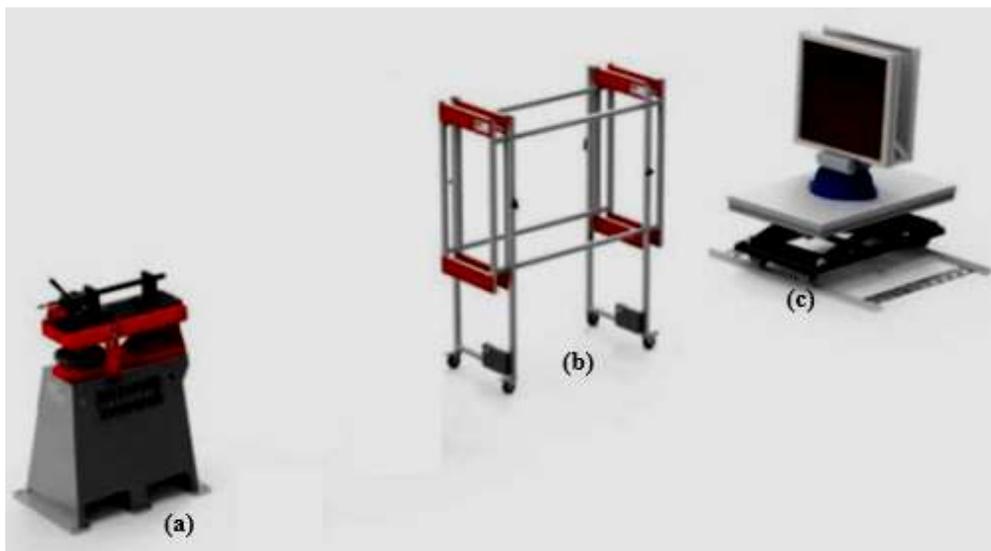


Figura 1 – Aparato experimental para ensaio de coletes balísticos composto de: (a) Sistema de disparo; (b) Barreira Balística e; (c) Material Suporte. Fonte: Adaptado de [3]

O aparato experimental e as normas relacionadas são amplamente difundidos entre os laboratórios que executam ensaios dessa natureza. A caracterização destes procedimentos foi iniciada na década de 1970 e segue até os dias atuais com a execução de muitos estudos, relacionados principalmente à caracterização do trauma e sobrevida do usuário de proteção balística.

Nas deformações decorrentes do ensaio balístico (Figura 2), a profundidade de trauma é relevante para fins de avaliação da capacidade do material do colete balístico em resistir e atenuar os referidos impactos.

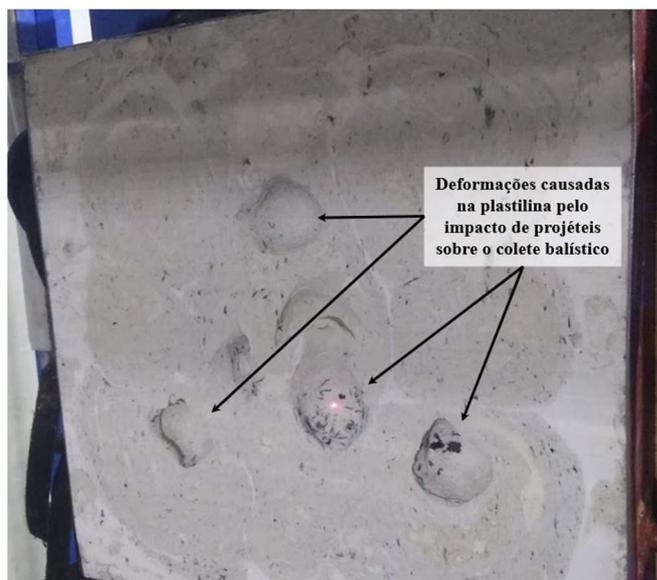


Figura 2 – Deformações observadas no material suporte (plastilina) após a realização de disparos contra colete balístico e sua retirada para avaliação dos traumas

Uma imagem de raios-X é apresentada na Figura 3, sendo possível observar a deformação a que foi submetido um tórax animal fazendo uso de proteção balística. Nessa situação o projétil de calibre 7,62 mm realizou o impacto a aproximadamente 750 m/s e a onda de choque gerada foi responsável pela deformação do tórax do animal e estruturas adjacentes [4].

Em decorrência de estudos realizados [5] e objetivando-se mensurar as deformações observadas após o impacto de projéteis sobre o tecido balístico, a norma NIJ 01.01.04 [2] especifica e padroniza o uso de massa de modelar, também conhecida como plastilina¹, como material de suporte para o colete balístico durante os disparos de projéteis. Essa massa deforma-se plasticamente sob a ação do impacto do projétil no colete balístico, permitindo a medição da profundidade máxima de trauma e possibilitando a utilização desta informação na avaliação da conformidade do material. As deformações observadas em plastilina costumam ser muito semelhantes aos traumas observados em situações reais.

¹ Plastilina constitui um tipo especial de massa de modelar (argila de modelagem à base de óleo e cera) utilizada no meio do artesanato para esculturas. A plastilina ROMA nº01 vem sendo utilizada em ensaios de coletes balísticos pela elevada qualidade do material no que diz respeito a sua fabricação e consequente repetibilidade de propriedades mecânicas para diversos lotes de fabricação. O rótulo da plastilina ROMA nº01 está localizada no Anexo A.

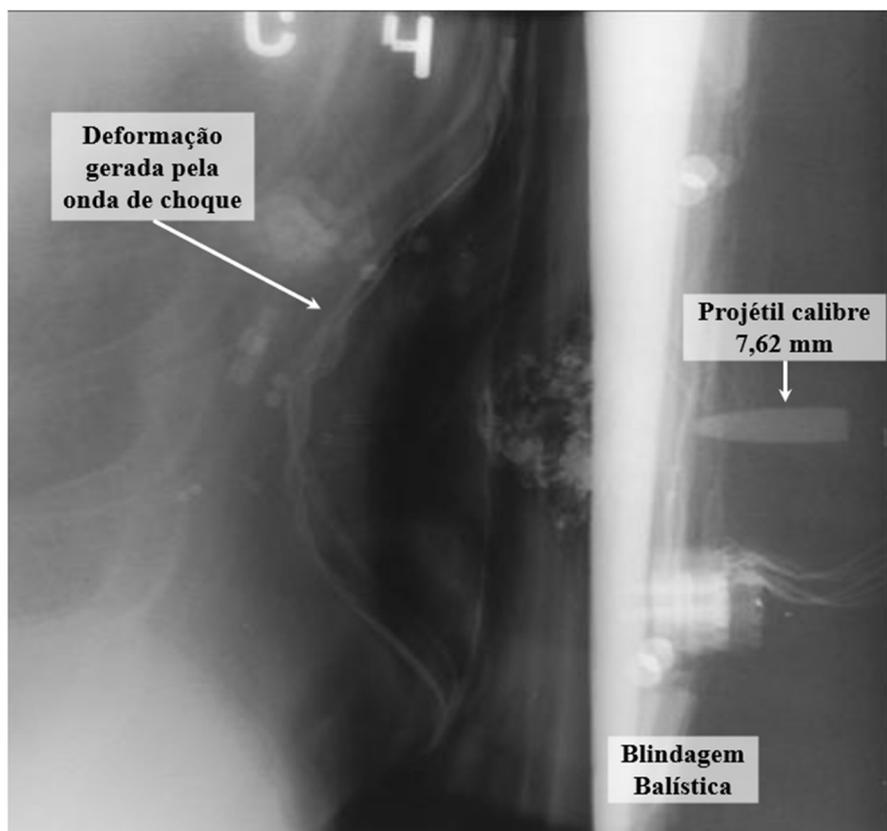


Figura 3 – Registro em raios-x de impacto de projétil 7,62 mm em blindagem balística e consequente deformação em tórax animal ocasionada pela onda de choque. Fonte: Adaptado de [4]

Muitas vezes, a endentação gerada na plastilina constitui uma superfície de geometria complexa (Figura 4) e, portanto, a profundidade de trauma é difícil de ser medida.

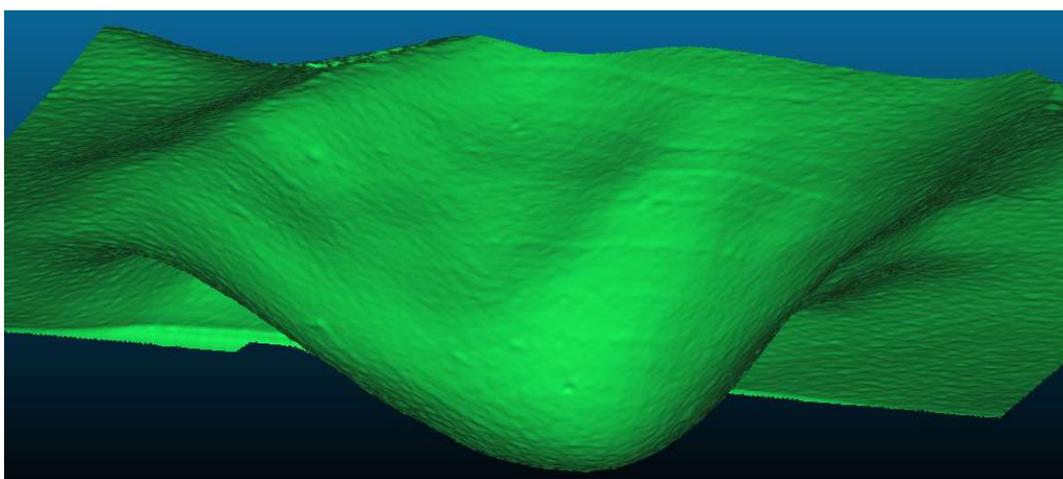


Figura 4 – Superfície gerada pela digitalização da endentação do impacto balístico no material suporte

O operador que realiza a medição, fazendo uso de instrumentos convencionais como o paquímetro (Figura 5), necessita inferir superfícies de

referência e a melhor posição para medir o trauma. Por conta disso, diversos erros de medição podem ocorrer, oriundos de uma etapa específica ou então como resultantes da conjunção de vários fatores.



Figura 5 – Medição de profundidade utilizando paquímetro convencional

Recentemente, o avanço tecnológico permitiu o surgimento de diversos instrumentos de digitalização de superfícies, também conhecidos como Scanners tridimensionais (3D) (Figura 6), e o aumento do poder computacional permitiu o desenvolvimento de *software* que possibilita o processamento das grandes quantidades de dados advindas da digitalização de superfícies [6].



Figura 6 – Exemplo de Scanner 3D: Modelo FARO FreeStyle^{3D} Objects

A Figura 4 ilustra exatamente uma superfície de trauma, digitalizada por meio do uso de um *Scanner 3D*, após já ter sido realizado todo o processo, que

inclui as etapas de aquisição e tratamento das informações via *software*. Com o uso desta ferramenta é possível obter considerável ganho de confiabilidade e reprodutibilidade para os ensaios em questão, possibilitando uma caracterização mais abrangente das superfícies deformadas.

Assim, levando-se em consideração as recentes aplicações destes instrumentos de digitalização, esta dissertação de mestrado objetivou realizar a caracterização metrológica de *scanners* 3D utilizados para medição de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos.

1.1. Definição do problema de pesquisa

O laboratório balístico do Centro de Avaliações do Exército (CAEx) possui, perante o Exército Brasileiro e a sociedade brasileira, a responsabilidade de realizar avaliações de conformidade em materiais de proteção balística.

Particularmente, no que tange ao processo de avaliação metrológica de coletes balísticos, observou-se recentemente que seria possível implantar novos métodos e ferramentas, de maneira a se obter considerável progresso em termos de confiabilidade e repetibilidade.

Até 2016, a medição do trauma associado a cada impacto balístico no colete era realizada com o auxílio de paquímetros convencionais, instrumentos que, juntamente com a metodologia de utilização, apresentavam diversas limitações, como já abordado em estudos anteriores [4]:

- Quanto à plastilina: dificuldade em estabelecer um plano de referência para a medição, pois este é obtido pelo nivelamento da superfície por meio de “raspagem”, tendo em vista que após os disparos ocorrem tanto endentações quanto ejeção de plastilina, tornando irregular a superfície antes plana.

- Quanto ao operador: dificuldade de o operador encontrar a posição exata da máxima profundidade de trauma para realizar a medição, fazendo uso do plano de referência estabelecido.

- Quanto ao paquímetro: uma vez definida a posição de medição, existe uma dificuldade em apenas realizar o “toque” da haste do paquímetro na superfície da plastilina. Caso haja algum descuido, o erro de medição pode ocorrer pela inserção da haste além da superfície de endentação ou também a haste pode não chegar a tocar a superfície da plastilina.

•Quanto ao arquivamento dos dados: impossibilidade de documentar adequadamente as deformações observadas, uma vez que, após os disparos, a plastilina é novamente regularizada e nivelada para servir a ensaios de outros coletes balísticos.

Diante disso, iniciou-se uma fase de prospecção por novas técnicas e equipamentos de medição que pudessem permitir um avanço sobre a metodologia e instrumento empregados até aquele momento.

Desse modo, em 2016, o CAEx adquiriu um equipamento de digitalização tridimensional (3D), denominado *Scanner 3D FARO FreeStyle^{3D} Objects* [7], considerado mais adequado à metrologia de superfícies complexas, tais como aquelas decorrentes dos traumas balísticos, em virtude de ser capaz de realizar a captura de grande quantidade de informações, gerando densa nuvem de pontos representativa do objeto de interesse.

Oportunamente, este equipamento permitiu um grande ganho de qualidade e confiabilidade nos ensaios balísticos, possibilitando ainda o armazenamento das informações colhidas, viabilizando assim, a criação de um banco de dados contendo os resultados dos ensaios realizados. O estudo realizado por [8] confirma a possibilidade de uso do instrumento em aplicações que requerem menores incertezas de medição, desde que determinados métodos e procedimentos sejam observados.

Entretanto, destaca-se que o emprego deste instrumento na medição de traumas em ensaios de coletes balísticos representa uma nova aplicação ainda não difundida, o que faz suscitar uma série de questões relacionadas, por exemplo, ao maior entendimento da maneira como é realizada a aquisição, ao processamento das informações e à posterior geração da nuvem de pontos representativa do objeto pelo *software* do equipamento.

Neste contexto, entende-se que o emprego desta nova ferramenta, apesar de se tratar de um processo completamente digital, ainda apresenta alguns desafios que precisam ser investigados.

Desse modo, o problema desta pesquisa está inserido na seguinte questão:

•Qual é a incerteza de medição associada à utilização de scanner 3D para medição de profundidade de trauma em coletes balísticos?

Esta questão é corroborada por outras questões a serem respondidas durante o desenvolvimento desta pesquisa:

- Qual é o resultado da comparação das digitalizações do scanner 3D com os resultados do mesmo objeto digitalizado utilizando-se instrumentos com maior exatidão, como por exemplo máquina de medição por coordenadas, braço de medição com scanner de alta resolução e braço de medição com ponta de apalpação?

- Qual é o resultado da comparação de diferentes técnicas (ópticas) para aplicação em medição de profundidade de trauma em ensaios de coletes balísticos?

- Como estabelecer um critério absoluto para metrologia das superfícies complexas (do inglês: *freeform surfaces*)?

1.2. Motivação

O Centro de Avaliações do Exército (CAEx) destina-se a realizar a avaliação de diversos materiais de interesse do Exército Brasileiro, bem como de outros materiais cuja autorização para comercialização dependem de ensaios e consequente conformidade com as normas aplicáveis. Dentre os materiais avaliados, merecem destaque os de proteção balística, tanto pela grande demanda de avaliações quanto pela infraestrutura necessária para avaliá-los.

Para que haja maior confiabilidade na metrologia da profundidade de impacto observada em coletes balísticos, foi adquirido recentemente um *Scanner 3D* capaz de digitalizar a superfície deformada do material suporte do colete balístico. Com esse equipamento é possível eliminar os erros oriundos do operador (já que a medição anteriormente era realizada com paquímetro), além de também permitir arquivar as superfícies digitalizadas, podendo inclusive servir como contraprova das deformações e profundidades observadas.

Além disso, vislumbram-se ainda para este equipamento diversas outras aplicações promissoras no contexto da avaliação de armamentos, munições e materiais de proteção balística, inclusive com possível substituição de instrumentos analógicos e complexos procedimentos de medição.

Neste sentido, para fins desta pesquisa, acredita-se que a identificação dos erros associados à medição, bem como sua incerteza e sugestões de aprimoramento deste estudo contribuirão sobremaneira não somente com a aplicação em ensaios de coletes balísticos, mas também à metrologia dimensional de outros materiais tais

como: capacetes, armamentos, munições e materiais de proteção. Considera-se que a correta compreensão das variáveis envolvidas nos processos de aquisição de informações, tratamento dos dados obtidos e posterior medição dimensional possibilitará a correta caracterização metrológica do *Scanner 3D*, bem como conhecer e até controlar as incertezas relacionadas a todo o processo dentro do contexto apresentado.

1.3.

Objetivos: geral e específicos

O objetivo geral desta dissertação de mestrado foi realizar a caracterização metrológica de um *Scanner 3D Óptico* por projeção de luz estruturada para aplicação em medição de profundidade de trauma em ensaios de coletes balísticos, levando-se em consideração as particularidades da aplicação pretendida.

Os objetivos específicos da presente dissertação de mestrado são os seguintes:

- Estudar as normas aplicáveis à medição de profundidade de trauma em ensaios de coletes balísticos;
- Estudar as diferentes técnicas de digitalização tridimensional aplicáveis à medição de profundidade de trauma em ensaios de coletes balísticos;
- Planejar as atividades experimentais a serem realizadas, com emprego de instrumentos de digitalização 3D;
- Realizar a aquisição de dados de objetos representativos no contexto do ensaio de coletes balísticos usando um *Scanner 3D Óptico* por projeção de luz estruturada;
- Realizar a aquisição de dados de objetos representativos no contexto do ensaio de coletes balísticos usando outras técnicas, tais como: reconstrução 3D por imagens estéreo (sem contato) e tecnologia de medição por coordenadas (por contato);
- Comparar os valores de profundidade de trauma obtidos com o *Scanner 3D Óptico* por projeção de luz estruturada com as outras técnicas empregadas; e
- Estimar a incerteza de medição associada à medição de profundidade de trauma em ensaios de coletes balísticos pela técnica de *scanner 3D Óptico* por projeção de luz estruturada.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

Neste capítulo 1 apresentou-se uma introdução que contextualiza o assunto, define o problema da pesquisa e descreve os objetivos geral e específicos.

No capítulo 2 são abordados os ensaios de coletes balísticos, normas aplicáveis e requisitos a serem observados nos ensaios destes materiais, com ênfase na medição de profundidade de trauma e nas principais deficiências dos métodos tradicionais utilizados atualmente para caracterização da grandeza de interesse (comprimento).

O capítulo 3 apresenta diversas técnicas de digitalização tridimensional passíveis de serem aplicadas na medição de profundidade de trauma em ensaios de coletes balísticos, bem como os respectivos instrumentos de medição que podem ser usados para tais ensaios. Também são apresentados conceitos relacionados aos princípios de funcionamento e aquisição de dados, das quais serão extraídas as informações de interesse.

Fundamentos relacionados às nuvens de pontos e tratamentos destes conjuntos de dados são apresentados no capítulo 4. Neste capítulo são descritos alguns algoritmos relacionados à segmentação, alinhamento, reconstrução de superfície e filtragem, com ênfase naqueles utilizados nesta dissertação para tratamento dos dados.

A metodologia empregada para realização dos ensaios, preparação das amostras, aquisição das imagens e demais procedimentos adotados são apresentados no capítulo 5, abordando inclusive as dificuldades encontradas.

Os resultados são apresentados no capítulo 6, juntamente com análises estatísticas visando à comparação qualitativa e quantitativa das informações.

Por fim, apresentam-se as conclusões, onde estão destacados os pontos mais relevantes deste trabalho e sua contribuição para esta área do conhecimento, bem como uma breve seção abordando as sugestões para trabalhos futuros.

2 Ensaio de coletes balísticos

O presente capítulo apresenta alguns termos e conceitos relacionados à balística, bem como a metodologia e normas aplicáveis à avaliação da conformidade de coletes balísticos. Desta forma, será possível ter melhor compreensão sobre o fenômeno balístico envolvido e também sobre o processo de ensaio de coletes balísticos.

2.1. Fundamentos Teóricos

A balística corresponde à área do conhecimento que estuda o comportamento de projéteis durante o voo e também os efeitos causados nos mais diversos materiais. Os fenômenos relacionados a esta área são predominantemente de natureza estocástica e fazem uso de modelagens matemáticas e estatísticas, tanto para explicar os fenômenos quanto para modelá-los [9]. A balística pode ser dividida em três subáreas:

- Balística interna, que trata dos fenômenos que envolvem a interação da arma, projétil e carga propelente antes da saída do projétil pela boca da arma;
- Balística externa, que diz respeito ao deslocamento do projétil até o alvo, tratando principalmente da interação do projétil com o ar [10];
e
- Balística terminal, que analisa os efeitos do projétil no alvo considerado, como é o caso dos ensaios em coletes balísticos. No caso específico destes materiais existe ainda uma recente área de estudo cuja denominação em inglês é “*wound ballistics*” [11,12] que estuda os danos causados pelos projéteis aos tecidos vivos, com ênfase nos tecidos humanos, objetivando compreender o fenômeno.

Para que ensaios balísticos dentro de cada subárea mencionada anteriormente possam ser realizados com elevado grau de confiabilidade, deve ser dada especial atenção aos equipamentos utilizados para esta finalidade. Sistemas de disparo devem ser robustos e fabricados com meticulosidade e zelo, pois certamente a qualidade superior do equipamento envolvido impacta diretamente nos resultados dos ensaios balísticos.

Basicamente, um sistema de disparo (Figura 7) é composto de provete, estativa e receptor. O provete é um cano raiado próprio para realização de ensaios balísticos e pode ser fabricado nos mais diversos calibres conforme pode ser visto na Figura 7a. Para que os disparos possam ser realizados, o provete necessita ser corretamente fixado em um dispositivo chamado receptor, que também realizará o fechamento da parte anterior da munição e realizará o disparo. O conjunto composto de provete e receptor é então fixado em uma estrutura chamada de estativa, que permite pequenos ajustes verticais (elevação) e horizontais (azimute) (Figura 7b).

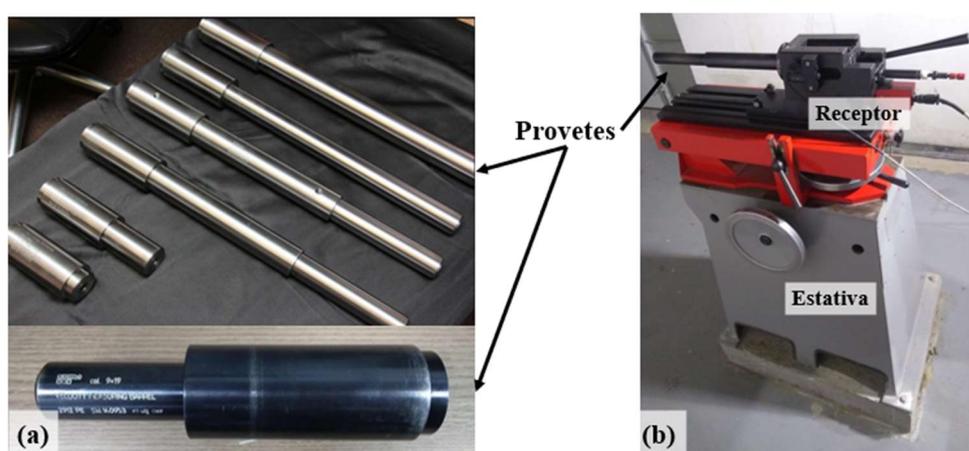


Figura 7 – Sistema de disparo: (a) Provetes de diversos calibres para uso em laboratório balístico e; (b) Sistema de disparo de projéteis composto de provete, receptor e estativa

A medição de velocidade dos projéteis constitui outro importante parâmetro na realização de ensaios balísticos das mais diversas finalidades. A tecnologia evoluiu bastante e permite atualmente o registro de velocidades com incerteza de medição da ordem de 0,05 % [13], considerada muito baixa nesse contexto. Geralmente a medição é realizada por meio do uso de equipamentos conhecidos como barreiras balísticas (Figura 8).

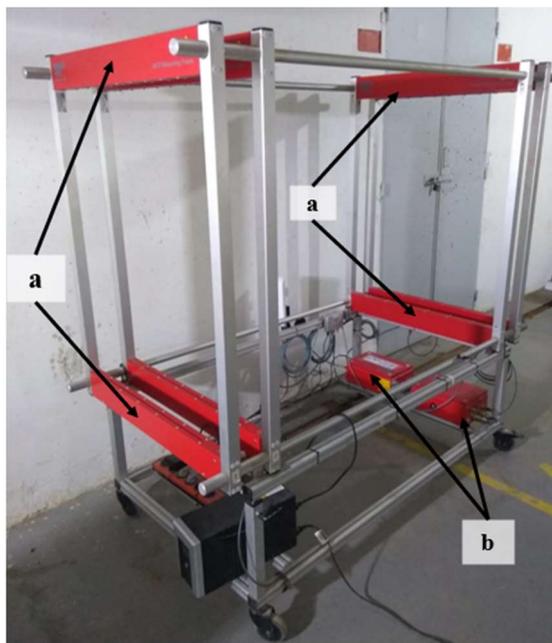


Figura 8 – Barreira balística empregada para ensaios em coleta balístico composta de: (a) Feixes de infravermelho e; (b) Contadores de tempo com sistema de processamento e transmissão de dados

Estes dispositivos possuem sensores infravermelhos capazes de perceber a passagem do projétil entre duas posições distintas e contadores de tempo para determinar o intervalo de tempo decorrido. Uma vez que a distância entre os sensores é conhecida, é possível estimar a velocidade média. Outra possibilidade, no que diz respeito à medição de velocidade de projéteis, seria o uso de radares balísticos como pode ser visto na Figura 9, entretanto os resultados obtidos por meio deste equipamento apresentam maior incerteza em comparação aos fornecidos pela barreira balística [13–16].

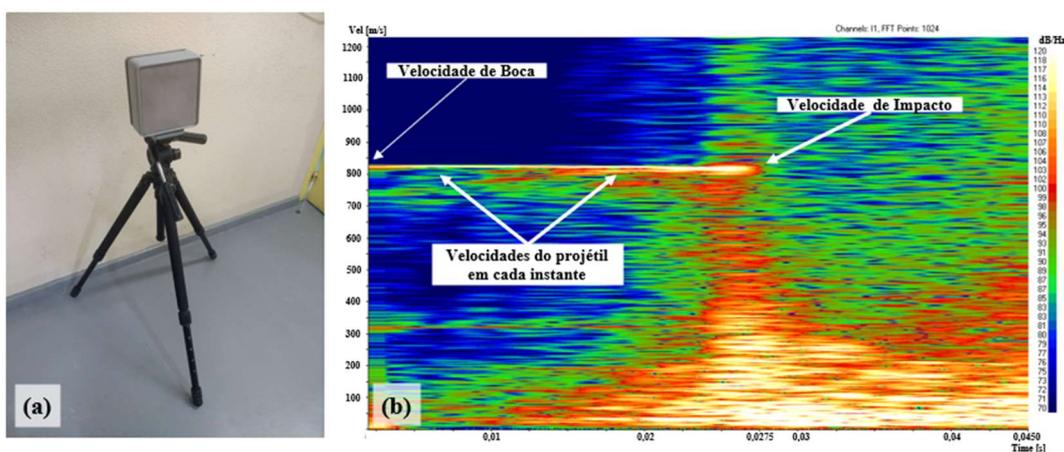


Figura 9 – (a) Radar balístico Doppler e; (b) Resultados da medição realizada com radar para munição 7,62 mm, onde é possível observar o espectro eletromagnético e a velocidade desenvolvida desde a saída da boca do projétil até o impacto em 15 m

Apesar de haver muitas tecnologias disponíveis atualmente para medição de velocidade de projéteis, ainda é difícil obter velocidades específicas ou que estejam inseridas em um pequeno intervalo de ± 1 m/s ou até mesmo ± 5 m/s, considerando munições que tenham sido confeccionadas com os mesmos componentes, quantidade de propelente e força no engaste do projétil.

Este é um dos principais motivos pelos quais as normas de ensaios de coletes balísticos, que serão abordadas posteriormente neste capítulo, costumam especificar uma faixa de velocidades admissíveis para que o impacto no colete balístico ocorra.

Fenômenos de balística terminal podem ser considerados instantâneos na maioria das vezes [9] e desta forma é suposto que a transferência de energia seja realizada quase instantaneamente (Figura 10). Considerando blindagens e alvos de natureza metálica, ocorre geralmente a desintegração do projétil durante essa transferência, dada a dureza e também a massa do material.

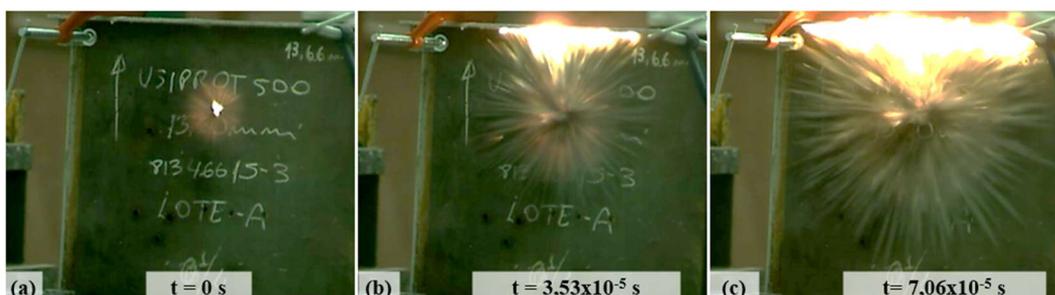


Figura 10 – (a) Blindagem metálica sob impacto de projétil .50 de 42 g a uma velocidade de aproximadamente 850 m/s e os instantes após o impacto; (b) $t = 3,53 \times 10^{-5}$ s e; (c) $t = 7,06 \times 10^{-5}$ s. Imagens capturadas com auxílio de câmera de alta velocidade

No caso dos coletes balísticos, por razões relacionadas ao peso e mobilidade do indivíduo, é inviável que se utilizem chapas metálicas para esta finalidade, motivo pelo qual trabalhou-se durante muitos anos no desenvolvimento de fibras e tecidos balísticos [17], com principal destaque para materiais como o polietileno de alta densidade (PEAD) e o Kevlar[®]. Este último foi desenvolvido pela empresa DuPont[®], sendo resultado de processo químico e mecânico altamente controlado, cujo produto é uma fibra capaz de resistir a elevadas tensões tanto aplicadas gradativamente como também aplicadas instantaneamente (fenômeno modelado como instantâneo). Estas características, associadas à alta relação resistência/peso [18], torna a fibra ideal para fabricação de tecidos objetivando proteção balística. A superposição de diversas camadas de tecido confeccionado com Kevlar[®] e a união

destas por meio de costura adequada compõe um painel balístico. A disposição de dois painéis balísticos em capas suporte é definida como sendo um colete balístico, como pode ser visto na Figura 11.

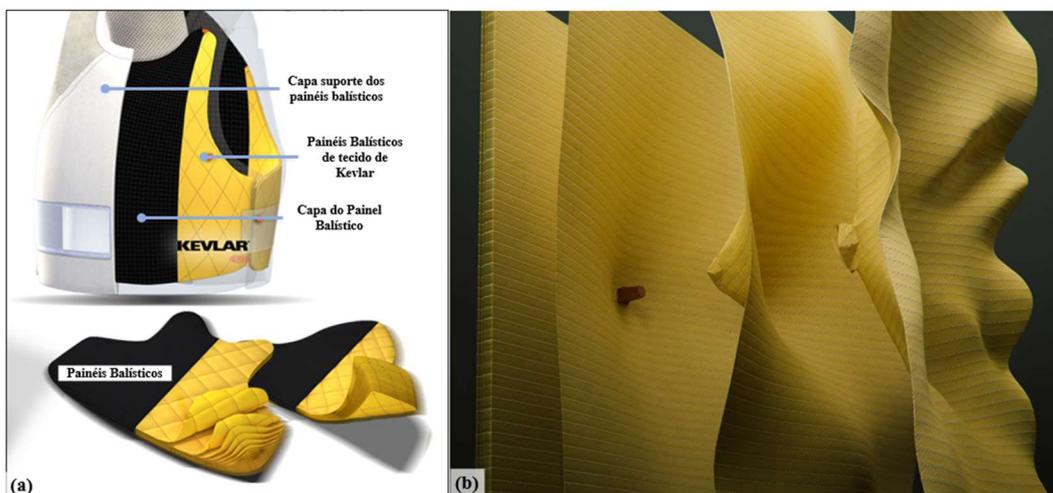


Figura 11 – Composição do colete balístico: (a) Partes que compõem um colete balístico e (b) Penetração parcial de projétil em algumas camadas de tecido de Kevlar. Fonte: Adaptado de [18,19]

Pode-se considerar que a finalidade das blindagens metálicas e também dos painéis balísticos é a mesma: não permitir a passagem de projéteis com determinado nível de energia cinética, sendo que no caso dos coletes balísticos a dissipação de energia e consequente parada do projétil se dão pelo rompimento de parte das camadas do tecido balístico, deformação plástica do projétil e ainda deformação supostamente elástica do tórax do usuário. Desta forma, este fenômeno pode ser considerado substancialmente mais complexo pois, além de envolver um material multicamada, ainda diz respeito à interação do colete balístico com o tórax do usuário e sua sobrevivência após determinado impacto balístico [17,20]. Os estudos desta interação são realizados geralmente com o uso de gelatina balística [21], por permitir a instalação adequada de sensores e também pelo fato de as propriedades do material se assemelharem ao tórax humano ou animal.



Figura 12 – (a) Modelo de torso humano confeccionado em gelatina balística e; (b) Tabela contendo algumas propriedades mecânicas do torso humano que são reproduzidas em gelatina balística. Fonte: Adaptado de [22,23]

Em virtude de haver a parada e dissipação quase instantânea de energia do projétil no colete balístico, existe a formação de ondas de choque [24] que se propagam nos órgãos e tecidos do usuário atingido, podendo causar sérios danos ou mesmo a morte do indivíduo. Este efeito gerado pelas ondas de choque é denominado *Behind Armor Blunt Trauma (BABT)* [21,25] ou simplesmente trauma, e pode causar danos torácicos e abdominais.

Atualmente pode-se dizer que a avaliação da conformidade de coletes balísticos objetiva: (i) atestar que os coletes não serão perfurados por determinada ameaça balística e também: (ii) que o trauma gerado seja inferior a um valor específico, tudo com o objetivo de preservar a vida do usuário e gerar mínimos danos.

2.2. Normas aplicáveis a ensaios de coletes balísticos

Os ensaios de coletes balísticos são realizados atualmente seguindo diversos critérios, objetivando assegurar resultados confiáveis e passíveis de serem reproduzidos em qualquer laboratório voltado para este fim.

As normas mais utilizadas atualmente são as criadas pelo Instituto Nacional de Justiça (NIJ) dos Estados Unidos: NIJ 01.01.04 de 2000 [2] e NIJ 01.01.06 de 2008 [26]. Ambas as normas definem como critérios mais importantes para avaliação de coletes balísticos: a perfuração e a profundidade de trauma observada (*Behind Armor Blunt Trauma – BABT*).

As ameaças balísticas são divididas em diversos níveis, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1- Níveis de proteção estabelecidos pela norma NIJ 01.01.04 [2]

Nível	Munição	Massa do Projétil	Velocidade
I	.22LR	2,6 g	329 ± 9 m/s
	.380 ACP	10,2 g	322 ± 9 m/s
IIA	9 mm	8,0 g	341 ± 9 m/s
	.40 S & W	11,7 g	322 ± 9 m/s
II	9 mm	8,0 g	367 ± 9 m/s
	.357 Mag	10,2 g	436 ± 9 m/s
IIIA	9 mm	8,0 g	436 ± 9 m/s
	.44 Mag	15,6 g	436 ± 9 m/s
III	7.62 mm NATO	9,6 g	847 ± 9 m/s
IV	.30 M2 AP	10,8 g	878 ± 9 m/s

Na Figura 13 é apresentado um gráfico comparativo das energias cinéticas de cada projétil, calculadas com base na norma NIJ 01.01.04, considerando as velocidades apresentadas na Tabela 1. Desta maneira é possível compreender que níveis maiores de proteção balística correspondem a maiores níveis de energia do projétil aos quais o colete balístico precisa resistir.

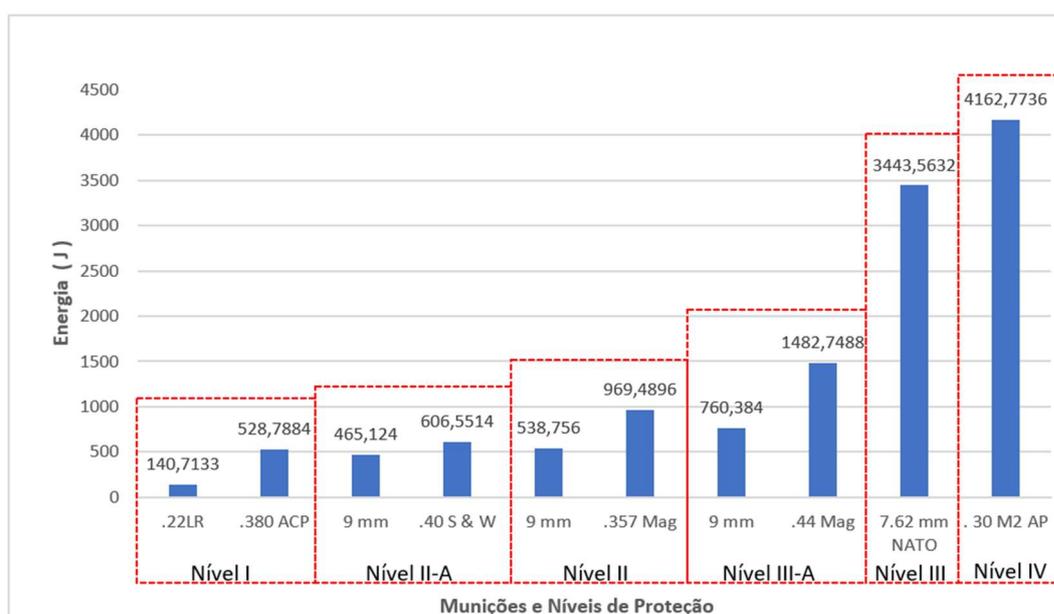


Figura 13 – Energia cinética dos projéteis de acordo com NIJ 01.01.04

Como já mencionado anteriormente, nem toda a energia consegue ser dissipada no colete balístico (geralmente a espessura dos painéis balísticos é em torno de 1 cm, podendo ter número variável de camadas) e o usuário acaba tendo um trauma na região do impacto balístico, como foi possível observar na Figura 3. Diante disso, torna-se necessário quantificar este trauma de alguma maneira.

Os principais parâmetros de controle para os ensaios de coletes balísticos e sua conformidade estão relacionados à velocidade com que determinado projétil impacta a amostra ensaiada e principalmente com a deformação causada por este impacto. Este último parâmetro certamente foi o mais difícil de ser quantificado e medido até que se chegasse ao que hoje as normas de coletes balísticos denominam profundidade de trauma (do inglês “*Backface Deformation*” ou “*Blunt Armor Trauma*”).

As normas NIJ 01.01.04 e NIJ 01.01.06 estabelecem procedimentos para medi-la, sendo que, para a primeira norma, o valor absoluto máximo admissível é 44 mm (Figura 14) e para a segunda os valores podem chegar a 50 mm, neste último caso fazendo uso de dados estatísticos observados no ensaio de diversas amostras [2,26].

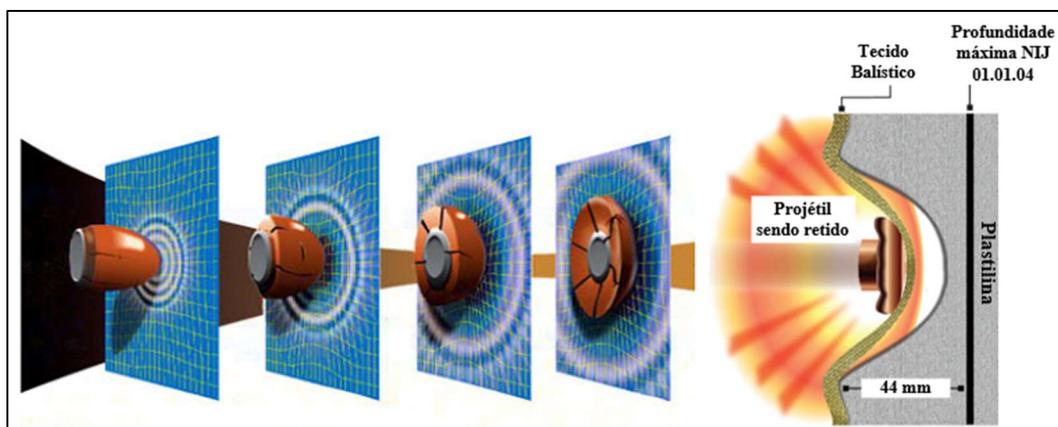


Figura 14 – Impacto de projétil sobre tecido balístico onde é possível visualizar o valor de 44 mm como sendo o valor absoluto máximo admissível para profundidades de endentação. Fonte: Adaptado de [27]

As origens destes valores remontam à descoberta e introdução das fibras de aramida (Kevlar®) na fabricação de coletes balísticos. Desde o início dos anos 70, o governo americano investe em pesquisas objetivando compreender o fenômeno e principalmente melhorar a qualidade e confiabilidade dos coletes. Todo esse esforço foi denominado ‘*Lightweight Soft Body Armor Program*’ e resultou no desenvolvimento de um modelo que permitisse reproduzir e quantificar um possível

trauma em um indivíduo que estivesse utilizando proteção balística, o que permitiria a realização de ensaios e normalização de ensaios de coletes balísticos [5].

Diversas metodologias foram empregadas e desenvolvidas pelos envolvidos no programa no intuito de encontrar ou desenvolver um material que pudesse servir de material de suporte para os coletes durante os testes, algo que reproduzisse o comportamento mecânico do torso humano e permitisse mensurar deformações máximas ocorridas no impacto [5]. O material escolhido foi a plastilina ROMA[®] n° 01 (um tipo específico de massa de modelar) que, sob determinadas condições de temperatura, atinge determinada consistência e atende aos requisitos mecânicos e de plasticidade especificados [5].

2.2.1.

Procedimento experimental de ensaio de coletes balísticos baseado na norma NIJ 01.01.04

Objetivando-se verificar a conformidade com a norma supracitada, são realizados ensaios balísticos em determinada amostra de coletes balísticos. Uma vez selecionado o nível para o qual se deseja ensaiar determinado colete balístico (Tabela 1), o ensaio se inicia com o condicionamento das amostras por pelo menos 12 horas nas mesmas condições de temperatura e umidade em que será realizado o ensaio. Após este procedimento, ocorre a marcação dos pontos que receberão os disparos.

Como já mencionado, o material de suporte é constituído de plastilina ROMA[®] n° 01, acondicionada em recipiente de 610 mm x 610 mm x 197 mm. Antes da realização do ensaio, a plastilina passa por um condicionamento de temperatura (geralmente entre 30 °C e 35 °C), o qual visa deixar a sua consistência semelhante àquela especificada na norma NIJ 0101.04 [2]. Para validar o condicionamento e a consistência da massa, é realizado o teste de queda (Figura 15), que consiste na queda de esferas com tamanho e massa padronizados, sabendo-se que as profundidades das endentações devem estar compreendidas entre 17 mm e 21 mm.

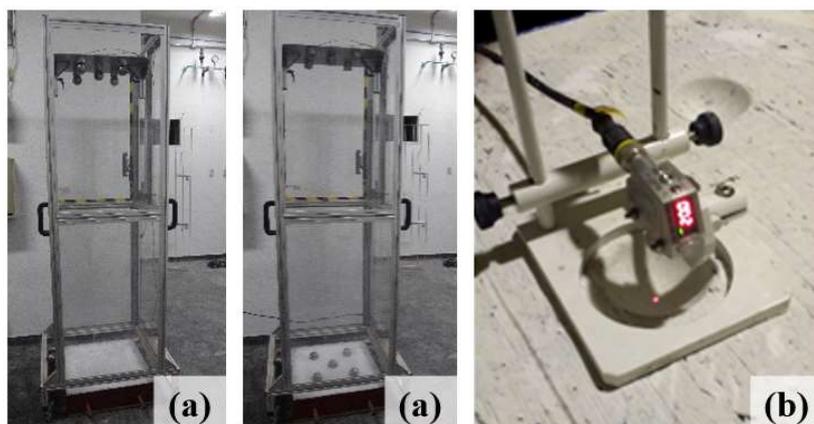


Figura 15 – Teste de consistência da plastilina: (a) Teste de queda e; (b) Medição de profundidade de endentação após o teste

Com os parâmetros da plastilina validados pelo teste de queda, o ensaio segue com a fixação do colete balístico no material de suporte e o setup de ensaio é configurado conforme mostrado na Figura 16.

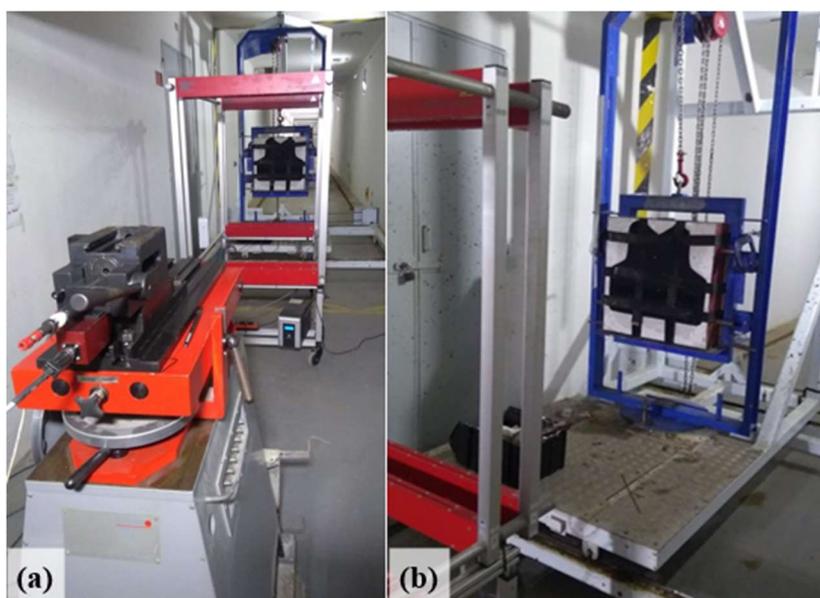


Figura 16 – Setup de ensaio de coletes balísticos: (a) Posicionamento do sistema de disparo, barreira balística e colete balístico e; (b) Posicionamento do colete balístico sobre a caixa de plastilina (material suporte)

São realizados 6 disparos contra o painel balístico, sendo que nos três primeiros são observados os critérios de deformação, que não deve exceder 44 mm de endentação, segundo a norma NIJ 0101.04 [2]. Nos outros três disparos, apenas o critério de perfuração é observado, ou seja, se ocorre ou não perfuração do painel balístico.

Em cada painel balístico são realizadas 2 medições de profundidade, sendo utilizado sempre o 1º tiro e, dentre o 2º e 3º tiros, é escolhido aquele que teve maior velocidade.

Para a medição da profundidade observada na plastilina (Figura 17), o procedimento especificado em norma consiste em: (i) o operador realiza a “raspagem” da face que recebeu os impactos, de maneira a deixá-la plana e uniforme para a medição com o paquímetro; (ii) uma régua metálica é apoiada sobre a deformação que se deseja medir, de maneira a servir de apoio para o paquímetro; (iii) o operador localiza visualmente o local de maior profundidade; (iv) a medição é realizada com o cuidado de não inserir o paquímetro na plastilina.

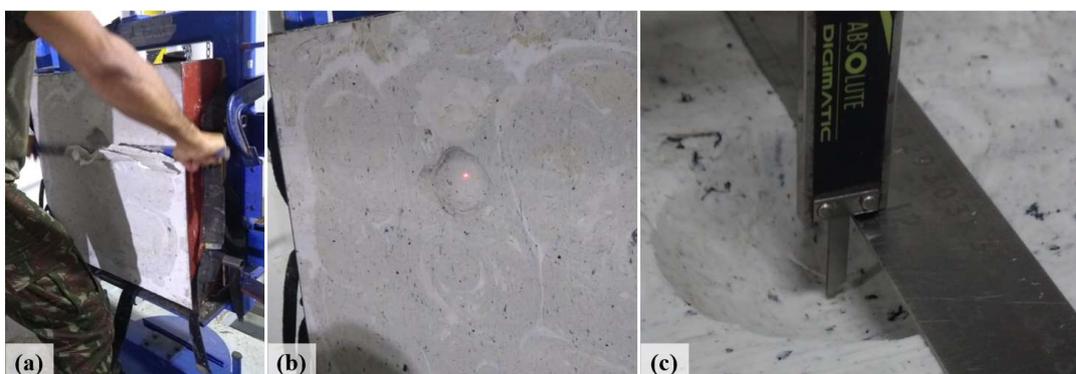


Figura 17 – Processo de medição de profundidade de trauma: (a) Plastilina sendo nivelada com auxílio de “faca” confeccionada para esta finalidade, (b) Plastilina após raspagem com endentação evidenciada e; (c) Medição de profundidade com auxílio do paquímetro

Neste processo de caracterização, ocorrem tipicamente alguns inconvenientes [28,29], tais como: para cada “raspagem” (item i) a superfície de referência pode ser diferente, retirando menos ou mais material do que seria necessário; e, ainda, a medição é em grande parte baseada na experiência do operador, conforme relatado no procedimento descrito anteriormente nos itens (ii), (iii) e (iv) o que pode ocasionar uma série de erros em sequência. Assim, ao fim do processo completo não se pode afirmar que os critérios de resolução e incerteza do instrumento de medição utilizado são atendidos [28,29].

No Anexo B encontra-se o artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia 2019 intitulado: “Aplicação de Scanner 3D para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos”, onde é enfatizado que a utilização do paquímetro para medição de traumas pode ocasionar erros consideráveis (3,699 mm).

2.2.2.

Outras normas sobre ensaios de coletes balísticos em uso atualmente

Outras organizações de diversos países confeccionaram normas para ensaios em coletes balísticos, como pode ser observado no Quadro 1.

Os mesmos critérios de perfuração e profundidade de trauma são observados, sendo que as particularidades são devidas a necessidades de emprego, ameaças locais e motivos de economicidade.

Algumas normas de ensaios balísticos são de uso exclusivamente militar e são de forma geral mais severas nos critérios de conformidade dos materiais ensaiados. De acordo com estas normas, os materiais balísticos devem ser ensaiados utilizando calibres e ameaças encontradas no campo de combate, como, por exemplo, munições perfurantes e fragmentos simulados [30].

Quadro 1 - Normas para ensaio de coletes balísticos mais utilizadas atualmente

National Institute of Justice (EUA)	NIJ 01.01.04 (2001)
	NIJ 01.01.06 (2008)
	NIJ 01.01.07 (Draft)
Militar Standard (EUA)	MIL-STD-3027 - Hard Body Armor Standard for Ballistic Testing
ASTM (EUA)	ASTM E3004-15 Preparation and Verification of Clay Blocks Used in Ballistic-Resistance Testing of Torso Body Armor
	ASTM E3068 - 17 Contact Measurement of Backface Deformation in Clay Backing During Body Armor Testing
	ASTM E3005 - 18 Standard Terminology for Body Armor
	ASTM E3107- 19 Resistance to Penetration and Backface Deformation for Ballistic-resistant Torso Body Armor and Shoot Packs
Home Office Scientific Development Branch (Reino Unido)	HOSDB Body Armour Standards for UK Police (2007) Part 1
	HOSDB Body Armour Standards for UK Police (2007) Part 2
	HOSDB Body Armour Standards for UK Police (2007) Part 3
GOST Ballistic Standards (Rússia)	RUSSIA - GOST R 50744-95
Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen (Alemanha)	VPAM 2006
	Technische Richtlinie March 2008

Dentre as normas existentes, as mais conhecidas são as elaboradas pelos seguintes órgãos: *National Institute of Justice -NIJ* (Estados Unidos), *Home Office Scientific Development Branch - HOSDB* (Reino Unido) e *Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen -VPAM*

(Alemanha). Estas normas são utilizadas por diversos outros países, com destaque para as normas NIJ, que são utilizadas no Brasil. As normas HOSDB e VPAM são muito empregadas por toda a União Europeia e Reino Unido.

Recentemente, o Instituto Nacional de Justiça americano tem trabalhado em conjunto com a *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, para normalizar procedimentos de ensaio de coletes à prova de bala separadamente. Embora ainda não esteja em vigor, a versão de rascunho da NIJ 01.01.07 [31] já faz referência a esta abordagem ao se tornar um documento remissivo às normas ASTM.

2.3. Particularidades da medição de traumas em ensaios de coletes balísticos

As medições de trauma realizadas nos ensaios de coletes balísticos empregam metodologia amplamente conhecida e normalizada. Apesar disso, ainda existem algumas deficiências que podem comprometer o resultado final, principalmente no que diz respeito à exatidão das informações adquiridas.

2.3.1. Medição convencional e limitações

As normas existentes para ensaios de coletes balísticos não especificam instrumentos de medição para mensurar a profundidade de trauma, apenas dizem que o instrumento deve satisfazer determinadas condições.

As normas NIJ 01.01.04 [2] e NIJ 01.01.06 [26] estabelecem apenas que o instrumento de medição deve ter incerteza de medição² de 1 mm, e deve haver algum dispositivo que possa estabelecer referências nas bordas da caixa de plastilina ou na superfície que não foi deformada pelo impacto. A NIJ 01.01.06 faz um acréscimo a este requisito, estabelecendo que, quando a medição não for

² As normas NIJ 01.01.04 e NIJ 01.01.06 apresentam o seguinte trecho referente à exatidão dos instrumentos a serem utilizados para medição de endentações: “Depth of indentation measurements shall utilize measurement devices (± 1 mm accuracy) indexed to the undisturbed reference surface or the edges of the fixture [...]”. [2,26]. Pelo fato de exatidão ser um conceito qualitativo, utilizou-se nesta dissertação o termo “incerteza de medição”.

completamente automatizada, ela deve ser realizada por mais de um operador. Não existe nestas normas um procedimento específico para aplicação em medição do trauma.

A NIJ 01.01.06 incorporou a Figura 18 que, apesar de esclarecer um pouco melhor como deve ser medida a profundidade de trauma, ainda deixa lacunas no que diz respeito aos instrumentos a serem utilizados. Além disso, na prática é muito difícil estabelecer o ponto de referência com a exatidão necessária para medição do trauma, pois após o impacto de projétil e deformação da plastilina este ponto “não existe mais” como é possível ver na Figura 18 (b).

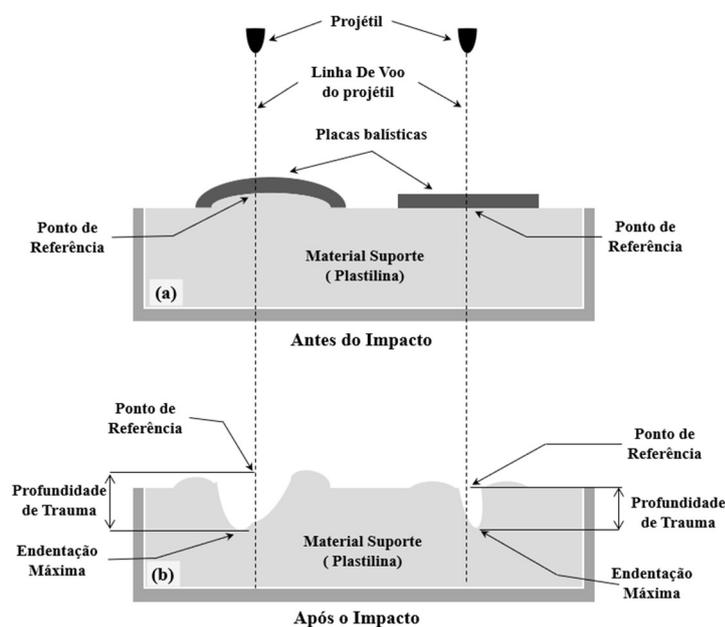


Figura 18 – Desenho esquemático encontrado na NIJ 01.01.06 referente aos traumas ocasionados pelo disparo de projéteis sobre o material balístico: (a) Caixa de plastilina antes do impacto e; (b) Medição de profundidade após o impacto. Adaptado de [26]

Após os impactos, não há garantia de que o material de suporte (plastilina) nas imediações do trauma não tenha sido deformado, como supõe a norma. Certamente existe um deslocamento, ainda que pequeno, em toda a plastilina, de modo a acomodar o deslocamento de material por ocasião de determinado impacto, uma vez que existe a formação de um espaço vazio que não existia anteriormente.

A medição de traumas realizada em ensaios de coletes balísticos contempla procedimentos a serem executados em painéis balísticos ou placas planas e também em placas curvas (Figura 18). A medição de trauma é ainda mais dificultada para estes materiais que apresentam curvatura, pelo motivo da superposição dos disparos

e respectivos traumas (Figura 19). Nestas blindagens, costumam ser efetuados seis disparos sendo que somente o primeiro trauma não recebe interferência dos demais.

Os demais 5 disparos geram deformações cujas dimensões certamente receberam algum tipo de influência das deformações e impactos anteriores. Isto significa que, mesmo que a medição dos traumas seja realizada a cada disparo, ainda haverá esta fonte de incerteza no resultado.

Outro ponto a ser mencionado é que deve haver uma medição da superfície antes do impacto, para que esta possa ser comparada com o valor obtido após a deformação. Neste caso não é possível ter certeza de que este valor inicial servirá ao seu propósito, pois o impacto pode ocorrer em um ponto alguns milímetros deslocado, mesmo contando com sistemas balísticos, munições e projéteis ótimos do ponto de vista metrológico. A explicação para este fenômeno se deve à natureza estocástica dos fenômenos balísticos.

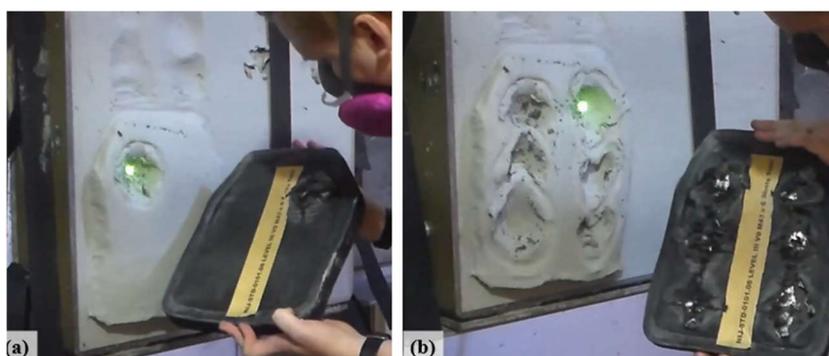


Figura 19 – Deformações na plastilina após disparos contra painel balístico curvo: (a) Deformação causada pelo primeiro disparo contra painel balístico curvo e; (b) Deformações causadas pelos 6 disparos contra o painel balístico curvo [32]

Para a medição de traumas em painéis curvos, é necessária a utilização de alguns dispositivos adaptadores para que o operador consiga realizar medições, tomando por base alguma superfície de referência, como é o caso ilustrado na Figura 20.

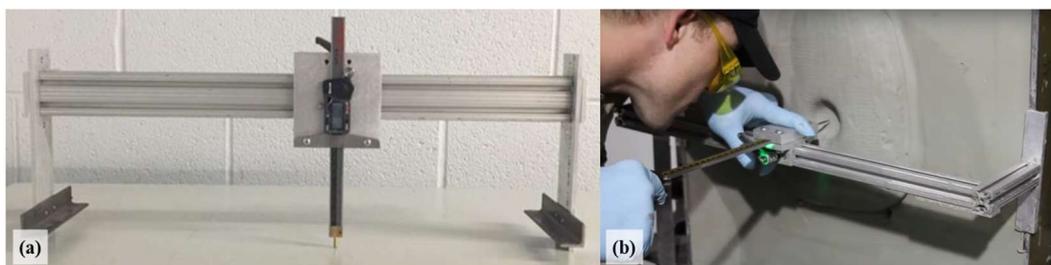


Figura 20 – (a) Dispositivo conhecido como “*Bridge Gauge*”, no qual existe a adaptação de um paquímetro de profundidade. Fonte: Adaptado de [33] e; (b) Uso do instrumento para medição da profundidade de trauma. Fonte: Adaptado de [34]

O laboratório balístico do Centro de Avaliações do Exército (CAEx) atualmente faz uso de um instrumento laser adaptado (Figura 21) para a medição de deformações em plastilina referentes a painéis e placas planas. Sua utilização permite a aquisição de informações de profundidade pelo operador sem que haja interação da ponta do paquímetro com a plastilina. Claramente este problema está presente nos procedimentos observados na Figura 17 e na Figura 20. Considerando a complexidade da medição de profundidade em placas curvas (Figura 19 e Figura 20) o Centro de Avaliações do Exército passou a adotar desde 2017 o uso de Scanner tridimensional óptico para digitalizar as superfícies antes e após os disparos, extraindo informações de profundidade com mais facilidade e confiabilidade.



Figura 21 – Dispositivo para medição de trauma utilizado atualmente pelo CAEx

Os dispositivos mencionados anteriormente (exceto o *scanner* tridimensional óptico), por melhores que sejam, ainda apresentam considerável dependência da habilidade do operador, uma vez que a localização dos pontos de referência e de maior profundidade necessitam ser feitos visualmente.

A preparação da plastilina para as leituras de profundidade também pode ser uma considerável fonte de erros no processo, considerando os ensaios realizados em painéis balísticos comuns ou placas planas, podendo ser destacadas as seguintes deficiências:

- Geralmente a “raspagem” é realizada antes dos disparos e não há como garantir que a superfície preparada esteja perfeitamente plana para servir de suporte ao painel balístico ou placa;

- Após a “planificação” da superfície da plastilina, ocorre a fixação do colete e os disparos subsequentes. Pelo fato de haver endentações, ocorre ejeção de material nas adjacências da região de trauma. Esta informação é simplesmente ignorada, pois a medição da profundidade de trauma toma por referência a superfície planificada original; e
- A nova “raspagem” pode inserir mais erros, uma vez que não há como garantir que a nova superfície de referência seja idêntica à original.

A medição dos traumas utilizando os equipamentos convencionais disponíveis ocorre somente após o processo descrito anteriormente, o que é capaz de tornar duvidosos os resultados dos ensaios.

Outra deficiência das técnicas mencionadas é que não é possível arquivar os resultados obtidos. Por se tratar de informação tridimensional, fotos não são suficientes para esta finalidade e, desta forma, os registros dos ensaios acabam por possuírem apenas informações de profundidade e velocidade do projétil.

Deve-se frisar que o arquivamento das informações 3D do trauma poderia ser útil tanto para posteriores contraprovas, como também para finalidades de pesquisa e aprimoramento do processo e materiais balísticos.

2.3.2. Abordagem Estatística da NIJ 01.01.06

Dentre outros objetivos e também para mitigar os possíveis erros associados ao processo de medição de traumas, a norma NIJ 01.01.04 foi revisada e este processo deu origem à norma NIJ 01.01.06.

Como principais diferenças, podem ser mencionadas a supressão de alguns calibres como os presentes no nível I da NIJ 01.01.04, aumento das velocidades das munições presentes nos níveis IIA, II e IIIA, adição de etapa de envelhecimento artificial em ambiente controlado (condicionamento ambiental), aumento considerável do número de amostras e adoção de tratamento estatístico na medição de profundidade de trauma para fins de verificação de conformidade do material balístico.

A abordagem estatística empregada para análise das profundidades de trauma passou a permitir que o valor medido de alguns traumas esteja entre 44 mm

e 50 mm, de maneira que 80 % de todas as profundidades medidas estejam abaixo de 44 mm, com intervalo de confiança de 95 %³.

Desta forma, foi estabelecido o cálculo de um limite superior de tolerância por meio da fórmula: $L_S = \bar{L} + K_1 s$, onde \bar{L} é a média amostral das profundidades de trauma, s é o desvio padrão amostral e K_1 corresponde a um valor a ser determinado com base no número de amostras, na proporção de 80 % e no valor do intervalo de confiança considerado de 95 %, sendo que $L_S \leq 44$ mm.

A Tabela 2 exemplifica situações em que houve pelo menos uma medição acima de 44 mm e abaixo de 50 mm para deformações provocadas por um mesmo calibre. Considerou-se uma amostra de 12 valores de profundidades de trauma, variando-se a média amostral e também o desvio padrão amostral. Para este número de amostras, K_1 calculado corresponde a 1,568.

Tabela 2 – Limite superior de tolerância calculado para diversos cenários, considerando 12 medições de profundidade, variação nos valores de média amostral e também nos valores de desvio padrão amostral. Tabela elaborada com base em [26].

Média das Profundidades (mm)	Desvio Padrão Amostral (mm)			
	1	1.5	2	2.5
44	45,57	46,35	47,14	47,92
43	44,57	45,35	46,14	46,92
42	43,57	44,35	45,14	45,92
41	42,57	43,35	44,14	44,92
40	41,57	42,35	43,14	43,92
39	40,57	41,35	42,14	42,92
38	39,57	40,35	41,14	41,92
37	38,57	39,35	40,14	40,92
36	37,57	38,35	39,14	39,92
35	36,57	37,35	38,14	38,92
34	35,57	36,35	37,14	37,92
33	34,57	35,35	36,14	36,92

Os valores observados que se encontram abaixo de 44 mm satisfazem ao requisito da norma a NIJ 01.01.06 neste caso hipotético e estão representados na cor azul na Tabela 2.

A norma NIJ 01.01.06 explica em seu apêndice D que tal medida foi adotada para levar em consideração as variações na medição das endentações causadas e também os erros associados à preparação da caixa de plastilina [26].

³ Maiores informações referentes à formulação matemática podem ser encontradas no apêndice D da norma NIJ 01.01.06 [26]

Ao realizar este tipo de consideração, a norma supõe que os instrumentos a serem empregados para medições de trauma sejam majoritariamente convencionais, como o paquímetro de profundidade, e que instrumentos de digitalização de superfície ainda não são empregados por todos os laboratórios em ensaios de coletes balísticos.

Cabe ressaltar que a adoção deste procedimento passou a ser possível com o aumento do número de amostras ensaiadas e que neste quesito a NIJ 01.01.04 é mais conservadora ao estabelecer que nenhuma profundidade deve ser superior a 44 mm.

3 Técnicas de digitalização tridimensional

A tecnologia de digitalização 3D consiste na obtenção de modelos matemáticos e computacionais de objetos e superfícies. Tal tecnologia experimentou rápidos avanços desde que foi desenvolvida e implementada nos anos 80. O que inicialmente se constituía de pontas de apalpação que tocavam milhares de vezes o objeto de interesse evoluiu para soluções que utilizavam o laser para realizar as mesmas medições. O aumento do poder computacional ao longo dos anos contribuiu muito para o avanço da tecnologia e sua acessibilidade em termos econômicos e práticos, permitindo assim a disseminação do uso de equipamentos de escaneamento tridimensional a laser em muitas aplicações para diferentes fins [35].

A partir dos anos 2000, a indústria e a sociedade em geral passaram a contar com sistemas de digitalização de objetos físicos e outras estruturas com alta fidelidade geométrica, baseados em tecnologias de luz azul/branca incorporada a uma óptica de alta resolução para reprodução detalhada de peças em tempo muito reduzido. Somando-se a esses fatores, o avanço da tecnologia e sua acessibilidade em termos econômicos tornaram os *Scanners* Ópticos 3D e outros processos de digitalização de objetos poderosas ferramentas para aplicação em diversos ambientes, o que explica sua recente disseminação na indústria, possibilitando inclusive análises dimensionais com alto nível de confiabilidade [36].

No campo da digitalização de objetos, as técnicas disponíveis são inúmeras, possibilitando seu emprego em diferentes cenários, que vão desde escalas inferiores ao milímetro até a digitalização de grandes cenários, dependendo do tipo de sensor empregado. Esta ampla variedade permite que resultados ótimos sejam alcançados com uma relação custo-benefício atraente para diferentes aplicações, tais como levantamento de informações geodésicas e florestais [37] e preservação de patrimônio histórico [38]. Um exemplo recente de aplicação nesse contexto e demonstração de sua importância foi a digitalização da catedral de *Notre Dame* de

Paris realizada em 2015. Os dados adquiridos estão possibilitando uma restauração minuciosa após o incêndio ocorrido em 2019 [39].

Adicionalmente, a digitalização 3D vem sendo cada vez mais aplicada a medições antropométricas [40] e aplicações relacionadas à medicina, onde é possível digitalizar órgãos e estruturas fazendo uso de tomografia computadorizada e ressonância magnética, permitindo posterior manipulação por médicos e cirurgiões objetivando planejar e executar procedimentos cirúrgicos [41].

O presente capítulo apresenta uma classificação das técnicas de digitalização tridimensional atualmente existentes e dá ênfase às técnicas que podem ser aplicadas para a medição de traumas em ensaios de coletes balísticos, bem como aborda algumas limitações destes equipamentos.

3.1. Classificação Geral

A digitalização tridimensional é uma área de estudo que recebeu considerável atenção nos últimos 30 anos e que ao longo desse período foi sendo desenvolvida com a contribuição de diversas técnicas das áreas de visão computacional, processamento de imagens, modelagem geométrica e computação gráfica [42].

Este esforço dispendido colaborou não só para o desenvolvimento de novos métodos de aquisição, como também contribuiu para o surgimento e a melhoria de técnicas de processamento das digitalizações obtidas.

Neste contexto, visando sintetizar a abrangência dos métodos de digitalização, uma classificação geral (Figura 22) foi elaborada com base em trabalhos anteriores [42–45]. Nesta classificação, nota-se que houve a divisão das técnicas de digitalização em ativas e passivas, no que diz respeito à interação com o objeto a ser digitalizado, podendo esta interação ser por toque ou projeção de algum tipo de luz (radiação) sobre ele.

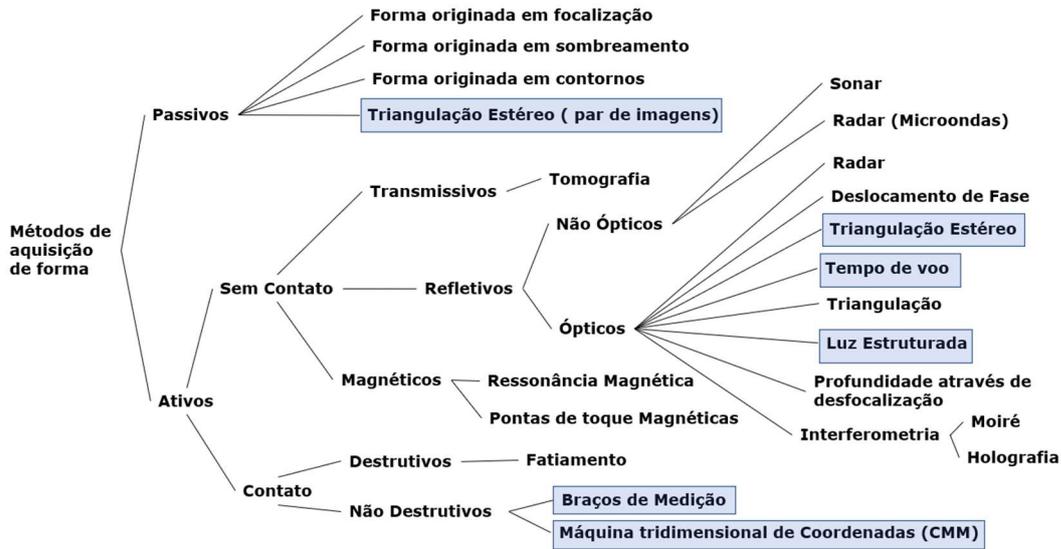


Figura 22 – Classificação geral de métodos de digitalização, com técnicas relevantes para este trabalho em destaque. Fonte: adaptado de [42,44,46]

Dentre os métodos apresentados na Figura 22, encontram-se em destaque aqueles que possuem relevância para esta pesquisa de mestrado e que por esse motivo serão detalhados a seguir.

3.2. Métodos Passivos

Curless [46,47] define os métodos ópticos passivos como sendo aqueles em que não existe interação com o objeto, ou seja, são baseados na imagem (aparência) de um objeto fazendo uso de iluminação ambiente ou difusa [43]. Para esta metodologia são em geral utilizadas uma ou duas câmeras para captura das imagens em pontos fixos ou com movimentação ao redor do objeto.

Desta forma, os métodos ópticos passivos apresentam duas principais variáveis a serem estudadas e otimizadas: (i) a iluminação da cena; e (ii) parâmetros fotográficos como, por exemplo, exposição e abertura.

3.2.1 Triangulação Estéreo (Par de Imagens)

Este sistema de aquisição é composto geralmente por um par de câmeras que realizam a aquisição de imagens de um mesmo objeto sob diferentes perspectivas, assim como realizado pela visão humana, motivo pelo qual denomina-se estéreo (Figura 23). A distância entre as duas câmeras (linha de base) é conhecida, sendo responsável por determinar qual a resolução do equipamento no que diz respeito à profundidade de campo [48].

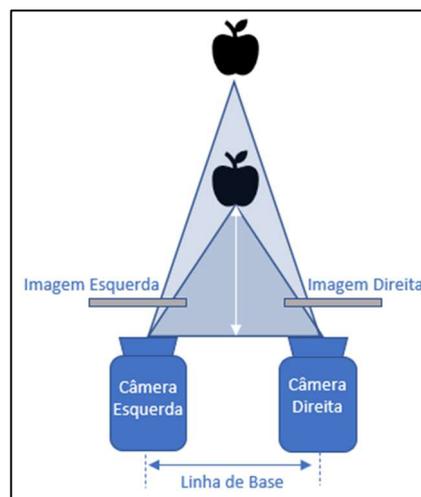


Figura 23 – Triangulação estéreo. Fonte : Adaptado de [49]

O resultado da digitalização é definido pela qualidade das imagens adquiridas, nitidez, contraste e principalmente pela capacidade do algoritmo em realizar o processamento e encontrar pontos comuns nas duas imagens [43], problema conhecido em visão computacional como correspondência (do inglês: *Stereo Matching*) [48].

Na Figura 24 (a) é possível observar que, para duas imagens tomadas de pontos diferentes da *Catedral de Notre Dame*, a correspondência não foi satisfatória e, conseqüentemente, o número de pontos extraídos é baixo. Na Figura 24(b), a solução foi otimizada por J. Lin [50] e, assim, foi possível estabelecer correspondência entre um número maior de pontos.

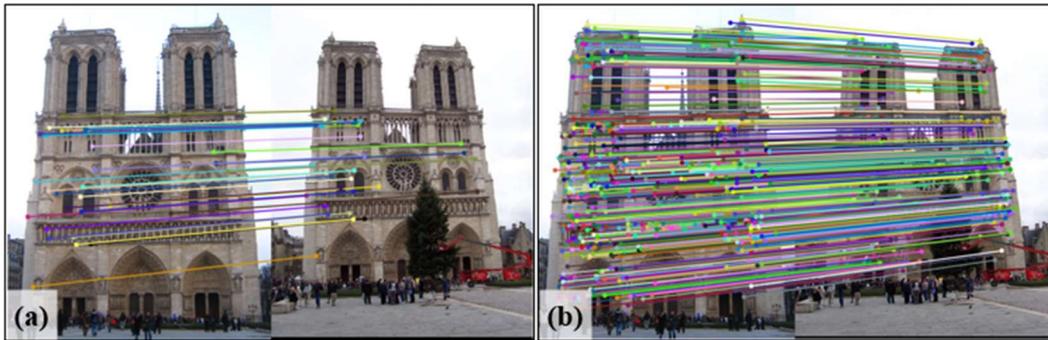


Figura 24 – Triangulação estéreo. (a) Correspondência entre mesmos pontos. Fonte: Adaptado de [51] e; (b) Correspondência otimizada. Fonte: Adaptado de [50]

Esta técnica de digitalização é também conhecida por reconstrução 3D e pode utilizar duas ou mais imagens, sendo amplamente conhecida e relatada na literatura [52]. Além disso, pode ser considerada a precursora de outras técnicas similares como, por exemplo, a fotogrametria, que faz uso de muitas imagens de um mesmo objeto para reconstruí-lo tridimensionalmente [48,53], e também a técnica de correlação digital de imagens (do inglês: *Digital Image Correlation - DIC*) que, em linhas gerais, digitaliza tridimensionalmente um objeto ao longo do tempo, sendo muito utilizada para medição de deformações bi e tridimensionais de materiais [54].

3.3. Métodos Ativos

Estes métodos podem ser classificados em: com contato e sem contato.

Métodos com contato fazem uso de algum tipo de instrumento de apalpação que, ao tocar uma superfície em um ponto específico, estabelece o seu posicionamento.

Nos sistemas sem contato existe a irradiação de luz nos espectros visível ou invisível, radiação ou algum tipo de energia sobre a superfície [55]. Os equipamentos que fazem uso dos métodos ativos sem contato são em geral capazes de detectar quantidades de luz (energia) refletida ou absorvida e então atribuir coordenadas tridimensionais a alguns pontos do objeto.

Equipamentos como ressonância magnética e tomografia computadorizada utilizam métodos classificados como ativos, pois também existe irradiação de energia e verificação de absorção ou reflexão, e desta forma tais instrumentos

poderiam perfeitamente ser classificados como instrumentos ópticos ativos. Em virtude da não utilização de luz nos espectros visível e invisível, optou-se por mantê-los em grupos distintos (Figura 22) assim como fizeram trabalhos anteriores [42,44–46].

3.3.1. Triangulação Estéreo Ativa (Par de Imagens)

A grande diferença entre os processos de triangulação estéreo passiva e ativa consiste na utilização de projetores de luz para este último caso (Figura 25). A projeção de um padrão luminoso sobre o objeto, geralmente na forma matricial, aumenta a correspondência de pontos comuns entre duas imagens [56], principalmente para digitalizações de superfícies.

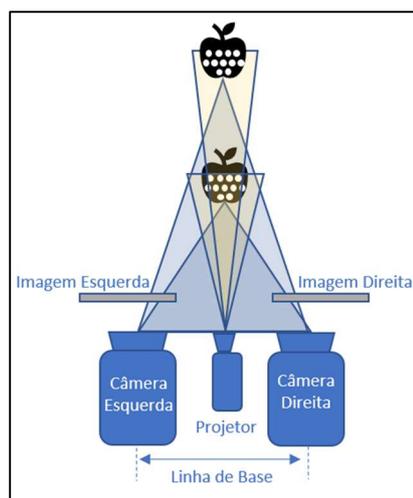


Figura 25 – Triangulação estéreo ativa. Fonte : Adaptado de [49]

Na Figura 25 é possível observar que, para determinado equipamento, limitações de distância estão relacionadas ao sistema óptico e também à potência do projetor.

3.3.2. Tempo de voo

Também conhecidos como *scanners* de alcance (do inglês: *range scanners*), são sistemas de aquisição e equipamentos que utilizam por princípio de funcionamento a emissão de pulsos luminosos, estimando a distância com base no

tempo que a luz refletida demora a retornar (Figura 26). Por esse motivo necessitam que medições de tempo sejam realizadas com grande exatidão [6].

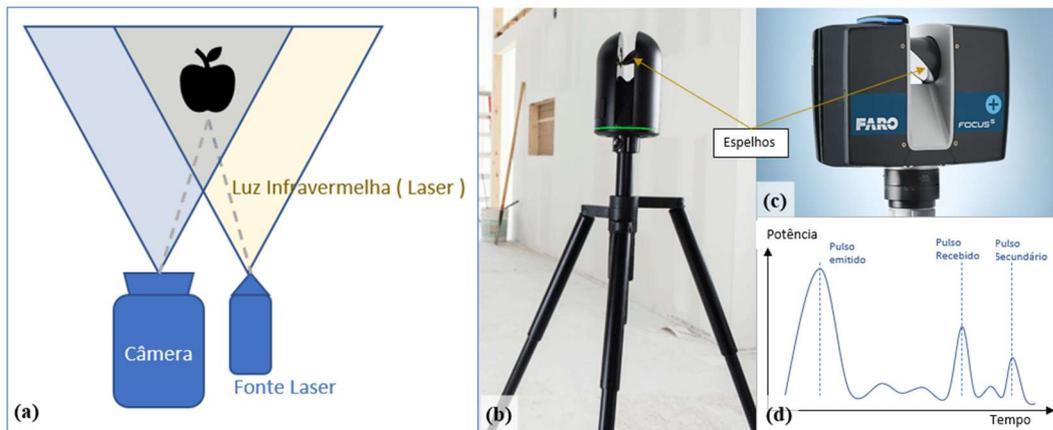


Figura 26 – Scanner 3D de tempo de voo: (a) Princípio de funcionamento. Fonte: Adaptado de [49]; (b) Scanner Leica BLK 360. Fonte: Adaptado de [57]; (c) Scanner Faro Focus. Fonte: Adaptado de [58] e; (d) Cálculo da distância com base no tempo entre emissão e recepção de pulsos luminosos. Fonte: Adaptado de [59]

Quantidades significativas de dados são adquiridas por meio da oscilação da fonte laser utilizando servomotores e também conjuntos de espelhos rotativos, como é possível observar na Figura 26. A utilização dos valores adquiridos de distância e posições angulares do laser e do espelho no momento da aquisição permite que sejam atribuídas coordenadas tridimensionais a cada ponto amostrado [47].

Equipamentos com essas características são empregados atualmente para digitalizações a médias distâncias (10 m a 300 m), principalmente devido à utilização de laser que, além de apresentar pouca perda de potência nessas distâncias, possui um espectro de radiação imune a interferências diversas [47].

Desta forma, é possível digitalizar grandes ambientes, áreas externas e também monumentos com grande rapidez [39,59].

3.3.3. Luz Estruturada

Estes equipamentos são caracterizados por possuírem como princípio de funcionamento a projeção de padrões luminosos ou estruturas sobre determinado objeto e posterior captura de imagens com os mesmos padrões com algum tipo de distorção [36]. Com estas informações é possível obter a geometria digitalizada do

objeto. O princípio de funcionamento é utilizado atualmente por meio de duas diferentes abordagens, como é possível observar na Figura 27:

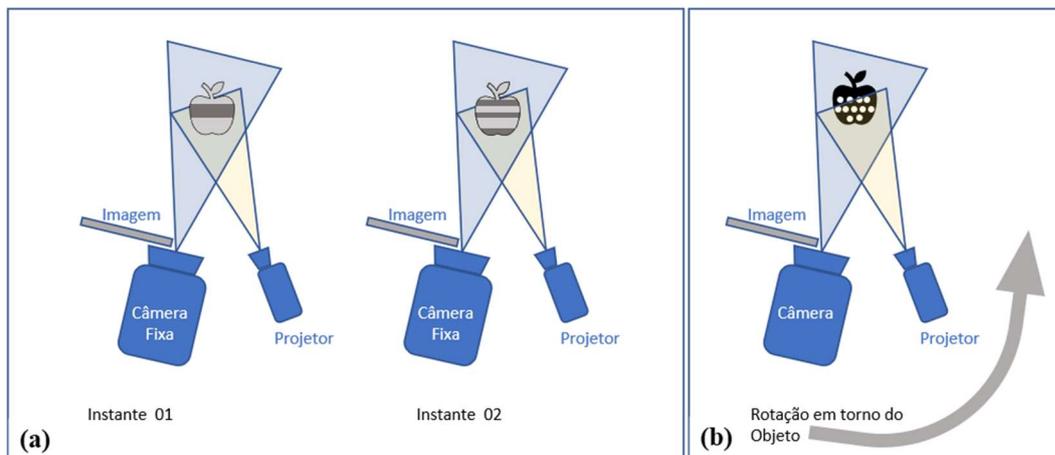


Figura 27 – *Scanner* de luz estruturada: (a) Câmera fixa e variação de padrões luminosos sobre objeto e; (b) Rotação da câmera ao redor do objeto com mesmo padrão luminoso. Fonte: Adaptado de [49]

Na Figura 27a é possível observar que a câmera está estática e ocorre variação dos padrões luminosos. Já na Figura 27b, os padrões luminosos são fixos e ocorre movimentação ao redor do objeto. Nesta abordagem, é possível digitalizar maiores porções do objeto e a deformação de uma mesma projeção luminosa vista sob diferentes posicionamentos permite a realização da digitalização. Somado a isso, diversas imagens são coletadas por uma câmera em posicionamentos diferentes, possibilitando a visualização de um mesmo ponto do objeto sob diferentes ângulos [60].

Um exemplo de equipamento que utiliza este princípio de funcionamento é o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* (Figura 28a) [7]. Detalhes como a disposição central da câmera, presença de projetor de luz infravermelha e dois sensores infravermelhos localizados na parte superior do equipamento podem ser observados na Figura 28b. Em particular, a projeção de pontos sobre uma determinada superfície está exemplificada na Figura 28c, projeção esta que foi obtida com o auxílio de uma câmera de visão noturna, que intensifica imagens captadas no espectro do infravermelho.

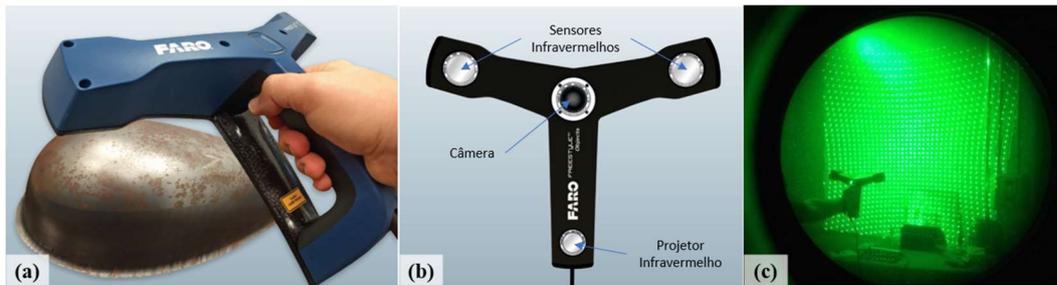


Figura 28 – Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects (a) Vista do equipamento. Fonte: Adaptado de [7]; (b) Posicionamento de sensores, câmera e projetor [7] e; (c) Projeção de padrão infravermelho pelo Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects, visto com auxílio de câmera de visão noturna

De uma maneira geral, os equipamentos de digitalização 3D que fazem uso deste princípio de funcionamento possuem distância de digitalização limitada (do inglês: *Standoff distance*) devido à limitação da energia emitida pela fonte luminosa e distâncias focais das câmeras [61]. Lachat et al. [62] realizaram algumas investigações utilizando outra versão do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D}*, e observaram um aumento da incerteza das dimensões do objeto digitalizado à medida em que se aumenta a distância em relação a ele.

Adicionalmente, por se tratar de sistema óptico, é necessário realizar a chamada calibração⁴ [63] do sistema em distâncias conhecidas, para que os erros no momento da digitalização sejam diminuídos e o sistema possua parâmetros para cálculo das distâncias e representação correta em nuvem de pontos. A seguir será apresentada a formulação matemática e demonstrada a importância do processo de calibração destes equipamentos.

3.3.3.1. Formulação matemática para scanners de luz estruturada

Algumas técnicas de digitalização fazem uso de triangulação para localizar pontos no espaço tridimensional e gerar nuvem de pontos. Os *scanners* de luz estruturada fazem uso desta metodologia e também da deformação dos padrões luminosos projetados, percebida por uma câmera deslocada em relação ao projetor luminoso, de forma a estabelecer a correspondência entre os pontos projetados e os capturados pela câmera, permitindo a posterior solução de sistemas lineares [36,64].

⁴ “Calibração” para sistemas ou equipamentos de digitalização tridimensional costuma significar o mesmo que “ajuste” no contexto metrológico[63]. Para manter coerência com a literatura, o termo foi mantido e empregado com o mesmo significado.

Tio et al. [65] e Batlle et al. [60] oferecem a formulação matemática simplificada descrita a seguir, que permite obter uma boa compreensão do processo.

Na Figura 29, observa-se um sistema de coordenadas definido como global, posicionado no plano γ , cuja origem é o ponto O.

Definido este sistema global tem-se:

- Ponto focal da imagem capturada localizado em: $F_1 = (0,0, f_1)^t$
- Ponto no objeto a ser digitalizado: $P_0 = (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0})^t$
- Ponto correspondente localizado no plano γ : $P_1 = (x_{p1}, y_{p1}, 0)^t$

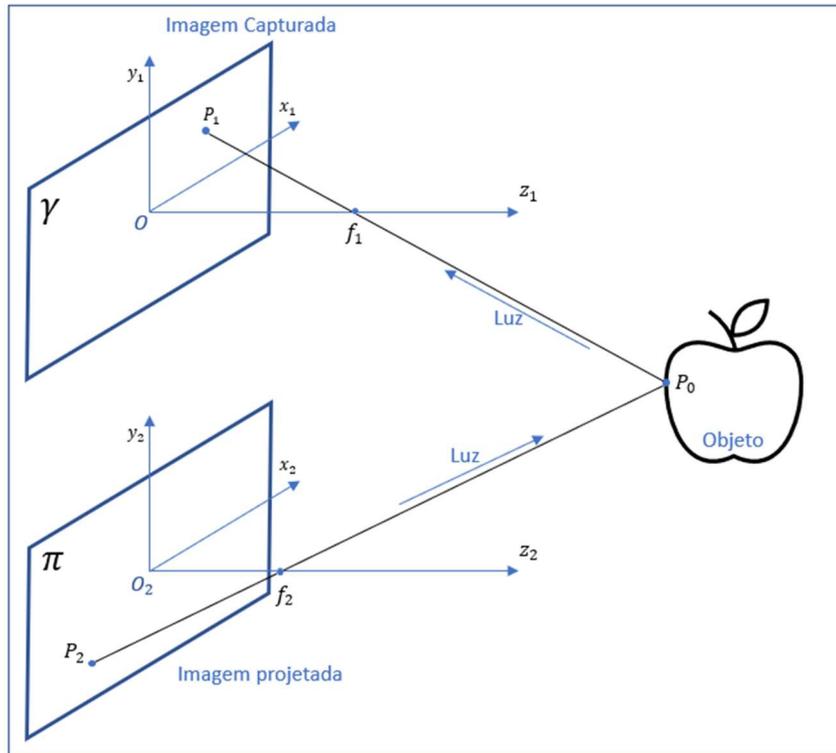


Figura 29 – Aquisição de informações tridimensionais para sistemas de luz estruturada.
Fonte: Adaptado de [60]

Considerando que uma reta entre P_1 e f_1 seja traçada, o seu prolongamento passará também por P_0 e a seguinte equação pode ser definida:

$$P_1 = F_1 + \alpha(P_0 - F_1). \quad (1)$$

Matricialmente,

$$\begin{bmatrix} x_{p1} \\ y_{p1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} x_{p0} \\ y_{p0} \\ z_{p0} - f_1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Assumindo um segundo plano π que possui um sistema de coordenadas centrado em O_2 e com mesma orientação do primeiro sistema, ter-se-á neste sistema:

$$O_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ e } F_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_2 \end{bmatrix}.$$

Fazendo a mudança de coordenadas para o sistema de coordenadas global, tem-se:

$$O_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

e o ponto focal do segundo sistema é

$$F_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 + f_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Considerando que o ponto P_1 foi projetado pelo segundo sistema de imagens, P_2 será escrito no sistema de coordenadas global como:

$$P_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{p2} \\ y_{p2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 + x_{p2} \\ y_2 + y_{p2} \\ z_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Assumindo que o mesmo ponto P_o foi considerado pelos dois sistemas de imagens,

$$P_2 = F_2 + \beta(P_o - F_2). \quad (6)$$

Na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} x_2 + x_{p2} \\ y_2 + y_{p2} \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 + f_2 \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} x_{p0} - x_2 \\ y_{p0} - y_2 \\ z_{p0} - z_2 - f_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Realizando operações algébricas nas equações de (2) a (7) ter-se-á para os pontos do objeto:

$$x_{p0} = \frac{f_1 - z_{p0}}{f_1} x_{p1}, \quad (8)$$

$$y_{p0} = \frac{f_1 - z_{p0}}{f_1} y_{p1}, \quad (9)$$

$$x_{p0} = x_2 + \frac{f_2 + z_2 - z_{p0}}{f_2} x_{p2} \text{ e} \quad (10)$$

$$y_{p0} = y_2 + \frac{f_2 + z_2 - z_{p0}}{f_2} y_{p2}. \quad (11)$$

Igualando (8) com (10) e (9) com (11), obtêm-se:

$$\frac{f_1 - z_{p0}}{f_1} x_{p1} = x_2 + \frac{f_2 + z_2 - z_{p0}}{f_2} x_{p2} \text{ e} \quad (12)$$

$$\frac{f_1 - z_{p0}}{f_1} y_{p1} = y_2 + \frac{f_2 + z_2 - z_{p0}}{f_2} y_{p2}. \quad (13)$$

Isolando z_{p0} nas equações (12) e (13), obtêm-se:

$$z_{p0} = \frac{f_1 f_2}{f_1 x_{p2} - f_2 x_{p1}} \left(x_2 + x_{p2} - x_{p1} + \frac{z_2 x_{p2}}{f_2} \right) \text{ e} \quad (14)$$

$$z_{p0} = \frac{f_1 f_2}{f_1 y_{p2} - f_2 y_{p1}} \left(y_2 + y_{p2} - y_{p1} + \frac{z_2 y_{p2}}{f_2} \right). \quad (15)$$

Como salientado por [60], x_{p0} , y_{p0} e z_{p0} , que são pontos do objeto no sistema de coordenadas global, podem ser calculados pelo conhecimento dos valores (x_{p1}, y_{p1}) e (x_{p2}, y_{p2}) , pontos capturados e projetados respectivamente.

A importância do processo de calibração do conjunto câmera e projetor (Figura 30) consiste na determinação dos valores f_1, f_2, x_2, y_2 e também z_2 , em uma etapa prévia à digitalização, sob pena de calcular erroneamente os pontos digitalizados do objeto [36].

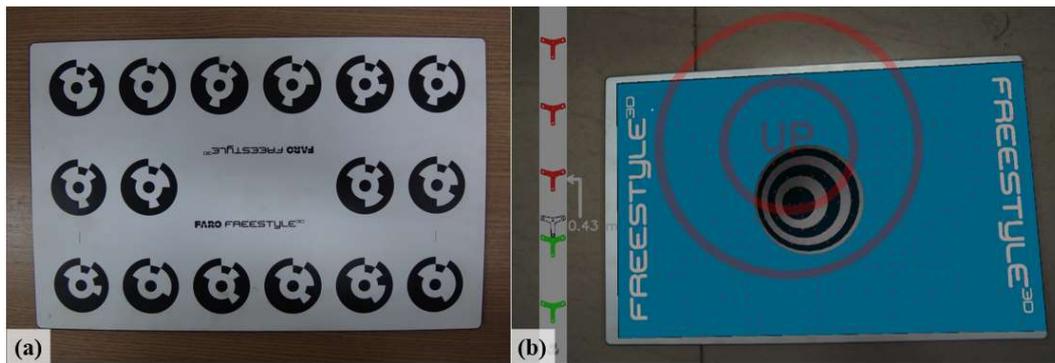


Figura 30 – Calibração do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*: (a) Placa de calibração e; (b) Processo de digitalização em andamento

A formulação matemática descrita acima representa o processo de digitalização de um único ponto. Os equipamentos existentes atualmente executam processos semelhantes e algumas vezes otimizados para captura e processamento de milhares de pontos simultaneamente [6].

A adoção de luz estruturada facilita e simplifica o problema da correspondência entre pontos do objeto e da imagem capturada [36,60], sendo que em algumas aplicações, como é o caso do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*, existem sensores de medição inercial (do inglês: *Inertial Measurement Unit- IMU*) que auxiliam no posicionamento de cada imagem capturada em relação ao sistema de coordenadas global.

3.3.4. Braço de medição por Coordenadas (AACMM)

Este equipamento também é conhecido como *Articulated Arm Coordinate Measuring Machine (AACMM)* e tem sido adotado em muitas situações onde se deseja elevado nível de confiabilidade e incerteza da ordem de micrometros [66], sendo economicamente mais vantajoso do que máquinas tridimensionais de coordenadas para determinadas aplicações. A facilidade de manuseio e realização de medições torna o equipamento uma solução ideal para metrologia em espaços reduzidos e também de difícil acesso [67]. Alguns fabricantes como FARO (Figura 31) e Hexagon fornecem soluções de medição onde ocorre integração de uma ponta de apalpação com um braço de medição [66,68].

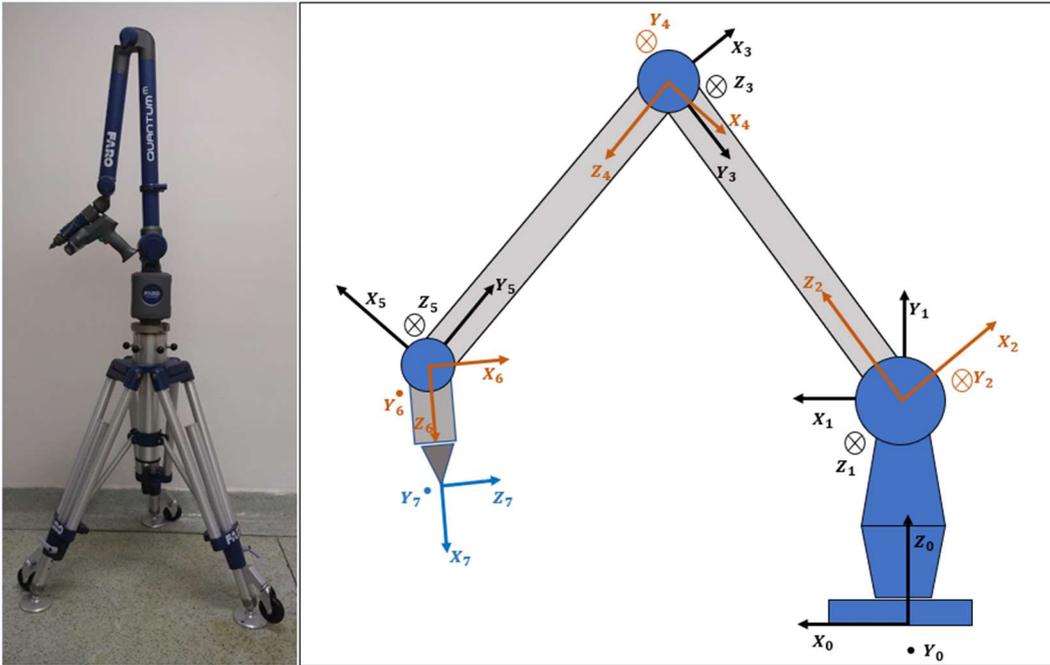


Figura 31 – Braço de medição FARO Quantum^M FaroArm: (a) Vista do equipamento. e; (b) Sistemas de coordenadas atribuídas a cada grau de liberdade do braço de medição. Fonte: Adaptado de [67]

A Figura 31b apresenta os diversos sistemas de coordenadas atribuídos a cada junta de rotação do equipamento (X_i, Y_i, Z_i). Seu funcionamento se baseia no toque de uma superfície, atribuição de coordenadas locais de origem $O_7 = (X_7, Y_7, Z_7)$ e realização de transformações para que o ponto seja representado no sistema de coordenadas global cuja origem é : $O_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ [67].

Na Figura 32a pode-se observar um exemplo de digitalização de objeto utilizando o AACMM. A adoção conjunta de um *software* como o *Polyworks*TM (Figura 32b) permite a integração com o equipamento, rápida aquisição e representação em tempo real dos pontos digitalizados (Figura 32c).

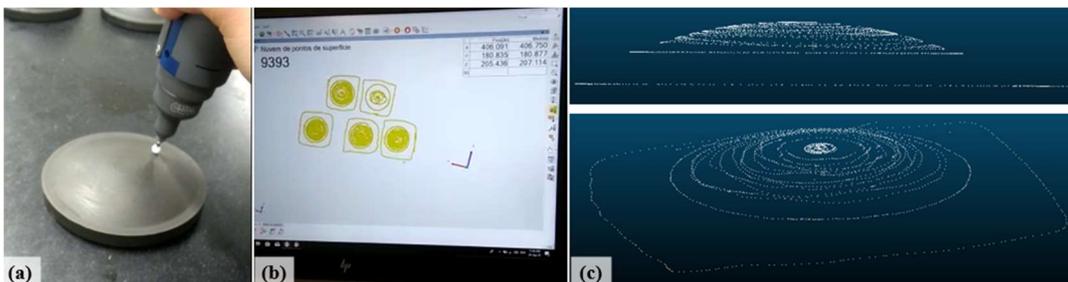


Figura 32 – Digitalização de objeto utilizando Braço de medição por contato: (a) Apalpação manual de objeto de interesse; (b) Pontos medidos sendo mostrados em tempo real por meio do *software* PoliworksTM e; (c) Resultado da digitalização apresentado em nuvem de pontos sob duas perspectivas

Considerando a adoção crescente desta solução pelo mercado e diversos laboratórios nos últimos 20 anos, começou a haver uma preocupação com a disponibilidade de normas para estes equipamentos e, no período entre 2004 e 2012, foram elaboradas as seguintes normas: ASME B89.4.22-2004, VDI *guideline* 2617 9:2009 e ISO 10360-12. As normas apresentam procedimentos para avaliar a capacidade de medição utilizando objetos de referência [67]. Entretanto, as normas têm apresentado algumas deficiências que não levam em consideração, por exemplo, o uso pelo operador e cuidados que este deve ter com o manuseio deste equipamento [67,69].

3.3.5. Máquina Tridimensional de Coordenadas

Máquinas tridimensionais de coordenadas (Figura 33) são amplamente conhecidas e empregadas para inspeção de diversos tipos de componentes na indústria de manufatura [70].



Figura 33 – Exemplo de Máquina tridimensional de Coordenadas. Fonte: Adaptado de [71]

Também conhecidos como *scanners* tridimensionais de contato, estes sistemas mecânicos fazem uso de uma ponta de apalpação para determinar

coordenadas no objeto de interesse e basicamente são compostos de estrutura principal, sistema de toque, sistema de controle e *software* de medição [72].

Por meio do deslocamento da ponta de apalpação e à medida que esta toca a superfície de um objeto, as coordenadas X, Y e Z são registradas através do posicionamento de cada eixo mecânico do equipamento e armazenadas. O resultado final é uma nuvem de pontos que pode servir para inúmeras finalidades, dentre elas a conferência de dimensões geométricas e tolerâncias de peças mecânicas [64].

Devido ao fato da medição ser realizada estaticamente, ter aspecto construtivo robusto e livre de vibrações [44], e utilizar sensores com elevada sensibilidade e resolução, as medições realizadas com este tipo de equipamento atingem incertezas da ordem de alguns micrometros [71], motivo pelo qual os valores oriundos das medições destes equipamentos são considerados muitas vezes como sendo valores de referência.

Apesar da grande exatidão, apresentam como principais pontos negativos:

- Custo elevado e baixa velocidade de digitalização [73];
- Não são indicadas para superfícies e materiais frágeis ou facilmente deformáveis, pois o equipamento necessita realizar o contato com a superfície para executar a medição [46];
- Dificuldade de medição ou amostragem de arestas em peças [70]; e
- Necessidade de manutenção e inspeções regulares para manter o perfeito funcionamento do equipamento [64].

Com o objetivo de automatizar as medições realizadas, algumas máquinas tridimensionais de coordenadas têm adicionado *scanners* ópticos que são utilizados em conjunto com a ponta de apalpação[70], permitindo a realização de varredura e construção de nuvem de pontos anterior à digitalização por toque. Assim, o *software* do equipamento pode realizar algum tipo de otimização para a medição ser realizada com maior exatidão e eficiência.

A utilização dos dois sensores em um mesmo sistema de medição pode ser utilizada para caracterização de um objeto com grande quantidade de pontos e permite elevada exatidão, onde dados adquiridos pelo *scanner* óptico são corrigidos ao tomar por referência os dados obtidos por meio de toque. Colosimo et al. [74]

apresentaram uma metodologia para fusão de dados utilizando processos gaussianos onde esta abordagem é empregada.

3.4. Incertezas de medição e principais limitações dos scanners ópticos tridimensionais

Incertezas relacionadas ao ruído dos *scanners* tridimensionais foram inicialmente identificadas por Hébert et al. [75], que buscavam realizar ajuste de formas geométricas às nuvens de pontos obtidas por meio dos referidos equipamentos. Para isso, os autores realizaram a modelagem do ruído como sendo gaussiano e dependente do ângulo de digitalização e também da distância em relação ao objeto. Rutishauser et al. [76] utilizaram uma abordagem semelhante para modelar os erros e trabalharam para redução das incertezas utilizando filtro de Kalman.

A Figura 34 apresenta a modelagem assumida por [75,76] para digitalizações realizadas por *scanners* tridimensionais. Os conjuntos de dados adquiridos de duas digitalizações estão destacados com diferentes cores, sendo possível observar que os elipsóides estão alinhados com a direção de aquisição. A situação ideal seria a digitalização em uma direção normal à superfície, respeitando uma determinada distância ótima. Tais medidas podem diminuir consideravelmente as incertezas da localização real do ponto digitalizado [6,44,76].

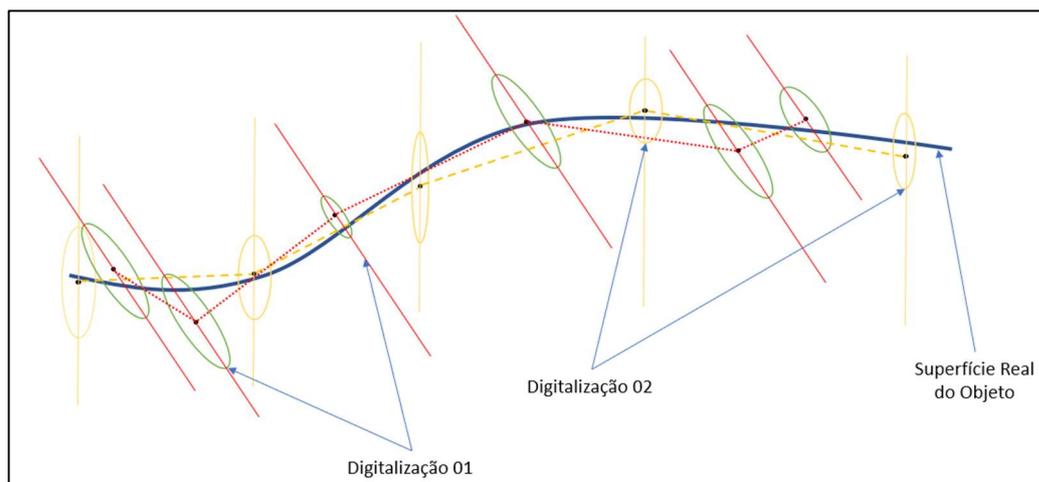


Figura 34 – Modelo Probabilístico para erros da digitalização, indicando duas diferentes digitalizações, seus erros e direção de aquisição de dados. Fonte: Adaptado de [76]

Beraldin et al. [77] elencaram algumas fontes de incerteza de medição na utilização de instrumentos de digitalização tridimensional, conforme pode ser visto na Figura 35.

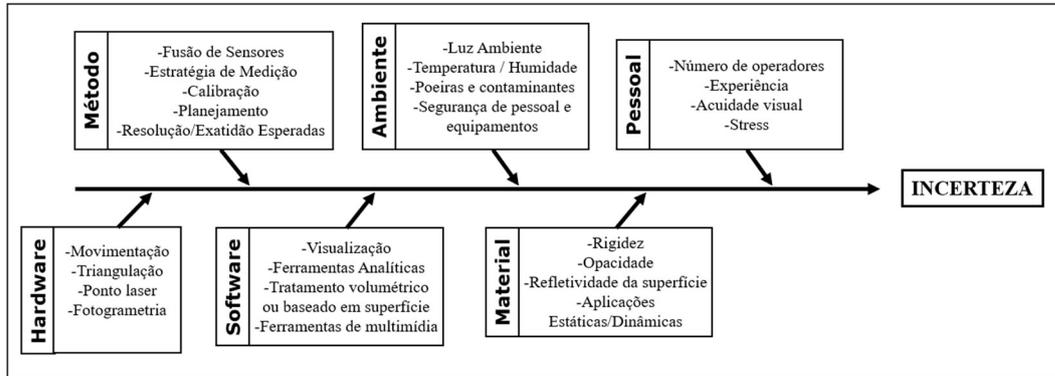


Figura 35 – Diversas causas para incerteza nos sistemas ópticos tridimensionais.
Fonte: Adaptado de [77]

Para a maioria das aplicações, as fontes de incerteza que mais influenciam certamente dizem respeito ao aspecto construtivo do equipamento e princípios de funcionamento empregados (*hardware*) e às ferramentas para posterior visualização e tratamento das informações (*software*) [77].

Outro aspecto extremamente relevante para uma boa aquisição de dados está relacionado à opacidade/refletividade do material. A associação destas características ao posicionamento do *Scanner* pode contribuir para a ocorrência de maior ou menor número de ruídos e *outliers* em uma nuvem de pontos, podendo deteriorar o aspecto e a qualidade das informações [44,78].

Erros sistemáticos nestes equipamentos foram observados por alguns autores e podem aumentar em alguns casos, como por exemplo na digitalização de um objeto com muitas descontinuidades, cantos proeminentes ou no caso de digitalização contra superfície de alto contraste [77–79].

Adicionalmente, estes instrumentos possuem algumas limitações inerentes aos princípios que utilizam para seu funcionamento, ao manuseio e também ao tipo de material que se deseja digitalizar.

Oclusões na linha de visão dos equipamentos e digitalização de grandes objetos geram a necessidade de múltiplas varreduras para completa caracterização destes, o que pode gerar inúmeros erros na união das partes digitalizadas [44,64,80].

Além disso, dependendo do tipo de *scanner* empregado, manuseio do operador e da superfície do objeto, podem ocorrer desalinhamentos entre porções de uma mesma digitalização, o que acaba por gerar nuvens de pontos com objetos inexistentes na cena original (*ghost geometry*) [80], o que muitas vezes inutiliza a nuvem de pontos ou exige cuidados adicionais no tratamento dos dados.

Desse modo, considerando que o funcionamento da maioria dos *scanners* ópticos se baseia na emissão de pulsos e pontos luminosos, interferências do ambiente podem influenciar na resolução, exatidão e alcance de utilização [82]. Inclusive, por se tratar de radiação eletromagnética, as fontes de interferência são algumas vezes de difícil identificação, o que deve gerar preocupação constante do usuário do *scanner* em calibrar e verificar as informações extraídas de seu equipamento.

Em suma, o custo relativamente elevado destes instrumentos, principalmente para aplicações que necessitam de elevado grau de exatidão [80], torna a aplicação impeditiva para laboratórios de metrologia em geral.

Uma tendência é que o custo passe a diminuir, tendo em vista a disseminação da tecnologia em *smartphones* como o *iPhone XR* e *iPhone12 Pro*, que possuem projetores de luz infravermelha para reconhecimento facial e otimização de parâmetros fotográficos. Por meio de aplicativos, tais *smartphones* já podem ser utilizados para digitalizações de objetos, entretanto esta aplicação é pouco conhecida e disseminada ao público em geral [82–84].

4 Nuvens de Pontos

A obtenção de modelos matemáticos que representem objetos de interesse com elevada fidelidade constitui o principal objetivo dos equipamentos de digitalização 3D.

Existe uma grande quantidade de maneiras pelas quais pode ser representado um objeto 3D, dentre as quais podem ser citadas: malhas; representações paramétricas, como é o caso do formato de arquivos .STL, .OBJ e .3MF [85]; e ainda nuvens de pontos. Esta última pode ser considerada a mais adequada para digitalizações 3D, pois cada ponto é resultado de algum tipo de amostragem realizado pelos equipamentos de digitalização [86,87].

A representação destes pontos é feita por suas coordenadas cartesianas (x,y,z) , tornando a representação do objeto mais simples em termos computacionais, possibilitando refinamentos e tratamento das informações de interesse, como pode ser visto na Figura 36 [86].

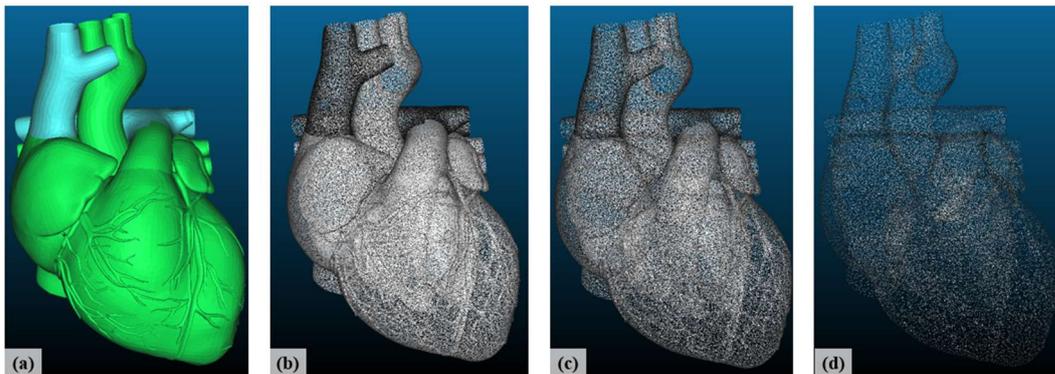


Figura 36 – (a) Modelo digital do coração humano (formato de arquivo .STL); (b) Nuvens de pontos com 1000000 pontos; (c) 500000 pontos e (d) 100000 pontos

A utilização de nuvens de pontos nas áreas médica e de engenharia já vem sendo realizada há mais de 30 anos em aplicações que vão desde diagnósticos de doenças e realização de procedimentos cirúrgicos até sensoriamento remoto e cartografia [88,89].

Recentemente, ocorreu uma popularização de Scanners Ópticos tridimensionais na indústria e também de sensores capazes de perceber profundidades (*depth sensors*) em um ambiente mapeando-o tridimensionalmente, como é o caso do Sensor *Kinect* das empresas *Microsoft e PrimeSense*, desenvolvido em 2010 [90] e também do sensor *Intel D415* [84].

Aplicações em robótica, navegação e direção autônoma têm sido objetos de pesquisa com consideráveis avanços. A integração destas áreas com inteligência artificial, *machine learning* e *deep learning* tem possibilitado o tratamento dos dados oriundos das digitalizações praticamente em tempo real [84,91].

Este conjunto crescente de aplicações e sensores tem gerado ainda mais necessidade de pesquisa nas áreas relacionadas à visão computacional e nuvem de pontos. Iniciativas como *The Point Cloud Library (PCL)*, que constitui uma grande biblioteca de código aberto para segmentação, alinhamento, reconstrução de superfície e filtragem de nuvens de pontos, têm possibilitado o acesso a algoritmos no estado da arte para estes tratamentos, considerando a complexidade crescente dos conjuntos de dados, ou mesmo a obtenção de resultados ótimos em ínfimos intervalos de tempo [92,93].

O presente capítulo busca apresentar conceitos utilizados atualmente e relacionados ao tratamento de nuvens de pontos, de maneira a facilitar a compreensão sobre os procedimentos a serem realizados mais adiante.

4.1. Definições e Conceitos

Nuvens de pontos podem ser consideradas representações diretas da geometria de determinado objeto e permitem que, com baixo custo computacional, sejam extraídas informações relevantes do objeto ou da cena em questão. A representação de superfícies ou objetos é realizada por meio da atribuição de coordenadas cartesianas (x,y,z) a cada ponto amostrado e, algumas vezes, a superfície pode ser descrita como um função do tipo $z = f(x, y)$ [86].

Desse modo, como resultado da digitalização de um objeto, são obtidas as coordenadas tridimensionais dos pontos que o compõem. Esse conjunto de pontos é denominado nuvem de pontos, cuja composição pode variar de milhares a bilhões de pontos [94] e que representa digitalmente o objeto de interesse, com maior ou

menor grau de exatidão e resolução, dependendo do equipamento e da técnica empregada [95].

Com isso, a visualização dos objetos representados em nuvens de pontos se torna possível por meio da utilização de *softwares* que tanto permitem a visualização dos pontos em um espaço tridimensional, como também fornecem ferramentas para tratamento e análise das informações oriundas destes conjuntos de dados. Alguns exemplos são: *Geomagic™*, *Polyworks™*, *Verisurf™* [64] e também outros não proprietários e de código aberto, como *CloudCompare* [96] e *MeshLab* [97].

Esta maneira de representar o espaço tridimensional ganhou aplicações crescentes em diversas áreas como acadêmica, engenharia, medicina e até entretenimento. Apesar de ser muito simples e versátil, impôs a necessidade de criação de metodologias e algoritmos para tratamento destes dados e extração de informações de interesse [86].

Uma das grandes desvantagens na utilização de nuvens de pontos consiste na desorganização das informações, uma vez que as coordenadas de cada ponto são geralmente tabuladas em arquivos que podem chegar a bilhões de linhas, sendo que linhas adjacentes não necessariamente representam pontos próximos [98].

Objetivando-se aplicações no tratamento de nuvens de pontos para esta pesquisa, serão apresentados a seguir alguns conceitos e algoritmos aplicáveis à extração das informações de interesse da digitalização de superfícies deformadas da plastilina em ensaios balísticos.

4.1.1. Segmentação e Classificação

Este processo consiste na divisão de uma nuvem de pontos em diversas nuvens menores ou extração de determinados objetos ou elementos de uma nuvem de pontos e pode ser realizada de maneira manual ou automática.

Várady et al. [44] definiram segmentação como sendo uma divisão lógica do conjunto de pontos obtidos por meio da digitalização em subconjuntos. Já a classificação é definida pelos autores como sendo a associação de determinado conjunto de dados a uma classe de objetos ou entes geométricos.

A automação dos processos de segmentação e classificação vem ganhando considerável relevância em virtude da complexidade crescente dos conjuntos de dados e tempo dispendido em segmentações manuais [99]. Conforme identificado por Nguyen et al. [100], a segmentação automática tem sido realizada por meio de duas abordagens: pela utilização de formas geométricas e funções matemáticas associadas e também pelo uso de técnicas de aprendizado de máquina (do inglês: *Machine Learning*).

Nuvens de pontos associadas a levantamentos topográficos [101], digitalizações de estruturas arquitetônicas [99,102] e adquiridas de sistemas autônomos [103,104] necessitam ser processadas, segmentadas e classificadas, principalmente para reconhecimento de objetos, regiões de interesse e otimização de processamento em tempo real, como é o caso de diversas aplicações em robótica e direção autônoma [105]. Na Figura 37 é possível observar esta aplicação, onde a metodologia e algoritmo proposto por Rummelhard et al. [106] permite a leitura e segmentação automática em tempo real, possibilitando ao sistema de navegação identificar pontos pertencentes ao chão e também aos obstáculos ao redor do veículo.

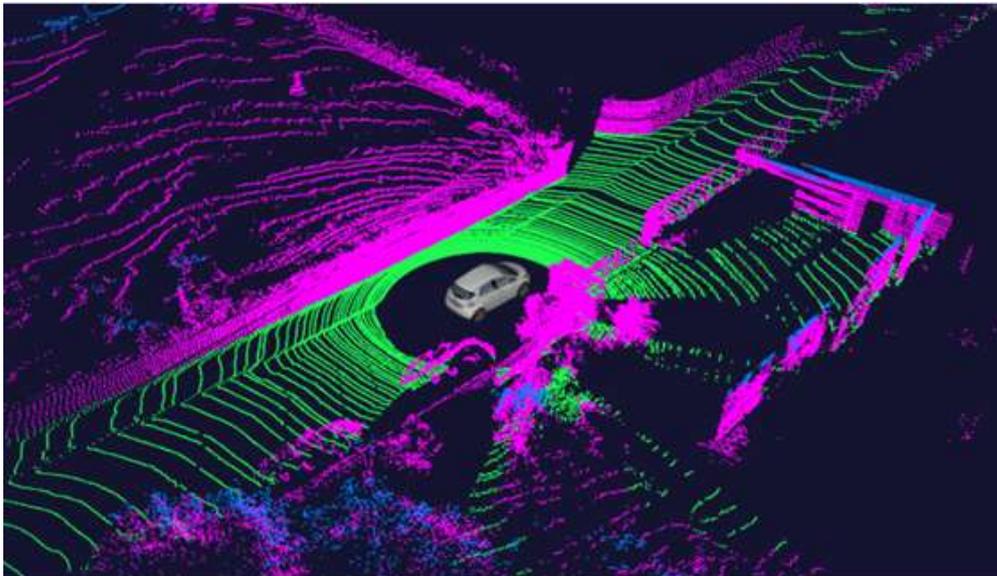


Figura 37 – Segmentação de nuvem de pontos realizada em tempo real para aplicações de veículos autônomos. Fonte: Adaptado de [106]

A Figura 38 apresenta uma classificação proposta por Nguyen et al. [100] para os métodos de segmentação de nuvens de pontos, que serve tanto para segmentação manual, quanto automática:



Figura 38 – Taxonomia dos métodos de segmentação de nuvens de pontos. Fonte: Adaptado de [100]

a) Métodos baseados em bordas de objetos

As bordas dos objetos são na maioria das vezes identificadas facilmente quando se deseja realizar a segmentação manual de determinada nuvem de pontos que seja de complexidade baixa. Nestes casos, a nuvem de pontos fornece informações visuais ao usuário, que apenas realiza a seleção dos pontos pertencentes a determinado objeto e os diferencia dos demais. Nos casos de segmentação automática, alguns algoritmos [107,108] podem realizar a segmentação de maneira eficiente.

b) Métodos baseados em regiões

Os métodos de segmentação baseados em regiões fazem uso de propriedades de determinado ponto ou de um conjunto de pontos, tais como normais e curvaturas, para que seja realizada a segmentação, e podem ser subdivididos em métodos de região semeada (do inglês: *seeded*) e não semeada (do inglês: *unseeded*).

Métodos de região semeada (*seeded*), como o proposto por [109], estabelecem um ou vários pontos de partida na nuvem de pontos e, a partir destes, inicia-se um processo iterativo de crescimento da região por meio da verificação de características comuns, até que estas deixem de ser observadas. Ao final do processo haverá a segmentação de algumas regiões dentro da nuvem de pontos [110].

O algoritmo *watershed* também é um bom exemplo desta metodologia, sendo muito utilizado atualmente para segmentação de imagens, podendo ser também empregado para segmentação de dados 2D ou 3D [101,111,112], principalmente nas áreas ligadas ao estudo topográfico, de rugosidades e imagens médicas [113].

Métodos de região não semeada se baseiam em abordagem inversa e iniciam o processo tomando todo o conjunto de dados. Caso determinada região apresente duas ou mais sub-regiões com características distintas, ocorre a segmentação e o processo ocorre até que toda a nuvem de pontos esteja segmentada [100].

c) Métodos baseados em atributos

Atributos de nuvens de pontos são determinadas características que todo o conjunto de dados possui ou que podem ser observadas localmente, tais como cores, geometria, refletância, normais locais e distâncias em relação a determinado objeto [86,94].

A utilização de atributos constitui ferramenta poderosa para segmentação de conjuntos de dados. Considerando que conjuntos de dados locais (*clusters*) tendem a apresentar características semelhantes entre si, fica facilitada a tarefa de identificação e separação de objetos e regiões, ainda que realizada manualmente [88,100].

Como principais pontos negativos podem ser mencionadas a dependência da caracterização precisa de atributos e dificuldades de correta segmentação em nuvens de pontos muito densas ou com mais de um atributo a ser identificado (*multidimensional attributes*) [100].

d) Métodos baseados em modelos

No que diz respeito aos métodos baseados em modelos, a metodologia *Random Sample Consensus (RANSAC)*, proposta inicialmente por Fischler e Bolles [114] em 1981, com aplicação original na correspondência de pontos comuns entre duas imagens e aperfeiçoada por Schnabel et al. [115], permite o reconhecimento de formas como esferas, planos, cilindros e cones em uma nuvem de pontos e possibilita a segmentação automática em subconjuntos com as mesmas características geométricas.

A intenção dos autores [115] foi criar uma metodologia robusta que pudesse ajustar um modelo matemático a dados com a presença de *outliers* de maneira otimizada, considerando o maior número possível de pontos/dados. Por esse motivo, o RANSAC é também considerado um método de detecção de *outliers*, podendo ser aplicado em dados bidimensionais ou tridimensionais.

O algoritmo funciona de acordo com os seguintes passos:

- i. Amostragem aleatória de pontos para ajuste do modelo;
- ii. Ajuste considerando os pontos amostrados;
- iii. Atribuição de pontos ao modelo ajustado considerando um limiar de distâncias pré-definidas (δ) e número de *inliers* presentes nas proximidades do modelo; e
- iv. Repetição dos passos anteriores e substituição do modelo ajustado caso a pontuação atribuída ao modelo seja superior ao anterior.

Na Figura 39 é possível visualizar a aplicação do algoritmo em um caso simples de ajuste de uma reta em um conjunto de pontos. Observa-se que os pontos vermelhos são selecionados aleatoriamente e que a pontuação (*score*) vai aumentando até que se encontre o melhor ajuste do modelo.

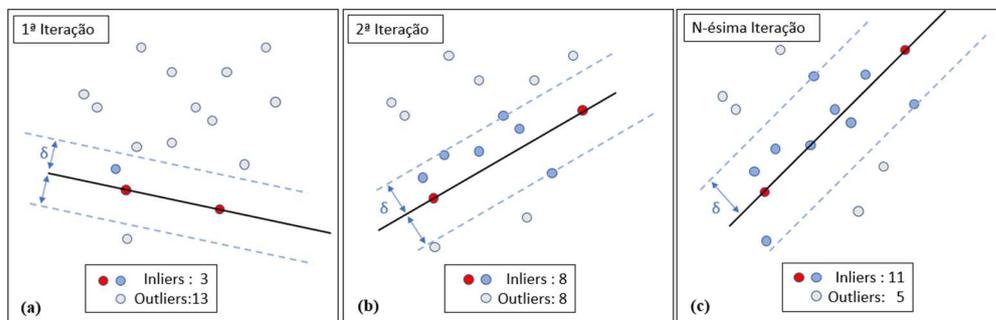


Figura 39 – Ajuste ótimo de reta utilizando o RANSAC: (a) 1ª Iteração; (b) 2ª Iteração e; (c) N-ésima Iteração. Fonte: Adaptado de [116]

Como o ajuste de modelos matemáticos deve considerar a quantidade mínima de pontos para que determinada forma geométrica bidimensional ou tridimensional possa ser gerada, o algoritmo trabalha com quantidade superior de pontos sem problema. No exemplo da Figura 39 foram considerados dois pontos para ajuste de uma reta, mas não haveria problema ao se considerar maior número de pontos. O ajuste de um plano implicaria em um número mínimo de 3 pontos e

de 4 pontos para uma esfera, sendo adotado o mesmo raciocínio do exemplo bidimensional.

A escolha de parâmetros para a aplicação desta metodologia é importante, tanto para otimizar resultados, como também para calcular o número de tentativas que determinado *software* realizará para encontrar o melhor modelo. A equação (16) permite calcular o número de tentativas T (iterações) necessárias para se obter o melhor ajuste com os parâmetros fornecidos:

$$T = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - e)^s)} \quad (16)$$

Na equação (16) são definidos previamente os seguintes parâmetros:

- s representa o número de amostras para ajuste do modelo;
- p é a probabilidade de que pelo menos uma das amostras seja livre de *outliers*; e
- e é a razão: *outliers*/número total de pontos da amostra, conhecida com base nos dados analisados.

A expressão para o número de tentativas permite que sejam otimizados os parâmetros envolvidos no ajuste realizado pelo algoritmo RANSAC e aplicações em tempo real podem ser implementadas com menor poder de processamento.

O *software CloudCompare* implementa a metodologia RANSAC por meio do algoritmo proposto por Schnabel et al. [115], que foi otimizado para detecção de planos, esferas, cilindros, cones e toroides. Vale ressaltar que, por meio deste *software*, o algoritmo será aplicado ao tratamento de algumas nuvens de pontos desta dissertação.

e) Métodos baseados em gráficos

Estes métodos apresentam boa capacidade de segmentação para nuvens de pontos com grande quantidade de pontos e complexidade. Baseiam-se na representação desse conjunto de dados e suas características por meio de gráficos [100].

A técnica denominada *feature point histogram* (FPH) é um exemplo da metodologia baseada em gráficos. Proposta e desenvolvida por RUSU [117–119], utiliza histogramas para identificar objetos em nuvens de pontos, podendo ser

utilizada desde finalidades de alinhamento entre duas ou mais nuvens de pontos até aplicações mais complexas, como classificação e segmentação automática [100].

Os métodos baseados em gráficos vêm ganhando popularidade e sendo cada vez mais aplicados em robótica [100] e *Deep Learning*. A esse respeito, Guo et al. [83] e Zhang et al. [91] elaboraram revisões de literatura recentes e abrangentes, nas quais boa parte das metodologias empregadas são baseadas em gráficos.

4.1.2. Alinhamento ou registro de faixa

Dependendo do equipamento empregado e do tamanho do objeto a ser digitalizado, são necessárias muitas leituras e conseqüentemente são geradas várias nuvens de pontos independentes de um mesmo objeto. Para a maioria das aplicações é necessário unificar todas as nuvens de pontos e colocá-las em um mesmo sistema de coordenadas [6].

O alinhamento ou registro (do inglês: *Range registration or alignment*) é um processo que consiste em posicionar todas as leituras do objeto sob o mesmo sistema de coordenadas, dado que em cada leitura do *scanner* houve a aplicação de um sistema de coordenadas diferente. Para cada leitura haverá a necessidade de aplicar transformações de coordenadas, como rotação e translação, visando unificar todo o sistema de coordenadas [120]. A unificação de todas as digitalizações realizadas costuma ser complexa por diversos motivos [6]:

- Ruídos associados a cada leitura realizada;
- Existência de *outliers*;
- Algumas partes da superfície podem não ter sido digitalizadas, principalmente devido a oclusões da linha de visão do sistema óptico;
- Densidade de pontos diferente para cada porção do objeto; e
- Inexistência de área sobreposta entre duas regiões adjacentes, suficiente para alinhamento.

Na Figura 40 é possível observar alguns erros de alinhamento e as conseqüências para o modelo 3D do objeto como um todo.

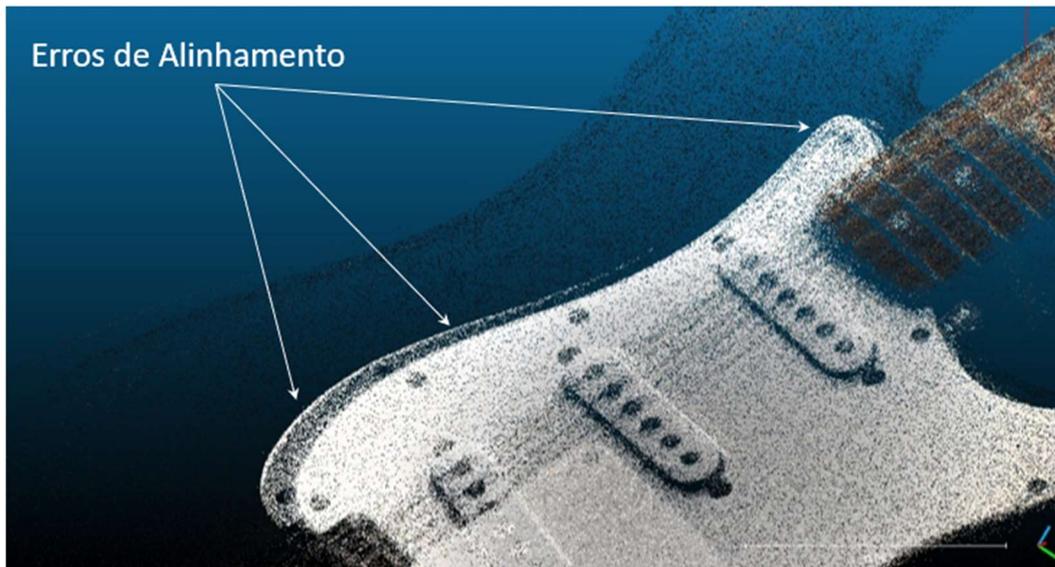


Figura 40 – Erros de alinhamento ou registro

Para que o alinhamento entre duas ou mais nuvens possa ser realizado de maneira a minimizar erros, é necessário que exista uma região comum às duas nuvens de pontos. Ao realizar o alinhamento desta região, é possível unificar os conjuntos de dados em um mesmo referencial pela aplicação de uma matriz de transformação encontrada no alinhamento da região comum.

O algoritmo mais utilizado atualmente para esta finalidade é o *Iterative Closest Point (ICP)*. Este algoritmo foi proposto por Chen et al. [120] e Besl et al. [121] e aperfeiçoado por Zhang [122]. Para que seja realizado o alinhamento, uma das nuvens de pontos é mantida fixa, servindo de referência. A outra nuvem de pontos pode então ser movimentada no espaço tridimensional. Em linhas gerais, o algoritmo funciona da seguinte forma:

- 1) Para cada ponto da nuvem a ser movimentada é encontrado o ponto mais próximo na nuvem de referência, não necessariamente existindo a associação de pontos que pertencem às mesmas posições relativas em cada nuvem de pontos;
- 2) Calculam-se os parâmetros de registro (rotação e translação) que minimizam o desvio padrão dos resíduos das distâncias calculadas ponto a ponto;
- 3) Realiza-se a transformação da nuvem a ser movimentada com expectativa de que se aproxime da nuvem de pontos referência;

- 4) O processo iterativo reinicia com a associação e novo cálculo de distâncias;
e
- 5) O final do processo ocorre quando se atinge uma tolerância ou número pré-definido de iterações.

O correto alinhamento entre as nuvens por meio do processo descrito é facilitado com um pré-posicionamento entre as nuvens de pontos, como exemplificado na Figura 41.

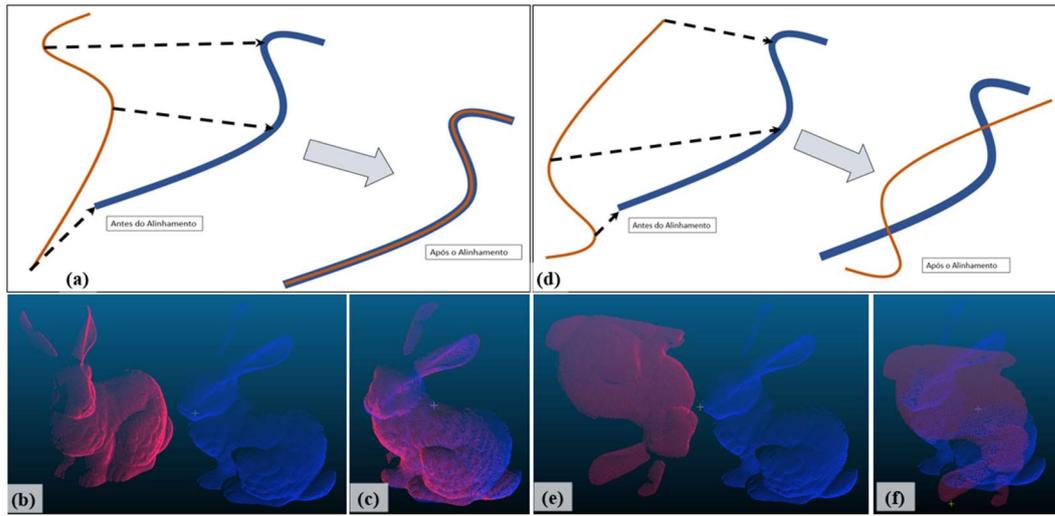


Figura 41 – *Iterative Closest Point*: (a) Exemplo de aplicação bidimensional do algoritmo ICP; (b) Algoritmo aplicado a duas nuvens de pontos do famoso modelo conhecido como *The "Stanford Bunny"* [123] e; (c) Alinhamento das duas nuvens realizado com sucesso.(d), (e) e (f) correspondem à limitação de alinhamento do algoritmo

A Figura 41d e as seguintes (e) e (f) demonstram que a aplicação do algoritmo em conjuntos de dados que não tenham sido previamente alinhados pode gerar resultados insatisfatórios [124], uma vez que nessas situações também é possível minimizar o desvio padrão de resíduos [121], havendo convergência para mínimos locais [6].

O algoritmo pode ser aplicado ainda para nuvens de pontos com tamanhos diferentes e também escalas diferentes. Considerando a Figura 41b, o alinhamento seria possível mesmo que essas condições estivessem presentes para uma das nuvens de pontos.

Atualmente, o algoritmo é bastante conhecido e empregado, apresentando inúmeras variações que buscam adequá-lo a diferentes aplicações, como reconhecimento de formas em tempo real e robótica [125] e também permitem sua aplicação mesmo em dados que apresentem *outliers* [124].

4.1.3. Estimativa de normais em nuvens de pontos

De maneira geral, a estimativa de normais em uma nuvem de pontos constitui importante passo anterior à reconstrução de superfície tomando como base essa mesma nuvem de pontos.

Havendo uma superfície previamente definida, basta gerar um plano tangente e, no ponto de intercessão entre a superfície e o plano, posicionar um vetor unitário normal. A realização deste procedimento para toda a superfície define todas as normais para esta superfície.

O problema se torna mais complexo quando, ao invés de uma superfície, existe uma nuvem de pontos que a representa. Neste caso não se tem certeza do posicionamento exato da superfície e é necessário fazer uso das vizinhanças de determinado ponto para que vetores normais possam ser calculados [126].

Geralmente, os processos de estimação de normais mais utilizados são aqueles que geram normais orientadas como resultado final. Estas normais podem estar orientadas para o interior ou exterior do objeto e constituem importante subsídio para a etapa de reconstrução [127].

A Figura 42 mostra as normais estimadas para uma nuvem de pontos obtida de uma superfície aerodinâmica utilizando o *software MeshLab*. Na Figura 42(b) é possível observar que para cada ponto da nuvem foi atribuído um vetor normal à superfície com orientação para o exterior da superfície estimada, o que permite o reconhecimento de áreas internas e externas de determinado objeto caracterizado por uma nuvem de pontos.

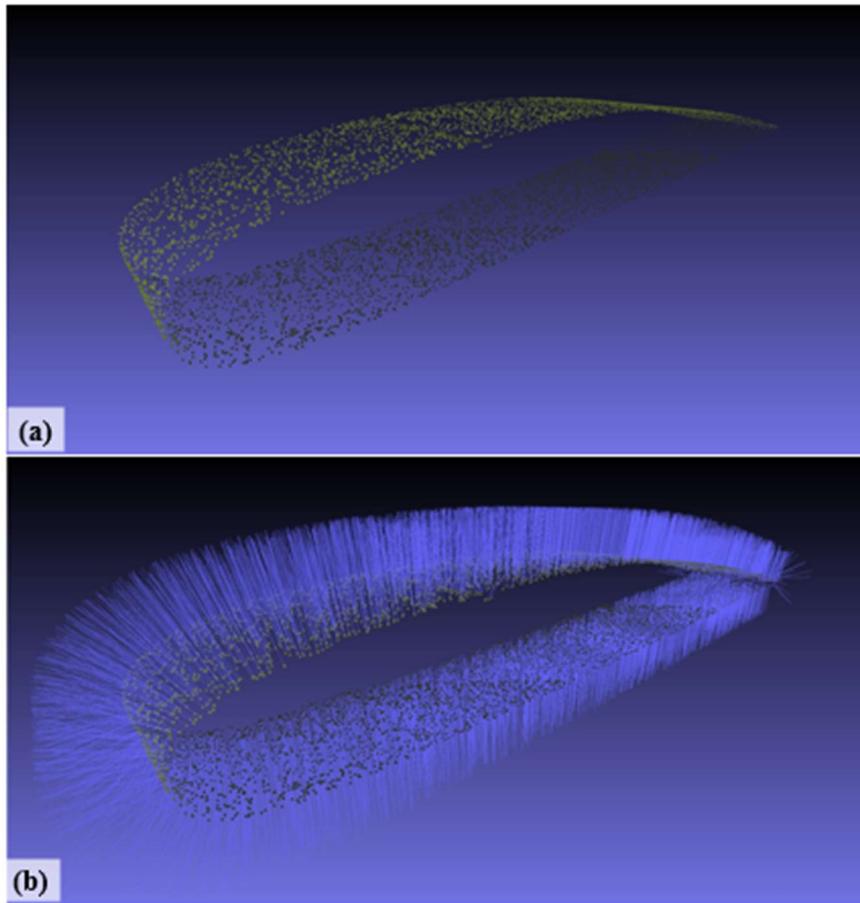


Figura 42 – Estimativa de normais para nuvem de pontos com auxílio do *software* MeshLab: (a) Nuvem de pontos referente à digitalização de superfície aerodinâmica e; (b) Apresentação das normais estimadas para o conjunto de dados

4.1.4. Reconstrução

Esta etapa, também conhecida como reconstrução de superfície (do inglês: *surface reconstruction*), ocorre após todas as leituras do *scanner* terem sido colocadas em um mesmo sistema de coordenadas ou após leitura única do *scanner* 3D e se caracteriza pela recuperação da superfície original, fazendo-se uso do conjunto de pontos que foram dela extraídos [128] e algumas vezes utilizando ferramentas estatísticas [95].

Uma grande variedade de algoritmos existe atualmente, diferindo basicamente nos tipos de dados que são tomados como entrada e nas representações de superfície reconstruída obtidas (Figura 43).

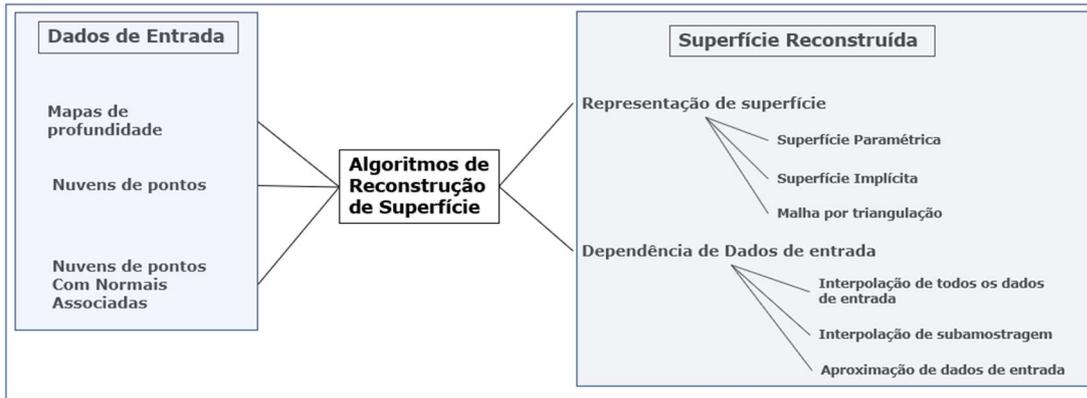


Figura 43 – Classificação dos algoritmos de reconstrução de superfície. Fonte: Adaptado de [128]

Observando a Figura 43 é possível perceber que quaisquer dados apresentados como sendo “de entrada” podem dar origem a superfícies com características diversas. Como exemplo, pode-se citar a reconstrução de superfície por meio da criação de malha e também por meio da superfície implícita.

Para o primeiro exemplo, a reconstrução ocorre pelo processo de criação de malhas via triangulação dos pontos. Na Figura 44 é possível observar a criação de malha baseado no algoritmo *Ball-Pivoting (BPA)* proposto por [129] e implementado no modelo da Figura 42 com o auxílio do *software MeshLab*.

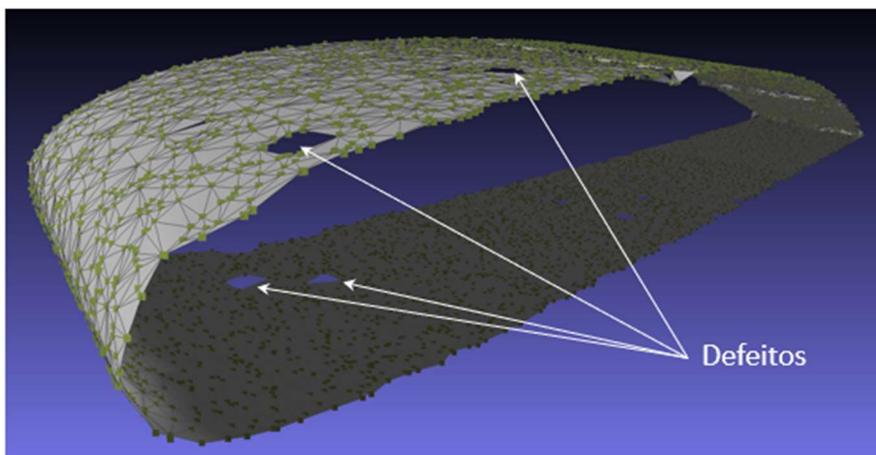


Figura 44 – Aplicação do algoritmo *Ball-Pivoting* à nuvem de pontos e criação de malha com auxílio do *software MeshLab*

Uma das principais vantagens deste algoritmo consiste na sua aplicação direta sobre a nuvem de pontos, sem a necessidade de estimar as normais previamente, em contrapartida, pode haver alguns defeitos na superfície, como pode ser visto na Figura 44.

O segundo exemplo de reconstrução se baseia na solução da equação de Poisson, onde φ representa uma função qualquer no espaço tridimensional:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (17)$$

Esta técnica, chamada de reconstrução de superfície de Poisson, foi proposta por Kazhdan et al. [130] e tem por objetivo obter uma função implícita do tipo $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$ para a superfície do objeto representado pela nuvem de pontos. Para aplicação da técnica, é necessário que as normais tenham sido previamente estabelecidas para a nuvem de pontos, definindo um campo vetorial contínuo. A integração deste campo vetorial dá origem à função implícita procurada. Esta solução é muitas vezes aproximada e ocorre a comparação do gradiente da função implícita com as normais pré-estabelecidas.

Na Figura 45, por sua vez, foi realizada a reconstrução de superfície do conjunto de pontos apresentados na Figura 42 utilizando a técnica de Poisson, onde é possível observar que todos os pontos estão localizados em uma superfície que aproxima muito bem o objeto original e que aparentemente não existem falhas. Isso pode ser explicado pelo motivo de se considerar todo o conjunto de dados e não soluções locais na busca de uma superfície que represente o objeto da nuvem de pontos [130].

Uma desvantagem é que podem ocorrer efeitos indesejados como fechamento de superfícies, como é possível observar na Figura 45. Este problema geralmente é resolvido com a segmentação da região que não pertence ao objeto.

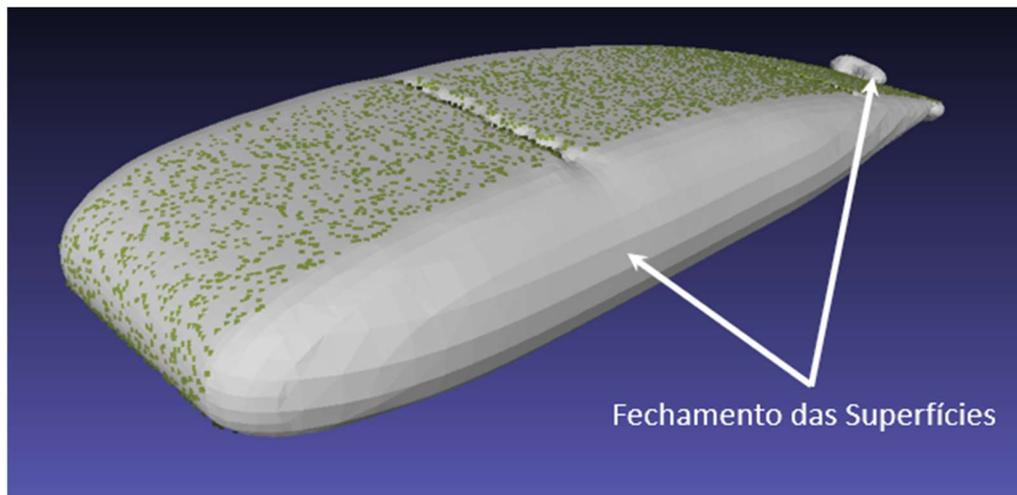


Figura 45 – Aplicação da técnica de reconstrução de superfície de Poisson e criação de malha com auxílio do *software* MeshLab

4.2. Ruídos e Outliers

A maioria dos processos de digitalização tridimensional geram nuvens de pontos com considerável quantidade de ruídos e também *outliers*, que são ocasionados por motivos diversos, como complexidade geométrica do objeto e diferenças de refletividade ao longo do objeto e nas adjacências [78,131].

Outliers podem ser definidos como sendo pontos ou conjuntos de pontos (*clusters*) que estão excessivamente distantes de uma suposta superfície verdadeira ou estão distribuídos aleatoriamente em todo o volume da nuvem de pontos [126].

O ruído é constituído de pontos distribuídos de maneira aleatória ao redor da superfície que a nuvem de pontos representa [126], por esse motivo a distribuição considerada mais recorrente para o ruído de nuvens de pontos é a Gaussiana [132].

Desta forma, muitas vezes torna-se necessário que os *outliers* sejam identificados e retirados do conjunto de dados e posteriormente seja realizado algum processo de filtragem para eliminar o ruído da nuvem de pontos [78,133].

Gao et al. [134] utilizam essa abordagem em seu estudo, identificando os *outliers* e removendo-os por meio de parâmetros pré-definidos de proximidade e esparsidade em relação a uma suposta superfície. Um trabalho posterior de filtragem faz-se necessário para pontos próximos à superfície (utilizando o mesmo critério de esparsidade), podendo ser feita de duas maneiras diferentes: (i) aplicando métodos de remoção de ruído, com diminuição da densidade de pontos local; e (ii)

métodos com suavização de superfície, onde os pontos são “atraídos” para uma superfície ajustada. Nesta segunda situação não existe diminuição do número de pontos da nuvem.

Han et al. [135] dividem os métodos de filtragem de ruídos em nuvem de pontos em: filtragem baseada em projeções, filtragem baseada em equações diferenciais parciais, filtragem estatística, filtragem baseada nas proximidades, métodos de processamento de sinal e métodos híbridos, que englobam uma ou mais técnicas.

Um trabalho recente de Leal et al. [136] sugeriu uma classificação muito próxima à realizada por Han et al., com pequenas mudanças de nomenclatura e organização de conceitos. Na Figura 46 é possível observar de forma mais ilustrativa uma comparação entre os métodos citados pelos três autores [134–136].

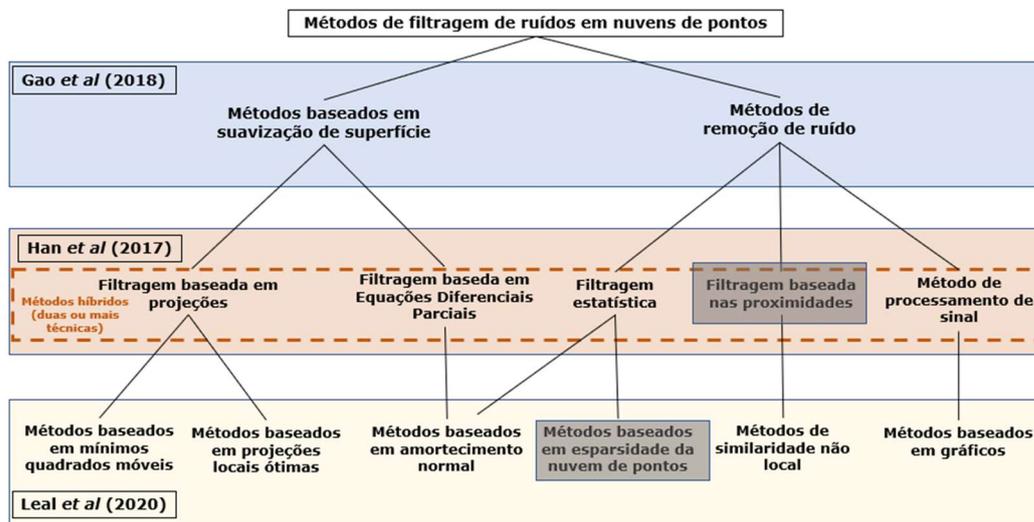


Figura 46 – Hierarquização e comparação de classificação para métodos de filtragem de ruídos em nuvens de pontos. Fonte: Elaborado com base em [134–136]

Ao analisar o conteúdo dos trabalhos desses autores [134–136], foi possível estabelecer uma hierarquização e classificação dos métodos, de maneira a melhor situar esta dissertação de mestrado dentro deste contexto de filtragem de nuvens de pontos, e assim poder discorrer como estas ferramentas (destacadas na Figura 46) serão utilizadas mais adiante. Vale ressaltar que esta hierarquização apresentada na Figura 46 foi elaborada com base em trabalhos com poucas referências em comum, sendo, portanto, bastante abrangente.

A aplicação de uma ou mais técnicas apresentadas na Figura 46 certamente conduzirá a resultados diferentes para determinado conjunto de dados com características específicas. Deste modo, por questão de simplicidade e facilidade de implementação, foram escolhidos para aplicação neste trabalho os métodos de remoção de ruídos, mais especificamente aqueles baseados nas proximidades e em esparsidade da nuvem de pontos. Estes métodos já estão implementados em *softwares* como *CloudCompare* [96] e *MeshLab* [97]; bem como em outros *softwares* de código aberto.

Os algoritmos implementados com essa finalidade nesses *softwares* são muito simples e apresentam ótimos resultados [137]. Por motivo de utilização nesta dissertação, serão descritos brevemente os algoritmos *Statistical Outlier Removal (SOR)* e *Noise Filter*.

Fundamentalmente, o algoritmo SOR implementado no *Software CloudCompare* utiliza a distância entre os pontos como apresentado na Figura 47 (filtragem baseada nas proximidades).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1912685/CA

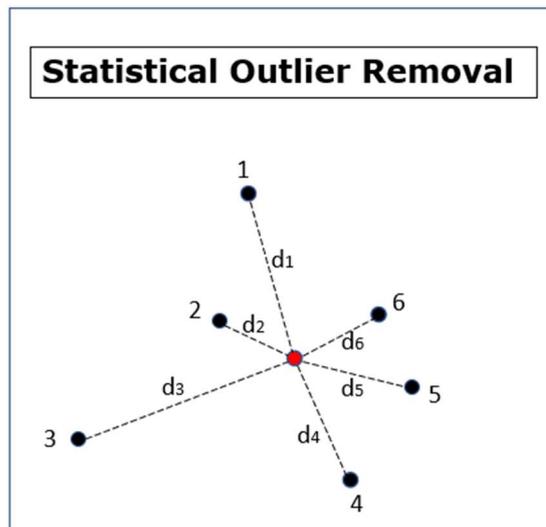


Figura 47 – Representação das distâncias em relação a determinado ponto para aplicação do algoritmo de remoção de *outliers* SOR implementado no *software CloudCompare*. Fonte: Adaptado de [138]

A aplicação do algoritmo inicia-se com um cálculo simples de média e desvio padrão amostral:

$$\bar{d} = \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{N} \quad (18)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(d_k - \bar{d})^2}{N - 1}} \quad (19)$$

Com base nesses valores obtidos são excluídos os pontos que estejam acima de um determinado limite de distância ($d_k \geq d_s$) caracterizado pela média somada a n vezes o desvio padrão amostral [137] (Eq.20).

$$d_s = \bar{d} + n \cdot \sigma \quad (20)$$

O algoritmo *Noise Filter* apresenta estrutura muito similar àquela implementada para o *Statistical Outlier Removal* (SOR) e, pelo fato de ser um método que se baseia na esparsidade da nuvem de pontos, a filtragem ocorre pelo estabelecimento de planos normais locais (Figura 48). As únicas diferenças em relação ao SOR consistem na determinação dos pontos interiores a uma esfera de raio R, na utilização destes pontos para ajuste de um plano e, finalmente, no cálculo de distâncias médias e desvio padrão amostral. Da mesma maneira apresentada anteriormente, os pontos que estejam acima de um limite de distância ($d_k \geq d_s$) são excluídos da nuvem de pontos [139].

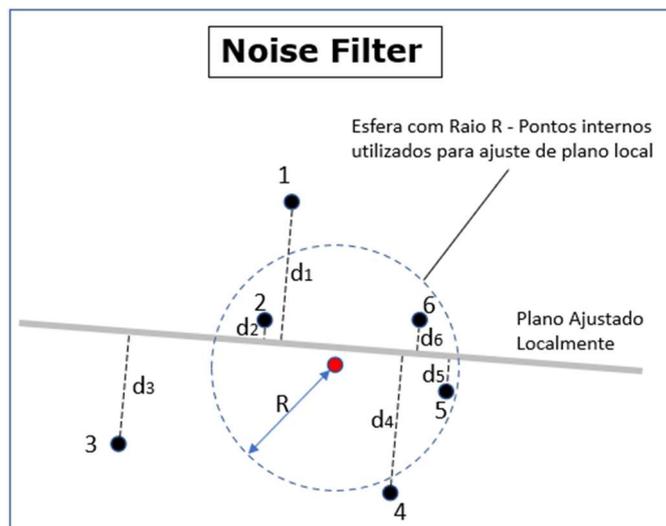


Figura 48 – Algoritmo de remoção de ruídos *Noise Filter* implementado no *software CloudCompare*.
Fonte: Adaptado de [139]

5 Avaliação de Desempenho de Scanners 3D

Baseando-se nas normas existentes para ensaios de coletes balísticos, foi realizada uma série de medições utilizando diferentes técnicas de digitalização para aquisição dos dados de interesse.

Foram digitalizadas amostras confeccionadas em aço que, por possuírem dimensões previamente estabelecidas, puderam servir de padrão para comparações, assim como sugerido por Hodgson et al. [56] e Carfagni et al. [84] com base nas normas vigentes para equipamentos de digitalização.

Em uma segunda etapa do processo investigativo, foram digitalizadas superfícies equivalentes às observadas para traumas de ensaios de coletes balísticos por outros equipamentos e métodos. Buscou-se aplicar alguns conceitos empregados com sucesso nas medições de calotas esféricas e pequenas adaptações foram realizadas.

A seguir será descrita a metodologia utilizada para confecção dos objetos digitalizados, bem como os processos de aquisição de dados e dificuldades encontradas.

5.1. Equipamentos utilizados para digitalizações 3D

Para aquisição dos dados utilizados no presente capítulo foram utilizados os seguintes equipamentos, apresentados na Figura 49: *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* (Figura 49a); braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm* (Figura 49b), tanto utilizando ponta de apalpação (AACMM) quanto *scanner* óptico instalados; e ainda o equipamento *VIC Gauge 3D Camera system* (Figura 49c) da empresa *Correlated Solutions*, utilizado em conjunto com o *software* VIC 3D para a captura de imagens estéreo de objetos.

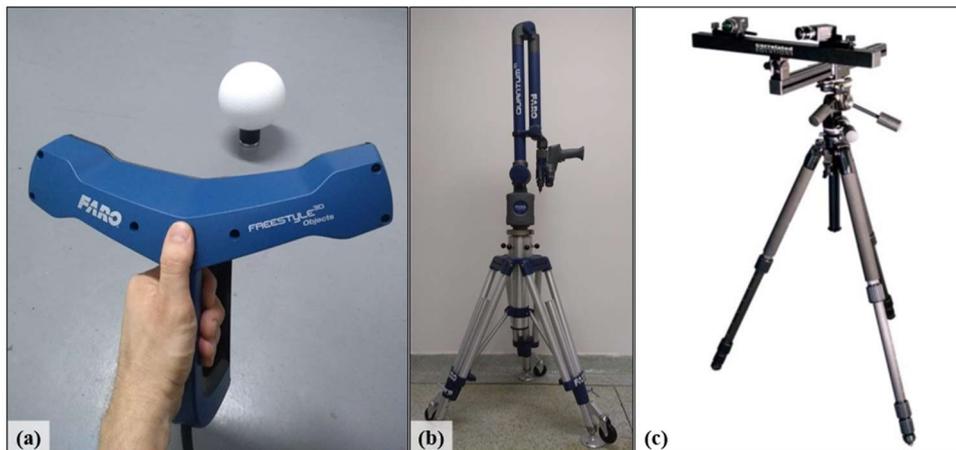


Figura 49 – Equipamentos utilizados para aquisição dos dados: (a) *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*; (b) braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm* e; (c) Equipamento *VIC Gauge 3D Camera system*. Fonte: Adaptado de [140]

Os principais motivos para a escolha destes instrumentos estão relacionados à disponibilidade dos mesmos e também à necessidade de avaliar o desempenho do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* para a aplicação de interesse e posterior comparação dos resultados obtidos com os resultados de outras técnicas aplicáveis.

Assim como descrito na seção 3.3.3, o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* utiliza a luz estruturada como princípio de funcionamento e tem sido aplicado para finalidades arquitetônicas e digitalização de objetos cujas maiores dimensões estejam compreendidas entre 0,01 m e 1,5 m. A aquisição de informações é realizada por duas câmeras infravermelhas posicionadas na parte superior do equipamento (Figura 28b), que capturam o padrão projetado também nesse espectro luminoso sobre o objeto de interesse (Figura 28c). Os cálculos das coordenadas tridimensionais são realizados por meio de triangulação (seção 3.3.3.1) e com o auxílio de sensores como acelerômetros e giroscópios para posicionamento dos pontos em um sistema de coordenadas. Informações de cores são adquiridas simultaneamente por uma câmera colorida instalada no equipamento (Figura 28b).

O braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm* consiste em um equipamento articulado que possibilita a localização tridimensional de sua extremidade em um sistema de coordenadas global (seção 3.3.4). Para obtenção de nuvens de pontos ou malhas, o equipamento permite que um dispositivo de apalpação (AACMM) e/ou *scanner* de alta resolução sejam instalados na extremidade do braço, possibilitando inclusive aplicações conjuntas destes

dispositivos. A utilização de um equipamento como o AACMM possibilita incertezas da ordem de micrometros e o *scanner* de alta resolução, por sua vez, torna possível a aquisição de uma grande quantidade de pontos (2000 pontos por linha com 40 μm de espaçamento), permitindo que pequenos detalhes sejam capturados e registrados em nuvens de pontos com baixa incerteza de medição (25 μm). Para a aquisição dos dados utilizados nesta dissertação, o equipamento foi utilizado em conjunto com o *Software PoliworksTM* que, além da finalidade de aquisição, também consiste em ferramenta proprietária para aplicações em metrologia e engenharia reversa.

O equipamento *VIC Gauge 3D Camera system*, por sua vez, consiste em um par de câmeras *Charge-Coupled Device (CCD)* instaladas em um suporte que possibilita a fixação destas em posições pré-determinadas e que o conjunto seja corretamente posicionado para a aquisição de dados. O equipamento costuma ser utilizado para aplicação da técnica de correlação digital de imagens (DIC) em conjunto com o *Software VIC 3D*. Esta técnica foi proposta por Sutton et al. [141] e permite medir deformações de materiais solicitados dinamicamente por meio de digitalizações tridimensionais realizadas em determinado intervalo de tempo. O equipamento foi utilizado na presente dissertação para aquisição estática de imagens estéreo por possuir um setup já definido e possibilitar aquisição de dados de maneira confiável, objetivando a aplicação da técnica de reconstrução 3D e posterior obtenção de nuvem de pontos do objeto de interesse.

5.2. Digitalização de Semiesferas usinadas em aço

Com o objetivo de comparar resultados de digitalização 3D executados por diferentes equipamentos, foram confeccionadas 4 calotas em aço. Os artefatos foram desenhados⁵ com geometria de fácil usinagem e que pudesse de alguma forma representar os traumas observados na plastilina por ocasião dos ensaios balísticos (Figura 50).

⁵ Os desenhos técnicos estão localizados no Anexo C.

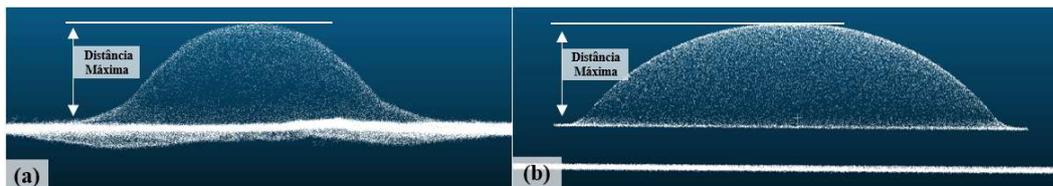


Figura 50 – Semelhança geométrica entre deformações e artefatos confeccionados: (a) Nuvem de pontos de deformação real em plastilina com indicação da distância máxima a ser medida e; (b) Calota esférica com indicação da mesma distância da deformação real

A utilização de artefatos teve por objetivo possibilitar a medição de suas dimensões com instrumentos (CMM e AACMM) capazes de fornecer valores o mais próximos possível dos valores verdadeiros, podendo então ser considerados como valores de referência para esta dissertação.

Trabalhos semelhantes para *scanners* de luz estruturada utilizando artefatos de dimensões conhecidas foram realizados por Cuesta et al. [8] e Givi et al. [142] com a comparação de resultados obtidos por máquinas tridimensionais de coordenadas e *scanners* de luz estruturada, obtendo resultados satisfatórios tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. Adicionalmente, Beraldin [77] menciona que objetos geométricos como esferas e planos constituem ferramentas adequadas para testar sistemas de aquisição tridimensional.

Assumindo como referência as informações colhidas nos trabalhos mencionados anteriormente [8,56,77,84,142], foi elaborada a metodologia apresentada de maneira resumida na Figura 51, para fabricação dos artefatos, digitalizações e tratamento das informações.

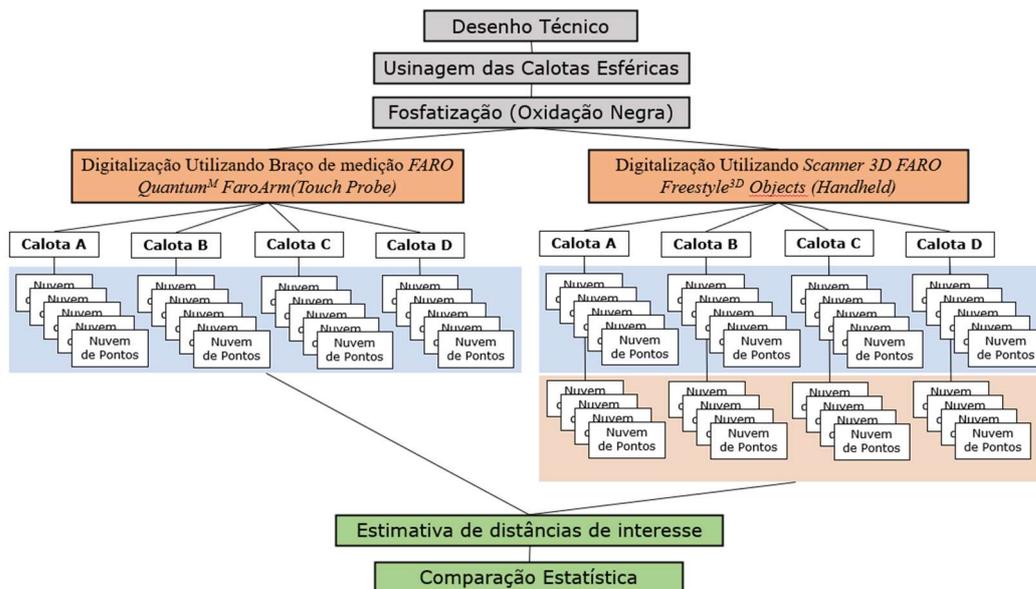


Figura 51 – Fluxograma explicativo do procedimento experimental realizado para comparações entre diversas digitalizações de objetos de referência

Neste procedimento, as principais dimensões a serem verificadas são aquelas onde se observam distâncias maiores, como a que existe entre o topo da calota e o plano base da mesma. Em conformidade com os valores frequentemente observados para profundidade de trauma nos ensaios de coletes balísticos, foram escolhidas as dimensões de 10 mm, 25 mm, 44 mm e 50 mm. As calotas foram denominadas “A”, “B”, “C” e “D”, respectivamente, e podem ser visualizadas na Figura 52 imediatamente após o processo de usinagem.



Figura 52 – Calotas esféricas usinadas em aço (4340) (a) Calota “A”; (b) Calota “B”; (c) Calota “C” e; (d) calota “D”

A usinagem foi realizada de maneira a respeitar ao máximo as dimensões estabelecidas no desenho técnico, entretanto as limitações impostas pelas dimensões de diâmetro do tarugo cedido pelo Arsenal de Guerra do Rio (AGR) e também limitações do processo (tolerâncias e exatidão do torno) impossibilitaram a usinagem perfeita das dimensões estabelecidas, sendo dada prioridade às

dimensões do topo da calota em relação à sua base e também em relação à base de toda a peça.

Portanto, visando encontrar as dimensões reais para posterior comparação com resultados do scanner 3D, considera-se que um provável desvio nas dimensões dos objetos fabricados, decorrente da usinagem, *a priori* não influenciaria significativamente no resultado da comparação.

5.2.1. Processo de confecção e limitações

O material utilizado para a confecção das calotas foi o aço (4340), gentilmente cedido pelo AGR, que também possibilitou a usinagem das peças em torno industrial de comando numérico computadorizado (CNC).

O principal motivo para utilização de aço para a confecção das peças foi a intenção inicial de realizar a caracterização destas por meio de uma máquina tridimensional de coordenadas (CMM), conforme apresentado na Figura 53. Pela constituição e massa inerente a cada calota, a fixação na mesa de inspeção da referida máquina seria a ideal, como foi posteriormente verificado. A dureza do material empregado (aço) também permitiria a realização de medições com elevado grau de exatidão pelo equipamento.



Figura 53 – (a) Máquina tridimensional de coordenadas e; (b) Detalhe da realização de medição na calota esférica “C”

No entanto, verificou-se experimentalmente que os resultados obtidos (Figura 54) não seriam adequados às verificações e comparações que se desejava realizar. Devido às limitações do equipamento, a obtenção de considerável quantidade de pontos (4000 a 5000) medidos seria inviável.

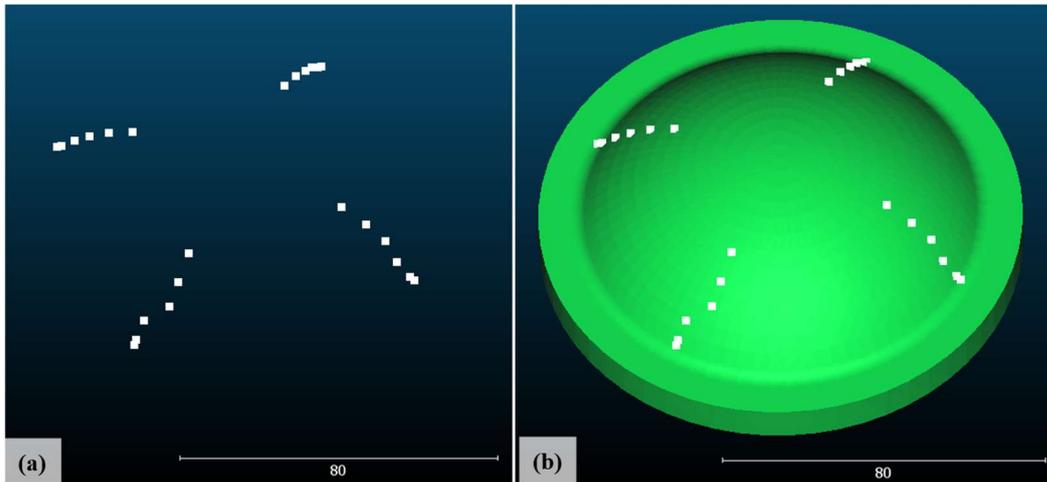


Figura 54 – (a) Nuvem de pontos obtida através da digitalização da calota esférica “B” utilizando uma máquina tridimensional de coordenadas e; (b) Superposição do modelo computacional do artefato “B” para visualização dos pontos medidos. Figuras apresentadas com o auxílio do *software CloudCompare*

Assim, após a ideia do uso da CMM ter sido descartada, observou-se que a refletividade das superfícies usinadas não era adequada às digitalizações que se seguiriam, pois este efeito implicaria na amostragem de número reduzido de pontos pelo *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*. Diante disso, o problema foi contornado com a fosfatização (oxidação negra) das superfícies, realizada também pelo AGR. O processo consistiu na preparação prévia das peças com jateamento de areia, limpeza e remoção de óleo e finalmente oxidação controlada das superfícies por meio de banho químico, resultando na formação de uma camada de óxido uniforme que praticamente não modificou as dimensões das calotas (alguns micrometros), contribuindo para proporcionar a refletividade adequada e também para proteger as peças de oxidação. O resultado pode ser verificado na Figura 55.

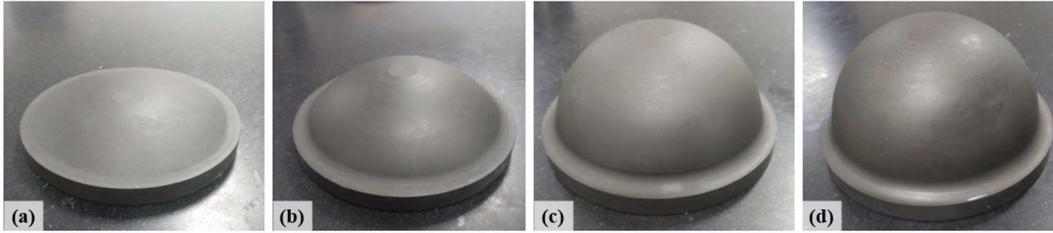


Figura 55 – Calotas esféricas após receber o tratamento superficial de fosfatização (Oxidação Negra). (a) Calota “A”; (b) Calota “B”; (c) Calota “C” e; (d) calota “D”

Assim, em posse dos objetos usinados, foram realizadas digitalizações e, por meio das nuvens de pontos obtidas, foi possível extrair as informações de interesse.

5.2.2. Digitalização utilizando *Scanner óptico 3D Faro^{3D} Objects*

As peças (calotas) foram posicionadas em mesa de desempenho tanto para evitar possíveis deslocamentos durante as digitalizações quanto para fornecer um plano de referência para extração de medidas de interesse. Com o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* previamente calibrado, o mesmo foi posicionado a 50 cm dos objetos e a digitalização foi realizada por aproximadamente 30 segundos.

As digitalizações foram realizadas individualmente para cada calota esférica e foram repetidas algumas vezes com o objetivo de gerar uma quantidade de dados minimamente suficiente para tratamento estatístico. Com o propósito de estender a compreensão a respeito do processo de medição, além da avaliação de desempenho do *Scanner FARO^{3D} Objects* em relação ao AACMM, foi realizada também a estimativa da incerteza de medição Tipo A.

Após a coleta das informações, foi utilizado o *software CloudCompare* para tratamento inicial das nuvens de pontos com remoção de objetos que não pertenciam à calota ou mesa de desempenho (*outliers*) por meio da segmentação das regiões de interesse. Após este processo, cada digitalização assumiu o formato apresentado na Figura 56.

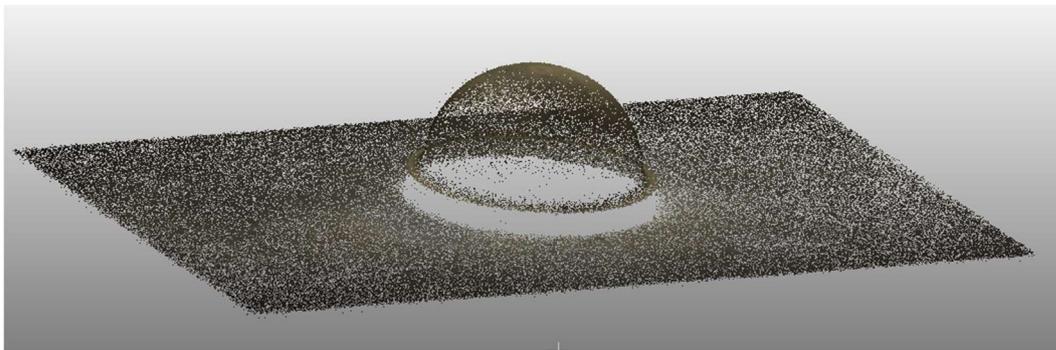


Figura 56 – Nuvem de pontos obtida por meio da digitalização da calota esférica “D” e apresentada com o auxílio do software *CloudCompare*

Para compor um primeiro conjunto de dados foram realizadas cinco digitalizações de cada calota esférica. Ao final deste tratamento inicial, as 20 digitalizações estavam preparadas para serem submetidas ao mesmo processamento para estimativa dos parâmetros de interesse.

Os resultados a serem apresentados no capítulo 6 para este primeiro conjunto de dados se mostraram predominantemente não comparáveis aos valores de referência, sendo necessária a realização de uma segunda série de digitalizações tanto para confirmar os resultados da primeira série de medições, quanto para avaliar a repetibilidade do equipamento em adquirir dados.

Verificou-se posteriormente na literatura que, para *scanners* de luz estruturada, existe uma relação entre o ângulo de incidência dos raios luminosos sobre o objeto a ser digitalizado e a incerteza dos valores obtidos da nuvem de pontos, com uma menor incerteza relacionada a mínimos desvios em relação à normal à superfície [143]. Na segunda série de digitalizações, os movimentos angulares foram minimizados e a posição do *scanner* permaneceu praticamente normal à superfície da mesa de desempenho.

A utilização deste procedimento adicional tornou o processo de captura mais dispendioso em termos de tempo e meticulosidade ao manusear o equipamento, principalmente pela dificuldade do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* em estabelecer referências tridimensionais nos objetos que possibilitassem a captura de pontos de maneira correta. Considerável número de digitalizações foi descartada na tentativa de obter nuvens de pontos que pudessem ser aproveitadas para a finalidade de comparação. Tendo em vista o tempo consideravelmente maior dispendido para

este processo, foram obtidas quatro digitalizações de cada calota esférica, totalizando 16 digitalizações.

Para que as medições de interesse pudessem ser realizadas nos dois conjuntos, foi necessário segmentar cada nuvem de pontos em regiões com características geométricas semelhantes: dois planos e uma calota esférica.

Objetivando-se uma segmentação com o mínimo de interferência manual e que pudesse ser reproduzida para todas as nuvens de pontos, foi selecionada a metodologia *Random Sample Consensus (RANSAC)* [115], descrita na subseção 4.1.1. O algoritmo, implementado no *software CloudCompare*, permitiu a segmentação das nuvens de pontos em duas regiões planares e uma região referente à calota esférica (Figura 57).

Como vantagens adicionais na utilização da metodologia RANSAC, pode ser citada a robustez do algoritmo ao reconhecer formas mesmo na presença de *outliers* e também no tratamento de nuvens de pontos com tamanhos diferentes [115,144].

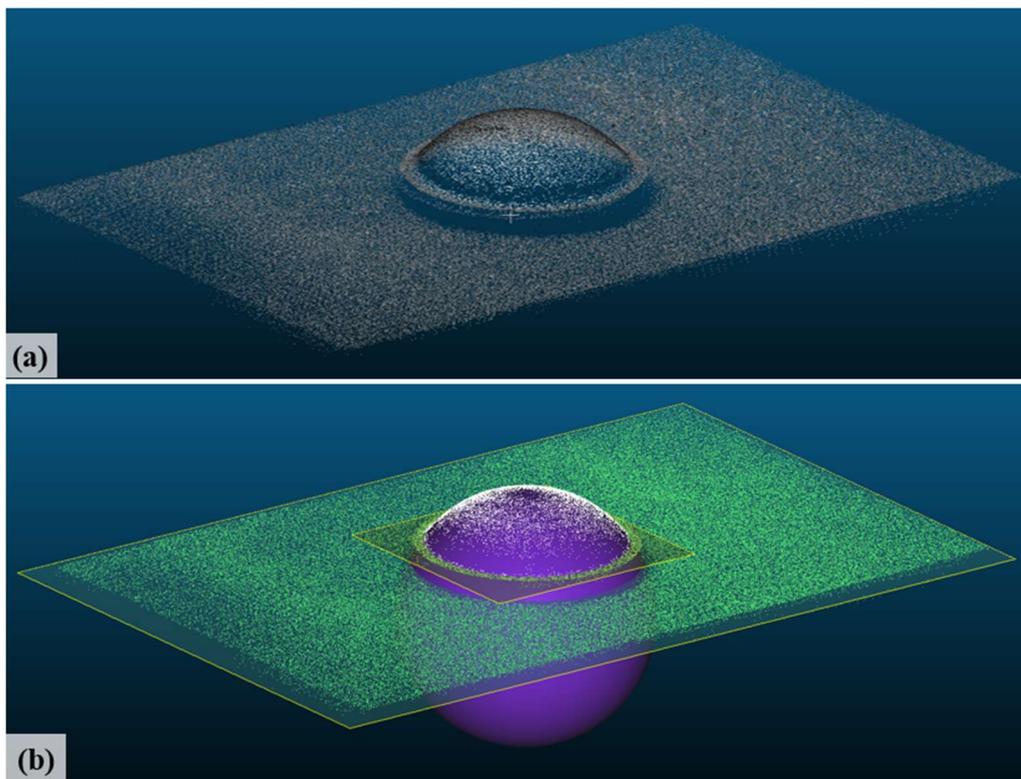


Figura 57 – (a) Nuvem de pontos “B” antes da aplicação do algoritmo RANSAC e; (b) Nuvem de pontos “B” após a aplicação do algoritmo, com a identificação de dois planos e uma calota esférica

Desta forma, foi realizado para cada nuvem de pontos o seguinte procedimento:

- i. Aplicação de segmentação pela metodologia RANSAC (Figura 57);
- ii. Obtenção de duas regiões planares e uma região referente à calota esférica, por meio de segmentação de cada nuvem de pontos semelhante à Figura 57a;
- iii. Cálculo da distância euclidiana entre cada ponto da calota esférica e cada um dos dois planos encontrados; e
- iv. Obtenção das distâncias D1 (plano base da calota esférica até o topo) e D2 (plano da mesa de desempenho até o topo da calota esférica) para cada calota esférica (Figura 58).

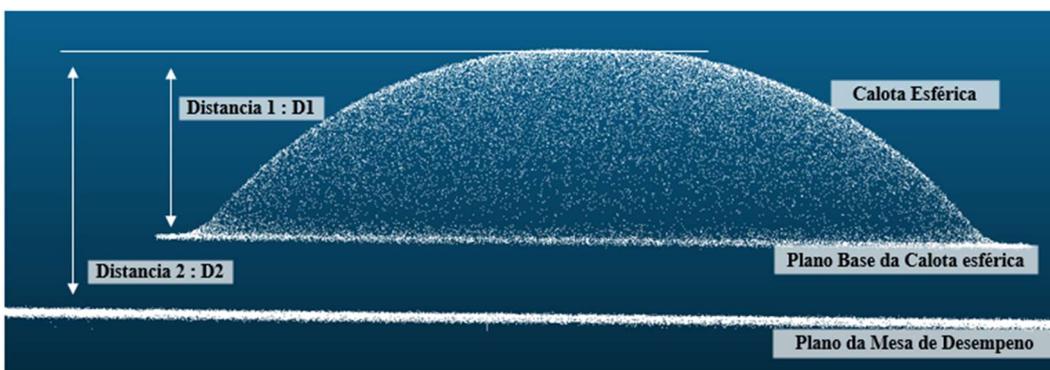


Figura 58 – Distâncias D1 e D2 que foram medidas em cada nuvem de pontos após processos de segmentação. Figuras elaboradas com auxílio do *software CloudCompare*

Por meio da medição das distâncias máximas entre cada plano encontrado e o topo da calota esférica e repetindo o procedimento para cada digitalização, foi possível construir os dois conjuntos de dados para o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* que serão analisados no próximo capítulo.

5.2.3. Digitalização utilizando o braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm* (Ponta de apalpação)

Como já mencionado anteriormente (seção 5.2.1), não foi possível realizar a caracterização adequada das calotas esféricas por meio de uma máquina tridimensional de coordenadas (CMM), que inicialmente tinha sido cogitada como uma solução mais próxima do ideal. Opcionalmente, a solução encontrada para obter valores que pudessem servir de referência e ainda caracterizar os objetos de maneira adequada foi a adoção do braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm*

(Figura 31) que, por apresentar uma ponta de apalpação, permitiu, tanto pelo *design* do equipamento quanto pelas possibilidades oferecidas pelo *software Poliworks*TM (utilizado em conjunto com o AACMM), que fosse realizada a varredura manual ao longo dos objetos de interesse. O resultado obtido para este tipo de procedimento foi uma nuvem de pontos com medições apresentando incerteza de medição da ordem de 0,018 mm, podendo, desta forma, servir de referência para outras medições ou mesmo para calibrações.

Desse modo, a metodologia consistiu em posicionar a ponta de apalpação no ponto de interesse e acioná-la a partir do pressionamento do *trigger* do equipamento. A partir deste momento todas as posições espaciais ocupadas pela ponta de apalpação foram registradas, considerando o intervalo de tempo definido no *software* de aquisição (*Poliworks*TM) como sendo 0,1 s.

Para cada calota esférica foram digitalizados alguns elementos geométricos de interesse: (i) o plano sobre o qual os artefatos estavam posicionados (mesa de desempenho); (ii) o plano formado por um platô na base das calotas esféricas; (iii) alguns pontos nas adjacências da calota, com objetivo de representar a forma geométrica em nuvem de pontos; e ainda foi dada especial atenção (iv) aos pontos localizados no topo de cada calota, onde foi realizada apalpação minuciosa, com a obtenção de considerável número de pontos nessa região (em torno de 500).

Após o processo de digitalização utilizando este equipamento, foram obtidos cinco conjuntos de dados semelhantes ao da Figura 59. Com vistas à obtenção de digitalizações individuais de cada calota, foi realizado o processo de segmentação da nuvem de pontos contendo os quatro artefatos.

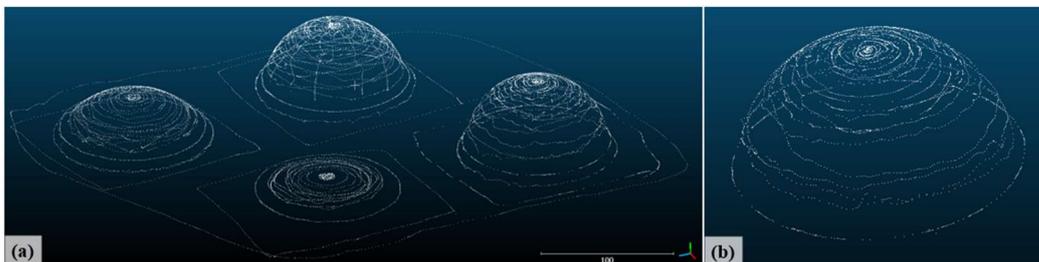


Figura 59 – Resultados da digitalização realizada com o *FARO Quantum^M FaroArm* (ponta de apalpação) e apresentados com o auxílio do *software CloudCompare*: (a) Nuvem de pontos obtida através da digitalização das 4 calotas esféricas em um mesmo arquivo e; (b) Segmentação realizada para a calota esférica “D”

O tratamento dos dados continuou com a segmentação de cada nuvem em três regiões distintas: (i) plano da mesa de desempenho; (ii) plano da base da calota localizado no corpo da peça; e (iii) região da calota esférica, conforme pode ser visualizado na Figura 60.

Pelo fato de as regiões estarem visivelmente definidas, não foi necessária a utilização da metodologia RANSAC e a segmentação foi realizada manualmente sem maiores dificuldades.



Figura 60 – Calota esférica “A” dividida nas três regiões de interesse

Com as duas regiões planares definidas na nuvem de pontos, foi possível ajustar dois planos e medir a distância entre eles e o topo da calota esférica, obtendo para cada artefato duas medidas de distância e um conjunto de dados referentes a este processo de digitalização.

Com base nas informações colhidas foi possível estabelecer quais as incertezas relacionadas à utilização do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* por meio da comparação de valores e cálculos de estimativa de incerteza.

5.3. Digitalização de entenações usadas em madeira

Objetivando-se realizar a verificação de medições reais e avaliar o desempenho do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects* frente a outros processos de digitalização e considerando a aplicação de interesse, foram realizadas algumas digitalizações de superfícies de formato livre, usadas em madeira e idênticas às observadas na plastilina após disparos de projéteis sobre o colete balístico.

Vale ressaltar que, devido à natureza oleosa do material que constitui a plastilina e também sua considerável maleabilidade, a aplicação de diversas técnicas de digitalização diretamente sobre o material se mostraria ineficiente para efeitos de comparação do scanner 3D com outras técnicas nesta aplicação.

Dificuldades no manuseio da caixa de plastilina (massa de 90 kg) e a possibilidade de alterar as deformações ora digitalizadas por outro método tornaram necessária a adoção de outra solução que tanto seria representativa como solucionaria os problemas mencionados.

Assim, adotando-se digitalizações anteriores de deformações em plastilina, foram confeccionadas amostras em madeira, com vistas a manter o relevo da superfície inalterado e possibilitando a aplicação de algumas técnicas de digitalização.

A Figura 61 apresenta, de maneira resumida, a metodologia empregada para comparação entre digitalizações de uma mesma superfície.

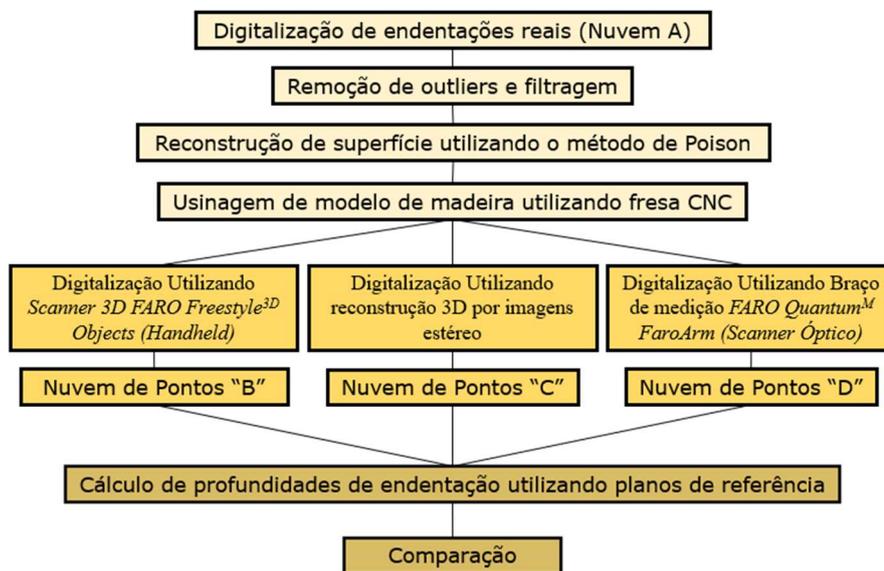


Figura 61 – Metodologia empregada para comparação entre técnicas de digitalização

A digitalização de uma mesma superfície por diferentes métodos permitiu investigar o desempenho dos equipamentos e comparar os resultados, sendo possível ainda aplicar uma mesma metodologia de tratamento às três nuvens de pontos.

5.3.1.

Usinagem de relevo representativo em placa de madeira

Inicialmente, foram realizadas algumas digitalizações de traumas observados em ensaios de coletes balísticos utilizando o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*. Após a obtenção destas digitalizações, buscou-se selecionar a

nuvem de pontos que possibilitaria uma boa reconstrução de superfície, com a representação das deformações sem falhas e pontos uniformemente distribuídos.

Na digitalização selecionada, foi utilizada uma amostra deformada de plastilina após três disparos de projéteis 9 mm contra um painel balístico nível IIA posicionado na parte frontal da caixa de plastilina. A digitalização apresentava relevos com baixas deformações (até 15 mm), o que possibilitaria melhores resultados para a posterior aplicação da técnica de reconstrução 3D, tendo em vista a distância focal das câmeras e o processo de calibração prévia a ser realizado na região frontal da placa de madeira.

A partir da nuvem de pontos selecionada, foi realizado um processo de remoção de *outliers* e posterior reconstrução 3D utilizando o método de reconstrução de superfície de Poisson [130]. Tal processo permitiu obter uma superfície com o mesmo relevo original da plastilina deformada (Figura 62).

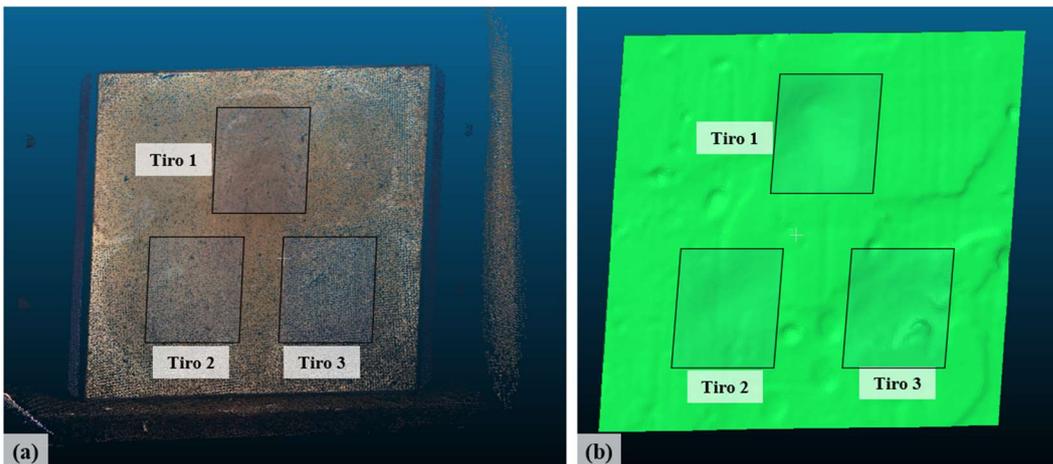


Figura 62 – (a) Digitalização da plastilina e; (b) Tratamento, limpeza e reconstrução de superfície para região de interesse pelo método de Poisson

Posteriormente, empregou-se uma fresa com comando numérico computadorizado (ROLAND MDX-540) de modo a permitir a usinagem da superfície reconstruída pelo método de Poisson em uma placa de madeira (Figura 63), sendo possível obter elevada representatividade da superfície deformada da plastilina.

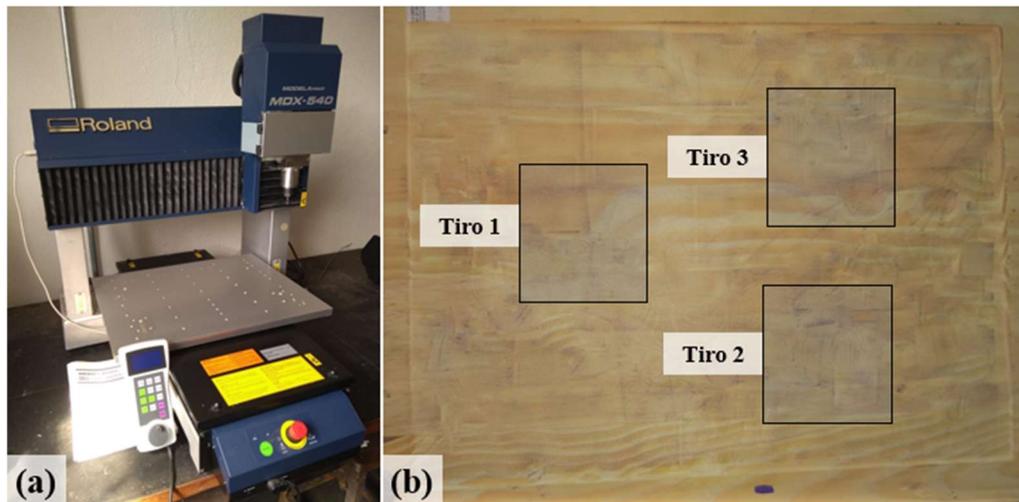


Figura 63 – Fresagem: (a) Fresa e; (b) Modelo físico confeccionado em madeira

Cabe esclarecer que a preferência por madeira e não aço ocorreu levando-se em consideração alguns fatores, tais como: disponibilidade da fresa e suas limitações relativas à usinagem de metais, facilidade de usinagem do material (madeira) e de pintura para obter refletividade adequada para as digitalizações.

5.3.2. Digitalização utilizando a técnica de reconstrução 3D

A técnica de reconstrução 3D foi aplicada na digitalização da placa usinada de madeira por ser de fácil implementação e se tratar de uma técnica de aquisição estática, pois faz uso de imagens estéreo tomadas a partir de distâncias fixas.

Desta forma, foi possível avaliar o desempenho da aquisição estática frente à aquisição de dados pelo scanner 3D, que necessita ser movimentado ao redor do objeto, realizando a captura de elevado número de imagens sob diferentes ângulos.

Para digitalização da placa de madeira, foi necessária prévia preparação com a pintura na cor branca e posterior marcação manual de pontos aleatórios, como pode ser visto na Figura 64. A marcação de pontos aleatórios na superfície teve por objetivo permitir e também maximizar correspondências entre as duas imagens estéreo capturadas pelas câmeras. A técnica *Digital Image Correlation (DIC)* faz uso do mesmo procedimento para caracterização de deformações em duas e três dimensões [145]. Nesta técnica, os pontos são conhecidos como *Speckles* e têm exatamente a mesma finalidade. A captura de imagens do objeto durante determinado período de tempo permite observar deslocamentos e alongamentos dos

pontos, possibilitando caracterizar o comportamento dinâmico de componentes mecânicos ou quaisquer objetos que estejam em processo de deformação.

Em termos computacionais, a aplicação da reconstrução 3D para o objeto de interesse é muito mais simples. Pelo fato de não haver movimentações, a aquisição é estática e a quantidade de informações a serem processadas é pequena.

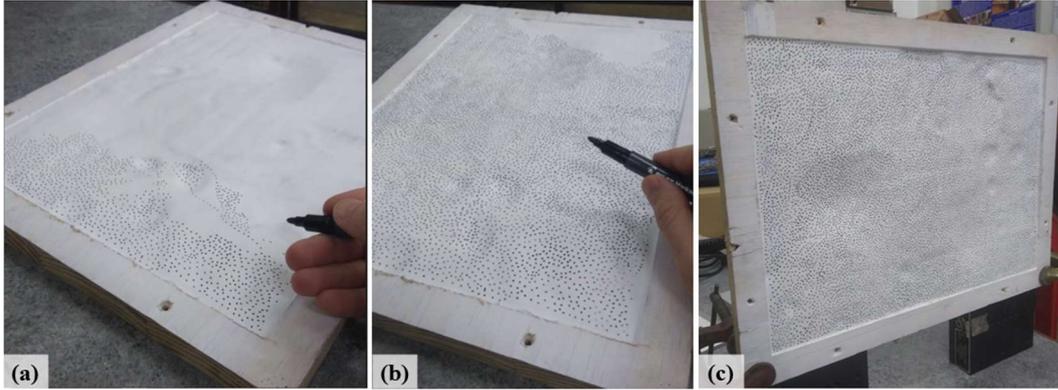


Figura 64 – Marcação de pontos aleatórios para captura: (a) e (b) Pigmentação manual amostra e; (c) Amostra fixa na posição de captura das imagens

O equipamento da empresa *Correlated Solutions* (Figura 65) foi utilizado para captura das imagens e posterior conversão em nuvem de pontos. A utilização de equipamento voltado à aplicação da técnica DIC para reconstrução 3D foi realizada principalmente pelo fato de este equipamento já apresentar uma configuração definida (*hardware e software*) e possibilitar a obtenção de resultados confiáveis, o que permitiu que fosse dada mais ênfase nestes mesmos resultados e comparação com outras técnicas.

A aquisição dos dados foi feita da seguinte maneira:

- 1) Posicionamento da placa de madeira já pigmentada a aproximadamente 2 m do sistema de câmeras;
- 2) Calibração do sistema com placa de calibração fornecida pelo fabricante do equipamento (Figura 65a); e
- 3) Aquisição de imagens estéreo do objeto de interesse (Figura 65b).

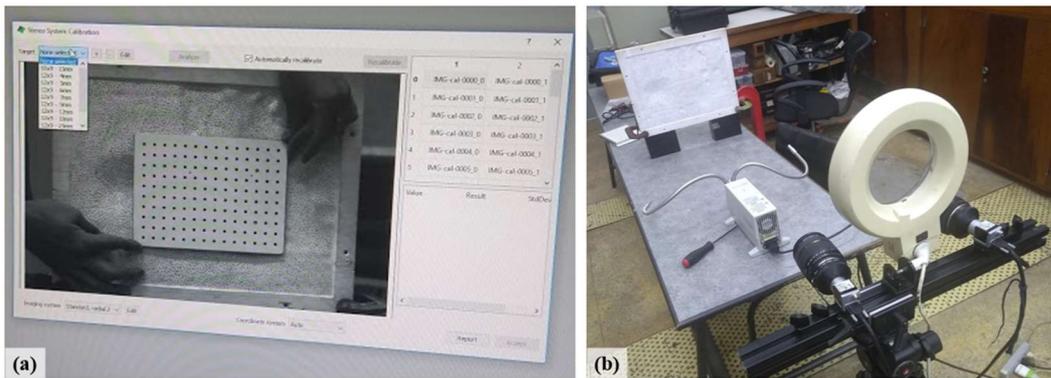


Figura 65 – Captura: (a) Calibração e; (b) Aquisição de imagens do modelo físico em madeira

Finalizada a etapa de aquisição, as imagens foram processadas pelo *software VIC 3D-8* da empresa *Correlated Solutions* (Figura 66a), que por sua vez permitiu realizar a correspondência entre os pontos de cada imagem. Em seguida, com o auxílio de um algoritmo de reconstrução, foi possível gerar uma nuvem de pontos tridimensional da placa de madeira (Figura 66c).

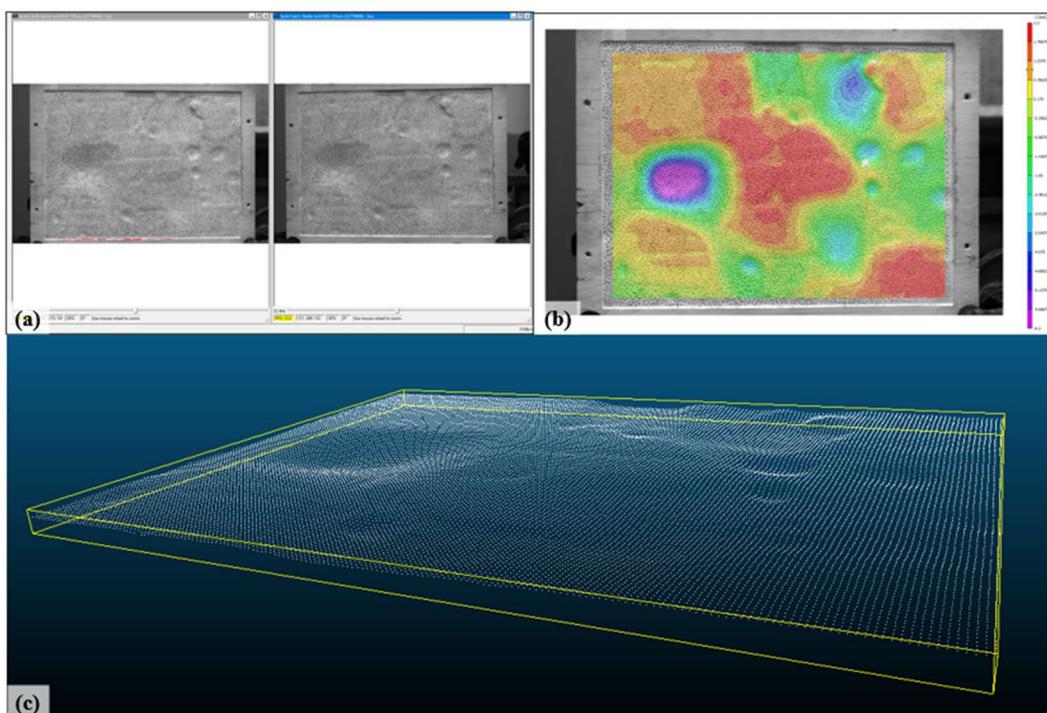


Figura 66 – (a) Processo de captura e correspondência; (b) Correspondência realizada com atribuição de coordenadas tridimensionais; e (c) Nuvem de pontos gerada do modelo físico em madeira

Uma vez que a amostra confeccionada em madeira foi devidamente pigmentada e digitalizada pela técnica de reconstrução 3D, seguiu-se a digitalização com a utilização do *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*.

5.3.3. Digitalização utilizando o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*

Para que a digitalização pudesse ser realizada de maneira adequada, realizou-se previamente a calibração do equipamento seguindo as recomendações do fabricante.

A aquisição dos dados foi feita com o scanner posicionado a uma distância de 50 cm durante 30 segundos. Durante esse tempo, foram realizados movimentos suaves ao redor do objeto de interesse, com o objetivo de capturar o maior número possível de detalhes e permitir que a aquisição fosse feita de maneira ótima, fornecendo ao equipamento diferentes perspectivas do objeto. O resultado pode ser visualizado na Figura 67.

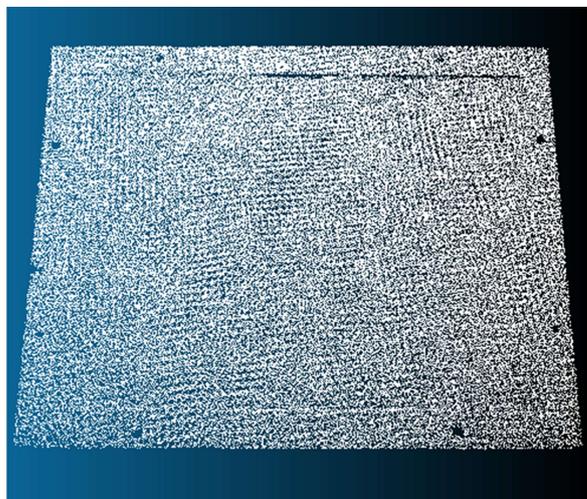


Figura 67 – Digitalização da placa usinada em madeira após pigmentação, utilizando o *Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*

Diferentemente da metodologia empregada para as calotas esféricas, a movimentação do scanner na digitalização da placa de madeira buscou avaliar a influência de pequenos movimentos na captura de informações e no resultado final da nuvem de pontos, considerando que esta situação se aproxima bastante da aplicação real.

5.3.4.

Digitalização utilizando o scanner óptico presente no braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm*

Para que as comparações entre os processos de medição pudessem ser realizadas, assim como avaliações do desempenho de cada equipamento, foi necessário realizar a digitalização da placa usinada em madeira com um instrumento que pudesse fornecer valores de referência para a medição de maneira rápida e confiável.

O instrumento escolhido para esta aplicação foi o braço de medição *FARO Quantum^M FaroArm*, com utilização do *scanner* óptico (Figura 68), pelos seguintes motivos: disponibilidade, incerteza de medição de 25 μm , aquisição de elevada quantidade de pontos (2000 pontos por linha com 40 μm de espaçamento mínimo) em um pequeno intervalo de tempo e ainda possibilidade de digitalizar toda a superfície usinada de madeira. Desta forma, haveria uma digitalização muito semelhante àquelas obtidas pelos outros métodos ópticos e com as mesmas características.

O uso de uma máquina tridimensional de coordenadas (CMM) foi considerado devido à elevada exatidão e confiabilidade do equipamento, entretanto o processo seria inviável em termos de tempo para que fosse adquirida a mesma quantidade de pontos que o *Scanner* óptico localizado no braço de medição é capaz de adquirir, sem a certeza de que o ponto de maior profundidade fosse medido. Além disso, em formas de relevo complexo não é possível capturar e caracterizar toda a superfície por meio de número limitado de operações, como é o caso das máquinas tridimensionais de coordenadas [146].

Desse modo, apresenta-se na Figura 68 o modelo de braço de medição empregado e também é possível observar o resultado da digitalização da superfície usinada da placa de madeira utilizando o *FARO Quantum^M FaroArm* com *scanner* óptico acoplado.

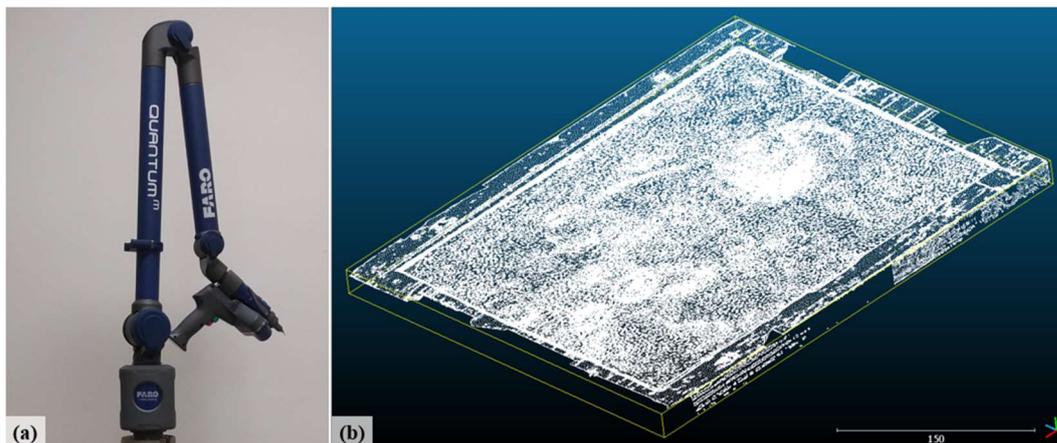


Figura 68 – (a) *FARO Quantum^M FaroArm* e; (b) Nuvem de pontos gerada pelo processo de digitalização e apresentada com o auxílio do *Software CloudCompare*

A digitalização realizada como o auxílio do *Scanner 3D FARO Quantum^M FaroArm* gerou uma nuvem de pontos com alta densidade (aproximadamente 500 pontos/cm²) e com elevada exatidão. Desta forma, a nuvem se assemelhou qualitativamente às outras nuvens “B” e “C” e foi possível utilizá-la para que fossem extraídos valores de referência para as dimensões da amostra.

5.3.5. Tratamento das nuvens de pontos utilizando o *Software CloudCompare*

Após a obtenção das nuvens de pontos por diferentes técnicas: Nuvem B (*Scanner 3D FARO Freestyle^{3D} Objects*); Nuvem C (Reconstrução 3D por imagens estéreo); e Nuvem D (*FARO Quantum^M FaroArm* com *scanner Óptico*), foi realizado tratamento nas nuvens por meio da utilização do *Software CloudCompare* para possibilitar comparação entre os conjuntos de dados.

Cada uma das três nuvens foi submetida a um processo de segmentação, pelo qual foram extraídas as regiões de interesse contendo os traumas, conforme pode ser visto na Figura 69.

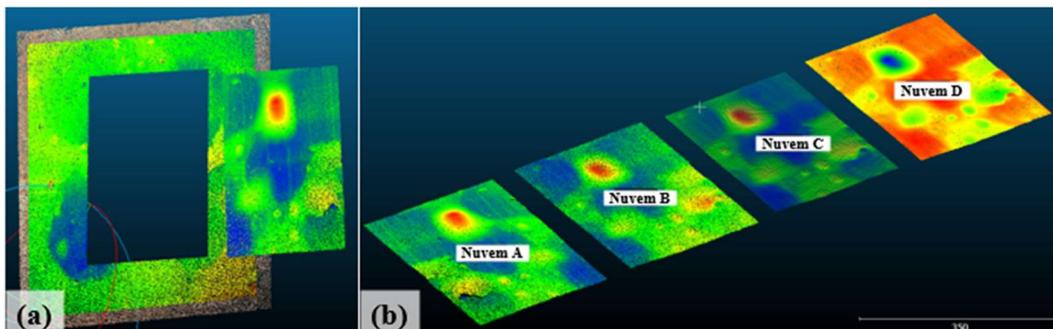


Figura 69 – (a) Extração de região de interesse com os traços e; (b) Regiões de interesse das nuvens A, B, C e D

Para que fosse possível obter as regiões de interesse apresentadas na Figura 69, foi realizado um processo de alinhamento entre as nuvens A, B, C e D utilizando o algoritmo *Iterative Closest Point (ICP)* proposto por Besl et al. [121] e Zhang [122].

Durante o tratamento e manipulação das nuvens de pontos, o algoritmo ICP possibilitou a identificação de regiões não coincidentes entre as nuvens, possibilitando a eliminação destas. Desta forma, as porções remanescentes representam praticamente a mesma região da placa de madeira. Este procedimento foi muito importante para estimar corretamente os planos dominantes em cada conjunto de dados e possibilitar uma comparação adequada.

Cabe ressaltar que a aplicação deste algoritmo é bastante disseminada para alinhamento de nuvens de pontos em geral, sendo utilizada inclusive para aplicações com elevado grau de exatidão, como proposto por Xue et al. [147] e Senin et al. [148].

Após o processo de segmentação, o algoritmo *Random Sample Consensus (RANSAC)*, proposto por Schnabel et al. [115] e implementado no *Software Cloud Compare*, foi aplicado às nuvens para detectar regiões planares e ajustar um plano principal em cada uma. O critério utilizado para estimar planos foi o ângulo pré-definido $\alpha < 25^\circ$, que considera o ângulo entre a normal calculada de determinado plano formado por 3 pontos tomados aleatoriamente para a nuvem de pontos (plano candidato) e o plano calculado em iteração anterior que ajustou o maior número possível de pontos. O processo é executado até que o melhor plano tenha sido encontrado, sendo utilizado para calcular as distâncias e profundidades das nuvens A, B, C e D.

O Algoritmo RANSAC foi selecionado para a aplicação pelos motivos descritos em [144], principalmente pela robustez ao manipular dados com *outliers* e nuvens de pontos com tamanhos diferentes. A aplicação do algoritmo na determinação de planos para as nuvens de pontos apresentou bom desempenho também pelo fato de as nuvens apresentarem deformações suaves (abaixo de 10 mm de profundidade).

A utilização dos melhores planos ajustados para cada conjunto de dados possibilitou a determinação de regiões de trauma em cada nuvem de pontos assim como apresentado na Figura 70.

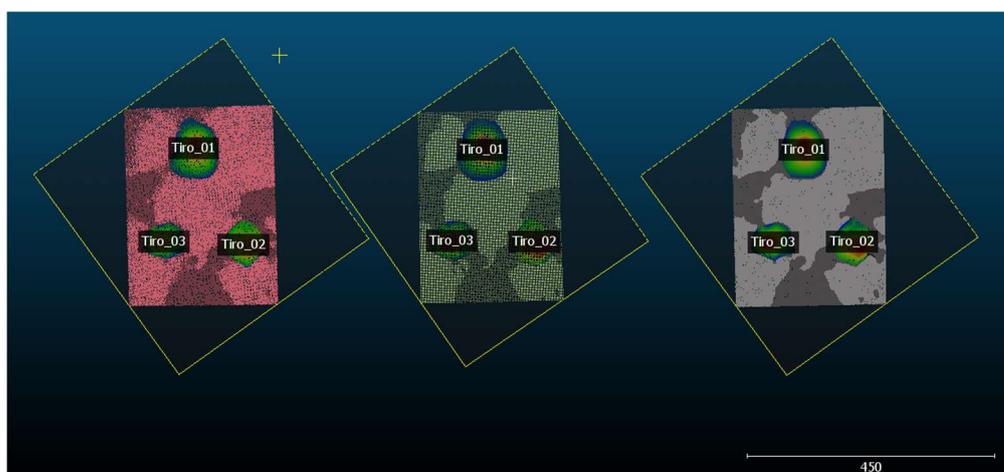


Figura 70 – Ajuste de planos e identificação das regiões de interesse nas nuvens B, C e D

As regiões dos traumas foram então manualmente segmentadas e tiveram suas profundidades medidas em relação a cada plano de referência ajustado.

6

Análise comparativa de desempenho do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*

O presente capítulo tem como principal finalidade apresentar os resultados obtidos por meio dos procedimentos experimentais realizados e detalhados no capítulo 5. A seção 6.1 apresenta os resultados das medições realizadas em calotas esféricas que serviram como padrão de medição, enquanto a seção 6.2 aborda os resultados da comparação entre três técnicas de digitalização aplicadas a uma mesma superfície deformada.

6.1.

Análise de resultados obtidos pela digitalização de calotas esféricas de aço

Como mencionado no capítulo 5, buscou-se reproduzir as mesmas características das deformações reais observadas em plastilina (Figura 50) por meio da utilização de calotas esféricas como padrões de medição. Os artefatos foram confeccionados de maneira a possibilitar a medição de distâncias à semelhança do que é realizado para a plastilina, onde existe a necessidade de realizar uma medição de profundidade máxima da deformação, tomando por referência a sua superfície inalterada.

6.1.1.

Obtenção de resultados de D1 e D2 para o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*

Conforme explicado na Figura 51 da seção 5.2, foram realizadas duas séries de digitalizações pelo *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*, das quais foram obtidas 20 nuvens de pontos e 16 nuvens de pontos, respectivamente. Como já mencionado, foi necessário realizar uma segunda série de medições, tanto para considerar parâmetros não observados na primeira série [143], como por exemplo o ângulo de incidência dos raios luminosos do *scanner* sobre o objeto, quanto para confirmar

resultados. Devido a dificuldades de aquisição do equipamento já relatadas no capítulo 5, a segunda série apresentou um menor número de digitalizações.

As distâncias D1 e D2 para cada nuvem de pontos do primeiro conjunto de medições realizadas com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do primeiro conjunto de medições realizadas com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*.

		Distância 1 (mm)				Distância 2 (mm)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Conjunto 01	Medição 1	10,7	25,7	43,9	50,0	21,1	35,8	54,0	60,4
	Medição 2	10,1	24,9	43,9	50,2	20,8	35,3	54,5	60,7
	Medição 3	10,7	25,0	44,0	50,3	20,5	35,3	54,5	60,7
	Medição 4	9,7	24,9	44,0	50,6	20,7	35,1	54,6	61,0
	Medição 5	10,3	24,9	43,9	50,1	20,8	35,2	54,3	60,4

Após novas digitalizações e aplicação da mesma metodologia aplicada ao primeiro conjunto de dados para tratamento das nuvens de pontos e medição das distâncias D1 e D2, foi obtido o segundo conjunto de dados, apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do segundo conjunto de medições realizadas com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*.

		Distância 1 (mm)				Distância 2 (mm)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Conjunto 02	Medição 1	10,3	25,1	44,1	50,6	20,7	35,6	54,5	60,7
	Medição 2	10,1	25,3	44,1	50,3	20,9	35,1	54,6	61,0
	Medição 3	10,7	25,1	44,2	49,9	21,0	35,6	54,6	60,5
	Medição 4	10,5	25,3	44,0	50,2	21,0	35,6	54,6	60,9

6.1.2.

Obtenção de resultados de D1 e D2 para o *Scanner FARO Quantum^M FaroArm*

Na Tabela 5 estão apresentadas as distâncias D1 e D2 referentes às nuvens de pontos oriundas do braço de medição de coordenadas (*FARO Quantum^M FaroArm* – com ponta de apalpação). Pela quantidade de pontos consideravelmente inferior àquela obtida pelo *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*, foi possível segmentar manualmente o conjunto e os dois planos foram ajustados manualmente.

Tabela 5 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do conjunto de medições realizadas com o braço de medição por coordenadas FARO Quantum^M FaroArm.

		Distância 1 (mm)				Distância 2 (mm)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Braço de Medição	Medição 1	9,80	24,74	43,76	49,94	20,16	34,76	54,16	60,14
	Medição 2	9,80	24,74	43,74	49,94	20,16	34,75	54,15	60,15
	Medição 3	9,81	25,06	43,74	49,89	20,17	35,08	54,17	60,14
	Medição 4	9,80	24,75	43,75	49,92	20,16	34,77	54,15	60,09
	Medição 5	9,80	24,74	43,74	49,94	20,17	34,77	54,18	60,11

Devido à baixa incerteza de medição do equipamento (da ordem de 0,018 mm) as medições obtidas com o AACMM foram consideradas como valores de referência para as comparações e análise de desempenho do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*.

6.1.3.

Remoção de outliers e filtragem de ruídos dos dados obtidos pelo *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*

Após obter os resultados das medições com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*, foi realizado um processo de filtragem de ruídos nos dados brutos utilizando as ferramentas disponíveis para este fim no *software CloudCompare: Statistical Outlier Removal (SOR)* e *Noise Filter*, em etapa anterior à aplicação do algoritmo RANSAC. Os pontos com diferenças em relação à média acima de um desvio padrão foram excluídos ao se utilizarem os dois algoritmos. A metodologia de remoção de ruídos empregada é similar à empregada por Wang et al. [149], que inicialmente remove os *outliers* e posteriormente filtra o ruído.

Assim, na Tabela 6 encontram-se os resultados pós-remoção de *outliers* e filtragem de ruídos referente ao primeiro conjunto de medições realizadas com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*.

Tabela 6 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do primeiro conjunto de medições realizadas com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*, após processo de filtragem

		Distância 1 (mm)				Distância 2 (mm)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Conjunto 01 (Após filtragem)	Medição 1	9,9	25,7	43,8	49,8	20,4	35,9	54,4	60,2
	Medição 2	10,1	24,8	43,7	50,1	20,6	34,9	54,4	60,6
	Medição 3	10,0	24,8	43,7	49,8	20,6	35,0	54,3	60,4
	Medição 4	9,8	24,8	43,7	49,9	20,4	35,0	54,4	60,5
	Medição 5	10,0	24,7	43,7	49,8	20,6	34,9	54,2	60,4

Do mesmo modo, os resultados após a remoção de ruídos e o processo de filtragem do segundo conjunto de medições realizadas com o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Distâncias medidas D1 e D2 para cada nuvem de pontos do segundo conjunto de medições realizadas com o Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects, após processo de filtragem

		Distância 1 (mm)				Distância 2 (mm)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Conjunto 02 (Após filtragem)	Medição 1	9,9	24,8	43,7	50,1	20,2	35,1	54,2	60,3
	Medição 2	10,2	24,8	44,0	50,3	20,6	35,3	54,4	60,7
	Medição 3	10,3	24,8	43,7	50,1	20,9	35,1	54,2	60,4
	Medição 4	10,4	24,8	44,1	50,3	20,9	35,0	54,6	60,7

6.1.4. Tratamento estatístico dos dados

Por fim, de posse dos dados obtidos do braço de medição por coordenadas (AACMM) e do Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects, foi realizado o tratamento estatístico⁶ resumido na Figura 71, com vistas a comparar metrologicamente o desempenho do Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects em relação ao AACMM. Para melhor compreensão, os valores p foram analisados em todos os testes executados.

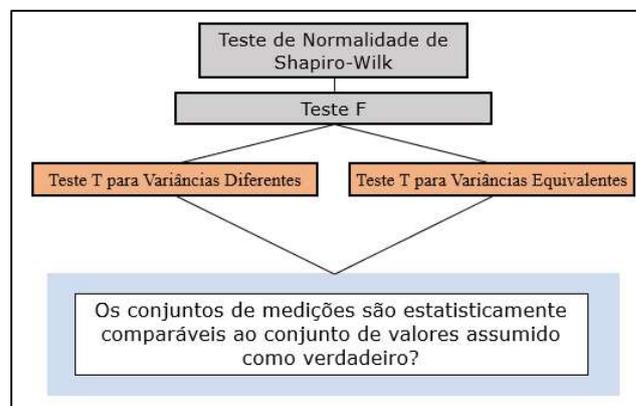


Figura 71 – Fluxograma descritivo do tratamento estatístico realizado nos conjuntos de dados

Inicialmente, a normalidade dos dados foi investigada por meio do teste de Shapiro-Wilk, uma vez que os testes f (Fischer-Snedecor) e t de Student necessitam que os dados sejam normalmente distribuídos. O teste foi realizado ao nível de confiança de 95 %, com obtenção de valor p para cada conjunto de medições. O resultado está apresentado na Tabela 8:

Tabela 8 – Teste de normalidade de Shapiro-Wilk para conjuntos de medição D1 e D2

		Distância 1 (mm)				Distância 2 (mm)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor p	AACMM	0,2557	0,0003	0,0830	0,1467	0,7945	0,0008	0,3541	0,4372
	Conjunto 01	0,6722	0,0027	0,9600	0,4036	0,6417	0,1365	0,3339	0,4700
	Conjunto 02	0,8743	0,0531	0,9139	0,9165	0,4054	0,0043	0,4715	0,6476
	Conjunto 1 (Após filtragem)	0,2700	0,0013	0,4615	0,2905	0,2062	0,0038	0,1474	0,8775
	Conjunto 2 (Após filtragem)	0,2765	0,7866	0,1122	0,1085	0,5356	0,8560	0,2327	0,3263

⁶ Maiores detalhes da formulação estatística empregada estão apresentados no Apêndice A.

Nos conjuntos de dados em que se rejeita a hipótese de normalidade (destacados em negrito) ocorre uma dispersão muito pequena dos dados em torno da média, motivo pelo qual a distribuição não é normal. Para todos os demais valores (valor $p > 0,05$), não se pode rejeitar a hipótese de normalidade.

Devido ao fato dos dados da calota esférica B na sua maioria não atenderem à condição de normalidade, comparações e tratamentos estatísticos foram realizados sem esses valores. Embora alguns testes não paramétricos (χ^2 , Mann-Whitney e Kolmogorov-Smirnov) pudessem ser aplicados para inferir a distribuição dos dados e realizar comparações estatísticas entre as amostras, é importante notar que os valores considerados críticos para medir o trauma em ensaios de coletes balísticos estão localizados em torno de 44 mm e 50 mm, por implicarem na conformidade ou não desses materiais no contexto das normas NIJ 01.01.04 e NIJ 01.01.06. Esses valores foram representados pelas calotas esféricas C e D, cujos resultados de medição foram verificados como normalmente distribuídos. Desta forma, os resultados para a calota esférica B seriam meramente informativos e não influenciariam o resultado do estudo.

Com a demonstração da normalidade de praticamente todos os conjuntos de dados, seguiram-se testes estatísticos para fins de comparação entre conjuntos distintos.

Na sequência foi realizada uma análise de repetibilidade com os resultados obtidos na Tabela 3 e na Tabela 4, para verificar se os resultados de dois conjuntos de digitalizações podiam ser comparáveis. Realizou-se um teste f para verificar se as variâncias entre medições eram ou não equivalentes, com posterior aplicação do teste t de Student. Nos testes realizados assumiu-se nível de confiança de 95 % e hipóteses alternativas como sendo variâncias diferentes para os testes f e médias diferentes para os testes t . A Tabela 9 apresenta os resultados dos dois testes realizados.

Tabela 9 – Comparação entre duas medições utilizando o Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects

	Distância 1 (mm)			Distância 2 (mm)		
	A	C	D	A	C	D
Conjunto 01 – Média	10,326	43,947	50,242	20,774	54,372	60,650
Conjunto 01 – Desvio Padrão	0,410	0,044	0,238	0,219	0,236	0,252
Conjunto 02 – Média	10,414	44,064	50,254	20,893	54,590	60,753
Conjunto 02 – Desvio Padrão	0,240	0,075	0,289	0,130	0,055	0,221
Teste f (valor p)	0,4135	0,4181	0,6902	0,4142	0,0383	0,8597
Teste t (valor p)	0,714	0,0247	0,9515	0,3753	0,1093	0,5422

A análise de repetibilidade realizada entre os dois conjuntos de dados obtidos permitiu concluir que os conjuntos 1 e 2 são comparáveis entre si, o que permite afirmar que tanto o processo de aquisição de dados quanto o tratamento posterior das nuvens de pontos e medição das distâncias de interesse podem ser replicados com resultados semelhantes para o mesmo mensurando.

A partir das medições da Tabela 5, que apresenta os dados usados como referência, seguiu-se para uma análise comparativa entre os dois conjuntos de medição do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* e do braço de medição por coordenadas (AACMM). A análise consistiu na aplicação do teste *f* para avaliar se os conjuntos de dados apresentavam variâncias equivalentes ou não e, uma vez determinado esse resultado, foi realizado o teste *t*, conforme pode ser visto na Tabela 10. Nos testes realizados assumiu-se nível de confiança de 95 % e hipóteses alternativas como sendo variâncias diferentes para os testes *f* e médias diferentes para os testes *t*.

Tabela 10 – Resultados da comparação entre duas medições utilizando o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* e o braço de medição por coordenadas

		Distância 1 (mm)			Distância 2 (mm)		
		A	C	D	A	C	D
Comparação 01	Braço de Medição - Média	9,799	43,749	49,925	20,165	54,164	60,125
	Braço de Medição – Desv Pad	$3,96 \times 10^{-3}$	$9,52 \times 10^{-3}$	$2,49 \times 10^{-2}$	$4,94 \times 10^{-3}$	$1,41 \times 10^{-2}$	$2,24 \times 10^{-2}$
	Conjunto 01 – Média	10,325	43,947	50,242	20,774	54,372	60,650
	Conjunto 01 – Desv Pad	0,4085	0,049	0,238	0,2195	0,2362	0,2530
	Teste <i>f</i> (valor p)	$5,31 \times 10^{-8}$	0,0080	0,0007	$1,54 \times 10^{-6}$	$8,26 \times 10^{-5}$	0,0003
	Teste <i>t</i> (valor p)	0,04491	0,0006	0,0404	0,0034	0,1200	0,0095
Comparação 02	Braço de Medição - Média	9,799	43,749	49,926	20,166	54,164	60,125
	Braço de Medição – Desv Pad	$3,96 \times 10^{-3}$	$9,52 \times 10^{-3}$	0,024	$4,94 \times 10^{-3}$	0,0141	0,0224
	Conjunto 02 – Média	10,414	44,064	50,253	20,892	54,590	60,753
	Conjunto 02 – Desv Pad	0,2412	0,0754	0,2903	0,1296	0,0556	0,2214
	Teste <i>f</i> (valor p)	$4,84 \times 10^{-7}$	0,0016	0,0004	$1,4 \times 10^{-5}$	0,0253	0,0005
	Teste <i>t</i> (valor p)	0,0146	0,0033	0,1088	0,0015	0,0004	0,0105

Como é possível observar, a aplicação da metodologia descrita permitiu concluir que apenas os dados destacados na Tabela 10 se mostraram comparáveis. Nas demais comparações, foi rejeitada a hipótese de que as amostras dos conjuntos 1 e 2 seriam estatisticamente semelhantes aos valores assumidos como referência, ou seja, nessas comparações assume-se como verdadeira a hipótese alternativa de não similaridade, o que indica que existência de erro sistemático na maioria das medições.

Os dados da Tabela 6 e da Tabela 7 também foram comparados com resultados obtidos pelo braço de medição de coordenadas (AACMM) e estão apresentados na Tabela 11. Nos testes realizados assumiu-se nível de confiança de

95 % e hipóteses alternativas como sendo variâncias diferentes para os testes f e médias diferentes para os testes t .

Tabela 11 – Resultados da comparação entre duas medições utilizando o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* e o braço de medição por coordenadas (AACMM) após processo de filtragem

		Distância 1 (mm)			Distância 2 (mm)		
		A	C	D	A	C	D
Comparação 01 (Após Filtragem)	Braço de Medição - Média	9,799	43,749	49,926	20,166	54,164	60,125
	Braço de Medição – Desv Pad	$3,96 \times 10^{-3}$	$9,52 \times 10^{-3}$	0,0245	$4,94 \times 10^{-3}$	0,0141	0,02
	Conjunto 01 – Média	9,966	43,731	49,878	20,506	54,319	60,414
	Conjunto 01 – Desv Pad	0,0122	0,0037	0,01528	0,0141	0,0047	0,0130
	Teste f (valor p)	$9,85 \times 10^{-6}$	0,0032	0,0089	$1,77 \times 10^{-5}$	0,0104	0,0066
	Teste t (valor p)	0,0281	0,5567	0,4384	0,0030	0,0063	0,0041
Comparação 02 (Após Filtragem)	Braço de Medição - Média	9,799	43,749	49,926	20,166	54,164	60,125
	Braço de Medição – Desv Pad	$3,96 \times 10^{-3}$	$9,52 \times 10^{-3}$	0,0245	$4,94 \times 10^{-3}$	0,0141	0,02
	Conjunto 02 – Média	10,208	43,863	50,195	20,642	54,377	60,517
	Conjunto 02 – Desv Pad	0,2454	0,2323	0,0787	0,3206	0,1858	0,1718
	Teste f (valor p)	$4,53 \times 10^{-7}$	$1,86 \times 10^{-5}$	0,0506	$7,62 \times 10^{-7}$	0,0002	0,0015
	Teste t (valor p)	0,0446	0,4030	0,0001	0,0589	0,1054	0,0190

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados dos cálculos de desvio-padrão da média das amostras, considerado pela ISO GUM [150] como sendo a incerteza do Tipo A, bem como a tendência para os dados analisados. Observa-se que a diminuição da incerteza Tipo A não ocorreu em todas as amostras após o processo de filtragem, porém a tendência diminuiu em todos os casos.

Tabela 12 – Resultados para incerteza e tendência utilizando o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* antes e depois do processo de filtragem

		Distância 1 (mm)			Distância 2 (mm)		
		A	C	D	A	C	D
Incerteza	AACMM	0,002	0,004	0,011	0,002	0,006	0,010
	Conjunto 01	0,183	0,022	0,106	0,098	0,106	0,113
	Conj 1 (Após filtragem)	0,049	0,027	0,055	0,053	0,031	0,051
	Conjunto 02	0,120	0,037	0,145	0,064	0,028	0,011
	Conj 2 (Após filtragem)	0,122	0,116	0,040	0,160	0,092	0,085
Tendência	Conjunto 01	0,526	0,197	0,317	0,609	0,208	0,525
	Conj 1 (Após filtragem)	0,166	-0,018	-0,048	0,340	0,154	0,290
	Conjunto 02	0,620	0,315	0,330	0,730	0,430	0,630
	Conj 2 (Após filtragem)	0,41	0,112	0,270	0,477	0,212	0,392

Desta forma, é possível concluir que a metodologia de filtragem empregada utilizando as ferramentas SOR e *Noise Filter* implementados no *software CloudCompare* em estágio anterior ao estabelecimento de planos de referência para medição das distâncias D1 e D2 possibilitou reduzir a tendência em todos os casos. Ao se considerar a tendência e a incerteza de medição, houve uma aproximação aos valores assumidos como verdadeiros.

Para melhor compreensão, os valores da Tabela 12 foram dispostos em ordem crescente dos valores de referência e representados graficamente na Figura

72, onde é possível observar os intervalos de confiança para as medições, utilizando os valores de incerteza Tipo A calculados.

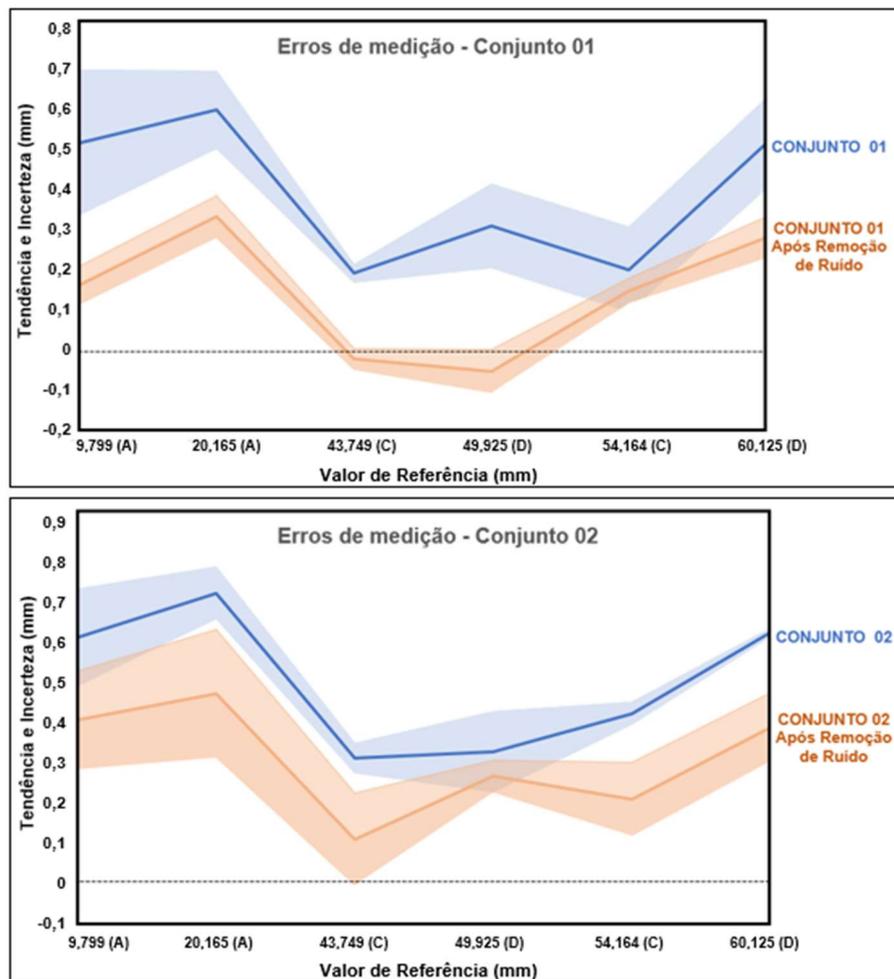


Figura 72 – Tendência e incerteza em milímetros representadas para os conjuntos 1 e 2 em relação aos valores de referência

A avaliação do desempenho do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* em diferentes distâncias foi importante para confirmar a existência de erros sistemáticos do equipamento (Tabela 10 e Tabela 11). Embora os valores encontrados para incerteza de medição e tendência estejam de acordo com as normas NIJ 0101.04 [2] e NIJ 01.01.06 [26], verificaram-se tendências maiores que 0,5 mm para medições feitas nas calotas esféricas A e D, como pode ser visto na Tabela 12 e na Figura 72.

De modo geral, nota-se que, após a remoção de ruídos pelo processo de filtragem, mais valores passaram a ser estatisticamente comparáveis com os valores assumidos como referência. Ressalta-se, por exemplo, o valor de D1 obtido para a

calota “C”, que se mostra comparável aos dados assumidos como reais (43,749 mm - AACMM) nos dois conjuntos de dados do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* após a filtragem e aplicação do algoritmo RANSAC. Considerando que D1 para a calota esférica “C” se refere aos valores próximos de 44 mm e que este valor é considerado crítico para conformidade ou não de coletes balísticos de acordo com as normas NIJ 0101.04 [2] e NIJ 01.01.06 [26], conclui-se que o processo de filtragem realizado não apenas tornou os valores do *scanner* portátil comparáveis aos valores de referência, mas também se mostrou indispensável para a correta medição neste contexto.

Os dados apresentados na Figura 72 foram posteriormente processados para que pudessem ser apresentados de forma percentual em relação às distâncias assumidas como reais. Os resultados para os conjuntos de dados 1 e 2 estão representados na Figura 73:

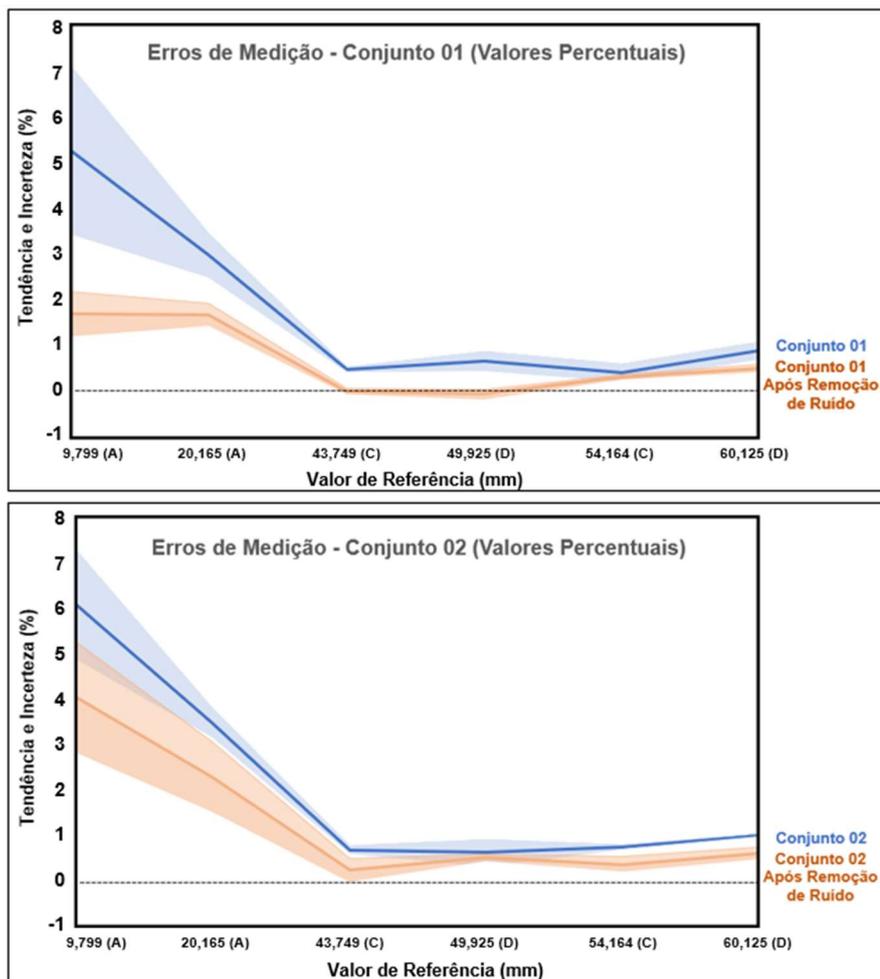


Figura 73 – Tendência e incerteza como representação percentual dos valores de referência

Como pode ser visto na Figura 73, há uma diminuição dos valores percentuais com o aumento da distância medida e o processo de filtragem contribui para a redução dos erros associados. As medições feitas para a distância de 43,749 mm apresentaram erros abaixo de 1 % para os dois conjuntos de dados após o processo de filtragem e no máximo 0,72 % para o conjunto 02 sem a filtragem realizada.

6.2.

Análise comparativa de desempenho entre scanner tridimensional de luz estruturada e reconstrução tridimensional

Após realizadas as digitalizações pelos diferentes métodos apresentados na seção 5.3, foi realizado o tratamento das nuvens de pontos com o auxílio do *software CloudCompare*. Foram comparadas as seguintes nuvens de pontos:

- Nuvem “B” – Originada da digitalização realizada com o Scanner 3D de luz estruturada (*Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*);
- Nuvem “C” – Originada da digitalização do objeto fazendo uso da reconstrução 3D (Imagens Estéreo); e
- Nuvem “D” – Obtida da digitalização da superfície da placa usinada em madeira com o *Scanner FARO Quantum^M FaroArm (Scanner 3D)*.

A aplicação do procedimento descrito na seção 5.3 possibilitou a obtenção das informações apresentadas na Tabela 13 e representadas graficamente na Figura 74.

Tabela 13 – Estimativas de profundidades para *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*, Reconstrução 3D e *FARO Quantum^M FaroArm* com ponta de apalpação

Nuvens de Pontos	Profundidades (mm)		
	Tiro 01	Tiro 02	Tiro 03
B (<i>FARO Freestyle^{3D} Objects</i> —Placa Usinada)	8,80	3,63	4,91
C (Reconstrução 3D—Placa Usinada)	8,21	3,40	4,45
D (<i>FaroArm</i> —Placa Usinada)	8,12	2,85	4,28

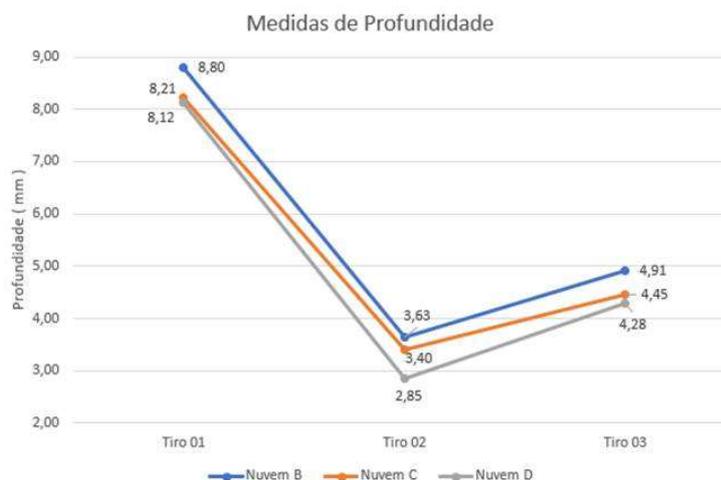


Figura 74 – Representação gráfica das medidas realizadas considerando cada nuvem de pontos e as deformações de cada trauma

Como esperado e devido à aplicação de diferentes instrumentos com distintos princípios de funcionamento, cada técnica gerou resultados diferentes para uma mesma profundidade de trauma. Comparando os resultados das nuvens B e C na Tabela 13 e também na Figura 74, foi verificado que todos os valores para a nuvem C se aproximaram mais dos valores considerados como sendo de referência em comparação com os valores obtidos da nuvem B. Tal fato caracteriza uma tendência do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* em medir valores acima dos observados para reconstrução 3D.

Adicionalmente, foi calculada a diferença entre cada medida de trauma das nuvens B e C em relação aos valores observados para a nuvem D. Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Diferenças em mm das nuvens B e D em relação à nuvem D

Nuvens	Diferenças (mm)			Valores (mm)		
	Tiro 01	Tiro 02	Tiro 03	Média	Desvio Padrão	Incerteza Padrão
Nuvem B– Nuvem D	0,68	0,78	0,63	0,70	0,08	0,04
Nuvem C– Nuvem D	0,09	0,55	0,17	0,27	0,25	0,14

Menores diferenças foram obtidas para a técnica de reconstrução 3D, permitindo concluir que a nuvem de pontos C apresentou valores de profundidade mais próximos dos valores de referência. Por outro lado, o desvio padrão e a incerteza tipo “A” foram menores para o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* como visto na Figura 74 e na Tabela 14.

O erro médio para a técnica de reconstrução 3D foi aproximadamente três vezes menor do que o observado para o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*. Somando-se ao fato de que a incerteza para a reconstrução 3D encontra-se abaixo do que estabelece a norma NIJ 0101.04 [2], isto significa que a técnica pode ser aplicada ao processo de medição de profundidades de trauma com resultados satisfatórios e até melhores do que observados para o *Scanner*⁷.

Apesar disso, destaca-se que não foi possível realizar um estudo mais aprofundado de incertezas, considerando que, para o cálculo da incerteza expandida, por exemplo, fazem-se necessários os valores referentes às fontes de incerteza do tipo “B”, como por exemplo luminosidade ambiente, refletividade das superfícies, posicionamento dos instrumentos de digitalização, desempenho de algoritmos de alinhamento e de estabelecimento de planos de referência nas nuvens de pontos e diversas outras, sendo desta forma fontes de incertezas desconhecidas. Para avaliação destas incertezas seriam necessários valores obtidos a partir de certificados de calibração ou mesmo utilização de objetos de referência certificados não disponíveis.

Levando em consideração a praticidade, o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* mostra-se mais adequado para a aplicação de interesse. Apesar dos maiores erros associados, pode-se dizer que atende aos requisitos estabelecidos pela norma NIJ 0101.04 [2]. A técnica de reconstrução 3D apresentou melhores resultados, entretanto necessita de maior aparato experimental e configuração meticulosa para que possa ser empregada assim como foi nesta comparação.

⁷ Foi produzido artigo abordando este procedimento apresentado nos itens 5.3 e 6.2. O artigo intitulado: “Comparative analysis of object digitization techniques applied to the characterization of deformed materials in ballistic tests” foi publicado na revista *Sensors* em 4 de setembro de 2020 e está localizado no Anexo D.

7

Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

Nesta dissertação realizou-se um estudo de aplicação de equipamentos de digitalização 3D em ensaios de coletes balísticos, mais especificamente para caracterizar as deformações geradas pelos impactos de projéteis nestes materiais.

Com isso, a presente pesquisa contribuiu para demonstrar que o emprego destes instrumentos é viável no processo de avaliação de conformidade de materiais balísticos e pode proporcionar um aumento da qualidade e confiabilidade do processo de medição em comparação com os métodos tradicionais utilizados (paquímetros convencionais).

Considerando que não existem normas brasileiras para ensaios de coletes balísticos e tampouco que normalizem o uso de instrumentos de digitalização 3D para aplicações em geral, esta dissertação buscou investigar o desempenho de *scanners* de luz estruturada aplicados ao ensaio de coletes balísticos na caracterização de deformações por meio de digitalizações e nuvens de pontos. Além do aspecto investigativo, foram sugeridas algumas metodologias para processamento e tratamento destas informações, com o objetivo de extrair valores de profundidade de trauma de maneira rápida e confiável.

Algumas particularidades da medição de traumas em ensaios de coletes balísticos, bem como as normas relacionadas, foram apresentadas no Capítulo 2 e ficou evidente que a utilização de paquímetros convencionais associada à metodologia empregada tradicionalmente pode ser fonte de incerteza nas medições de profundidades de trauma, sendo desta forma alcançado o primeiro objetivo específico.

Como forma de tentar caracterizar melhor os traumas e suas profundidades, foram apresentados no Capítulo 3 alguns métodos e equipamentos de digitalização 3D com suas respectivas particularidades, todos passíveis de serem empregados para a finalidade proposta com maior ou menor grau de praticidade e exatidão, atingindo-se assim o segundo objetivo específico.

A aquisição das informações constitui apenas uma etapa do processo como um todo e as nuvens de pontos oriundas das digitalizações necessitam de tratamento para que sejam extraídas as informações de interesse, conforme apresentado no Capítulo 4. Processos como alinhamento (registro), segmentação, remoção de ruídos e algumas vezes reconstrução constituem importantes etapas intermediárias para obtenção de resultados como a medição de distâncias. A pesquisa relacionada a este capítulo contribuiu não só para melhor compreensão dos dados adquiridos, como também para escolha e elaboração da metodologia empregada para tratamento das nuvens de pontos oriundas das digitalizações realizadas.

No que tange à avaliação do desempenho de Scanners de luz estruturada para aplicação em ensaios de coletes balísticos, o presente trabalho buscou realizar a verificação das medições realizadas pelo *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*. Para isso foram adotados dois procedimentos distintos e complementares que foram planejados e executados com base na pesquisa realizada e apresentada nos capítulos 2, 3 e 4 desta dissertação, atendendo ao terceiro, quarto e quinto objetivos específicos.

A metodologia empregada e demais particularidades foram detalhados no Capítulo 5, sendo que os dados e resultados foram apresentados no Capítulo 6. Estes procedimentos foram realizados com a finalidade de atender ao sexto objetivo específico, sendo possível concluir que este tipo de equipamento se mostrou adequado para a finalidade proposta por meio da aplicação da metodologia descrita nesta dissertação, considerando tanto os aspectos de aquisição dos dados quanto o tratamento das nuvens de pontos.

O sétimo objetivo específico foi atingido por meio da utilização de artefatos com semelhança geométrica aos traumas observados em plastilina, sendo possível realizar a comparação dos dados obtidos pelo *scanner* de luz estruturada com os valores assumidos como referência, medidos com o auxílio de um braço de medição por coordenadas (AACMM). Assim, foram identificados erros e tendências do *scanner*, bem como realizados cálculos de incerteza de medição deste equipamento. Neste processo, dois conjuntos de dados foram considerados para comparação com valores de referência, sendo que para o segundo conjunto melhores resultados foram obtidos, tendo em vista a observação de novos parâmetros não aplicados à primeira série de medições.

Adicionalmente, constatou-se a existência de erro sistemático em todas as medições, o que está alinhado com outros resultados obtidos na literatura, como o de Xia et al. [151]. Foram verificados valores de no máximo 0,73 mm para tendência e 0,18 mm para incerteza de medição, entretanto estes resultados não estão associados ao valor crítico de 44 mm de profundidade de trauma e tampouco comprometem a utilização do *Scanner* para medição de traumas em ensaios de coletes balísticos.

Durante o processamento dos dados, verificou-se que a aplicação de métodos de remoção de ruído em etapa anterior à determinação de planos de referência foi responsável pela melhora nos resultados observados com diminuição do erro sistemático, tornando a medição de profundidades de trauma ao redor de 44 mm comparáveis estatisticamente aos valores assumidos como referência (AACMM).

Apesar de nem todas as incertezas terem diminuído após o processo de filtragem, os valores observados ainda permanecem aceitáveis para a aplicação de interesse (coletes balísticos).

Com relação ao segundo processo de comparação realizado para verificar o desempenho do *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects* em uma aplicação real de medição, digitalizações de um objeto com deformações semelhantes às observadas em situações reais foram realizadas com o *Scanner* em questão, utilizando a técnica de reconstrução 3D e também um *Scanner 3D* localizado em um braço de medição por coordenadas, que possibilitou a obtenção de valores de referência. Nesta aplicação foi possível formular uma metodologia de tratamento eficiente para nuvem de pontos com a definição de planos dominantes por meio do algoritmo *Random Sample Consensus* (RANSAC), que possibilitou a medição padronizada de profundidades de trauma em diferentes conjuntos de dados.

Neste segundo processo, observou-se igualmente a existência de erro sistemático para o scanner de luz estruturada e foi possível constatar que a técnica de reconstrução 3D também pode servir ao propósito de medir traumas em ensaios de coletes balísticos com resultados até melhores do que os observados para o *Scanner FARO Freestyle^{3D} Objects*, entretanto a aplicação da técnica de reconstrução 3D requer maiores cuidados e consumo de tempo.

Como sugestões de trabalhos futuros de desdobramento da pesquisa, recomenda-se:

- Realizar um estudo mais aprofundado dos fatores que influenciam a aquisição de dados pelos equipamentos de digitalização 3D e a exatidão das informações, como, por exemplo, luminosidade ambiente, refletividade do objeto a ser digitalizado, distância de digitalização e ângulo de incidência dos raios luminosos sobre a superfície;
- Investigar procedimentos que poderiam ser adotados para corrigir erros sistemáticos em nuvens de pontos oriundas de digitalizações com *scanners* de luz estruturada, a exemplo daquele realizado por Colosimo et al. [74];
- Estudar e analisar a correção de toda a nuvem de pontos na orientação da distância a ser medida, no caso a profundidade. Esta correção seria executada tomando por referência os valores fornecidos por máquina tridimensional de coordenadas ou mesmo braço de medição por coordenadas;
- Analisar características volumétricas dos traumas por meio da aplicação de metodologias específicas para tratamento de nuvens de pontos, considerando que estas informações podem ser relevantes para ensaios de coletes balísticos;
- Compreender melhor os processos de filtragem e a relação destes com o resultado final das medições observadas. A reconstrução de superfície utilizando nuvem de pontos das superfícies deformadas poderia ser aplicada para finalidades metrológicas no caso de ensaios de coletes balísticos;
- Estudar a influência de algoritmos de tratamento de nuvens de pontos na estimativa de distâncias de profundidade de trauma, bem como a influência na incerteza de medição dos valores; e
- Investigar e implementar segmentação automática das nuvens de pontos com reconhecimento das regiões de trauma e estabelecimento de planos de referência para medição de trauma, reduzindo com isso

o trabalho manual e possíveis erros. Para isso, tanto poderia ser realizada a implementação computacional da metodologia descrita nesta dissertação como também poderiam ser aplicadas técnicas de *machine learning* aos dados. A economia de tempo e o aumento de confiabilidade seriam consideráveis ao possibilitar que dados brutos da digitalização pudessem gerar valores de profundidade de trauma automaticamente.

Em suma, dada a extensão do tema abordado, investigações mais abrangentes tornam-se indispensáveis sobre os aspectos: equipamentos, técnicas utilizadas para aquisição dos dados e tratamento das nuvens de pontos obtidas do processo de digitalização. Considerando a crescente aplicação dos *Scanners* tridimensionais em diversas áreas da indústria e da engenharia, tornam-se cada vez mais necessárias investigações sobre procedimentos de uso e calibração destes equipamentos para que o seu emprego seja ainda mais disseminado e promovido, considerando os inúmeros benefícios que podem ser obtidos de seu uso.

Assim, a presente dissertação buscou explorar apenas uma das inúmeras possibilidades que poderiam ser empregadas para tratar as nuvens de pontos oriundas das digitalizações de trauma e extrair delas as informações de interesse. Muitos outros algoritmos e metodologias, além das que foram aqui exploradas, estão disponíveis na literatura, particularmente nas áreas de visão computacional e robótica.

Referências bibliográficas

- 1 BRASIL. **Decreto nº 10.030, de 30 de setembro de 2019 . Aprova o Regulamento de Produtos Controlados.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D10030.htm#art6>. Acesso em: 15 out. 2019.
- 2 NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE . Ballistic Resistance of Personal Body Armor - NIJ Standard - 0101.04 . **The Encyclopedia of Crime and Punishment.**, p. 1- 4 ., 2001.
- 3 HIGH PRESSURE INSTRUMENTATION. B803-AC Remote Controlled Sample Carrier – Technical Data . 2018.
- 4 NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES. **Testing of Body Armor Materials Phase III.** Washington,DC: The National Academies Press, 2012.
- 5 HANLON, E.; GILLICH, P. Origin of the 44-mm Behind-Armor Blunt Trauma Standard. **Military Medicine**, v. 177, n. 3, p. 333–339, 2012.
- 6 BERNARDINI., F.; RUSHMEIER, H. The 3D model acquisition pipeline. **Computer Graphics Forum.**, v. 21, n. 2, p. 149- 172., 2002.
- 7 FARO TECHNOLOGIES INC. **FARO Freestyle3D Objects TechSheet**, 2016.
- 8 CUESTA, E. et al. ,Metrological evaluation of Structured Light 3D scanning system with an optical feature-based gauge ., **Procedia Manufacturing**, v. 13, n. June, p. 526–533, 2017.
- 9 CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. **BALLISTICS THEORY AND DESIGN OF GUNS AND AMMUNITION.** [s.l.] Taylor & Francis Group, 2007.
- 10 MCCOY, R. L. **Modern Exterior Ballistics.** [s.l.] Schiffer Publishing Ltd, 2012.

- 11 SELLIER, K. G.; KNEUBUEHL, B. P. **Wound Ballistics and the scientific Background**. New York: Elsevier, 1994.
- 12 ALEXANDROPOULOU, C. A.; PANAGIOTOPOULOS, E. Wound ballistics: Analysis of blunt and penetrating trauma mechanisms. **Health Science Journal**, v. 4, n. 4, p. 225–236, 2010.
- 13 HIGH PRESSURE INSTRUMENTATION. **B472 Precision Light Screen**. Disponível em: <<https://www.hpi-gmbh.com/index.php/standard-ballistic/product/view/2/12>>. Acesso em: 6 out. 2020.
- 14 HIGH PRESSURE INSTRUMENTATION. **B481 Doppler Radar System**. Disponível em: <<https://www.hpi-gmbh.com/index.php/standard-ballistic/product/view/2/31>>. Acesso em: 6 out. 2020.
- 15 PAULTER, N. G. Reference ballistic chronograph. **Optical Engineering**, v. 48, n. 4, p. 043602, 2009.
- 16 OSZ, S. Muzzle velocity measurement radar. **Aarms**, v. 11, n. 2, p. 155–186, 2012.
- 17 SCHMITT, K.-U. et al. **Trauma Biomechanics, An Introduction to Injury Biomechanics**. fifth ed. [s.l.] Springer, 2019.
- [18] DUPONT. **O que é o Kevlar?** Disponível em: <<https://www.dupont.com.br/kevlar/what-is-kevlar.html>>. Acesso em: 16 out. 2020.
- 19 MAGAZINE, P. **Everything You've Ever Wanted to Know About Body Armor and Protective Clothing**. Disponível em: <<https://pursuitmag.com/everything-youve-ever-wanted-to-know-about-body-armor-and-protective-clothing-2/>>. Acesso em: 16 out. 2020.
- 20 WICKWIRE, A. C. et al. **Thoracic response to high-rate blunt impacts using an advanced testing platform**. 49th Annual Rocky Mountain Bioengineering Symposium and 49th International ISA Biomedical Sciences Instrumentation Symposium. **Anais...2012** Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84865016279&partnerID=40&md5=001a0c53dfcfc2e1880e45ed2ec5c740>>
- 21 HAN, R. GUO et al. Experimental study of transient pressure wave in the

- behind armor blunt trauma induced by different rifle bullets. **Defence Technology**, v. 16, n. 4, p. 900–909, 2020.
- 22 LAB, B. D. **Ballistic Gel Headless Torso**. Disponível em: <<https://ballisticdummylab.com/products/ballistic-gel-headless-torso>>. Acesso em: 16 out. 2020.
- 23 TAIL, X. G.; KANNAN, R.; PRZEKOWAS, A. J. A comparative study of the human body finite element model under blast loadings. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)**, v. 2, n. August 2014, p. 829–836, 2012.
- 24 LIU, L.; FAN, Y.; LI, W. Viscoelastic shock wave in ballistic gelatin behind soft body armor. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 34, p. 199–207, 2014.
- 25 CANNON, L. Behind armour blunt trauma--an emerging problem. **Journal of the Royal Army Medical Corps**, v. 147, n. 1, p. 87–96, 2001.
- 26 NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. Ballistic Resistance of Personal BodyArmor NIJ Standard-0101.06. **NIJ Standards**, p. 74, 2008.
- 27 MAYBACH. **Saved From The Bullet**. Disponível em: <<https://maybach300c.blogspot.com/2012/07/saved-from-bullte.html>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- 28 GILLICH, B. et al. **Laser Scanner Certification study for body armor back-face deformation measurement**. Aberdeen: [s.n.].
- 29 BALBINO, F. D. P.; MEDEIROS, K. A. R.; BARBOSA, C. R. H. **Aplicação de Scanner 3D para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos**. Congresso Brasileiro de Metrologia. **Anais...** Florianópolis, SC, Brasil: Sociedade Brasileira de Metrologia, 2019
- 30 BILLON, H. H.; DSTO; COMBATANT, P. AND N. B. (AMRL). A model for ballistic impact on soft armour. p. 13, 1998.
- 31 JUSTICE, N. I. OF. **Draft NIJ Standard 01.01.07 - Ballistic Resistance of Body Armor**. Washington: [s.n.].
- 32 MILITECH. **Militech's double curve NIJ III+ 0101.06 / NIJ 0101.07 RF1 Ultra light Weight Panel - Part 2**. Disponível em: <[PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1912685/CA](https://es-</p></div><div data-bbox=)

- la.facebook.com/militechgears/videos/802075256876201/?type=1%0A>.
Acesso em: 30 set. 2020.
- 33 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Contact Measurement of Backface Deformation in Clay Backing During Body Armor Testing-ASTM E3068-17. **Standard Test Method for Contact Measurement of Backface Deformation in Clay Backing During Body Armor Testing**, p. 1–5, 2017.
- 34 VICTORY TACTICAL GEAR. **Victory Tactical Gear - Level IV #26225 Ballistic Test**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=4vL-08x7T4I%0A>>. Acesso em: 30 set. 2020.
- 35 BERNARDINI, F.; RUSHMEIER, H. The 3D Model Acquisition Pipeline. **Computer Graphics Forum**, v. 21, n. 2, p. 149–172, 1 jun. 2002.
- 36 WEBSTER, J. G. et al. Structured Light Techniques and Applications. **Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**, n. 8, p. 1–24, 2016.
- 37 RUA, J. **Exploration of FARO freestyle 3D laser scanners as a method for estimating surface fuel loading for wildland fire management**. 2018. 1–43 f. The State University of New Jersey. 2018.
- 38 LEVOY, M. et al. **The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues**. SIGGRAPH 2000. **Anais...New Orleans: 2000**
- 39 JEE, C. **This digital scan of Notre Dame offers hope for its restoration after the fire**. Disponível em: <<https://www.technologyreview.com/2019/04/16/136081/this-digital-scan-of-notre-dame-offers-hope-for-its-restoration-after/>>. Acesso em: 21 out. 2020.
- 40 BOUILLIOD, A. et al. **Preliminary study: A new method to assess the effective frontal area of cyclists**. 4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support. **Anais...Porto, Portugal: 2016**
- 41 FERRAIUOLI, P. et al. The accuracy of 3D optical reconstruction and additive manufacturing processes in reproducing detailed subject-specific anatomy. **Journal of Imaging**, v. 3, n. 4, 2017.

- 42 SA, A. M. E. et al. Coded Structured Light for 3D-Photography: an Overview. **Rita**, v. 4, n. 2, p. 109, 1999.
- 43 HERBORT, S.; WÖHLER, C. An introduction to image-based 3D surface reconstruction and a survey of photometric stereo methods. **3D Research**, v. 2, n. 3, p. 1–17, 2011.
- 44 VÁRADY, T.; MARTIN, R. R.; COX, J. Reverse engineering of geometric models—an introduction. **Computer Aided Design**, v. 29, p. 255–268, 1997.
- 45 VUKAŠINOVIC, N.; KOLŠEK, T.; DUHOVNIK, J. Case study - Surface reconstruction from point clouds for prosthesis production. **Journal of Engineering Design**, v. 18, n. 5, p. 475–488, 2007.
- 46 CURLESS, B. L. **New methods for surface reconstruction from range images**. 1997. 1–189 f. STANFORD UNIVERSITY. 1997.
- 47 CURLESS, B. From range scans to 3D models. **Computer Graphics**, v. 33, n. 4, p. 38–41, 2000.
- 48 NGOC, P.; DO, B.; NGUYEN, Q. C. A Review of Stereo-Photogrammetry Method for 3-D Reconstruction in Computer Vision. **2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)**, p. 138–143, 2019.
- 49 MENDEZ, R. L. **The rise of depth on mobile**. Disponível em: <<https://community.arm.com/developer/tools-software/graphics/b/blog/posts/the-rise-of-depth-on-mobile>>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- 50 LIN, J. **Project 3 / Camera Calibration and Fundamental Matrix Estimation with RANSAC**. Disponível em: <<http://jlin.xyz/compvision/proj3/html/index.html>>. Acesso em: 26 out. 2020.
- 51 UZUN, E. **Camera Calibration and Fundamental Matrix Estimation with RANSAC**. Disponível em: <https://www.cc.gatech.edu/classes/AY2016/cs4476_fall/results/proj3/html/euzun3/index.html>. Acesso em: 26 out. 2020.
- 52 TRUCO, E.; VERRI, A. **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**.

- New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
- 53 DHOND, U. R.; AGGARWAL, J. K. Structure from Stereo—A Review. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 19, n. 6, p. 1489–1510, 1989.
- 54 BING, P. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. **Measurement Science and Technology**, v. 29, n. 8, p. 82001–82032, 2018.
- 55 BERALDIN, J.-A.; EL-HAKIM, S.; BLAIS, F. Performance Evaluation of Three Active Vision Systems Built at the National Research Council of Canada. 1995.
- 56 HODGSON, J. R. et al. Novel metrics and methodology for the characterisation of 3D imaging systems. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 91, p. 169–177, 2017.
- 57 AECMAGAZINE. **Preview: Leica BLK360**. Disponível em: <<https://www.aecmag.com/technology-mainmenu-35/1395-preview-leica-blk360-scanner>>. Acesso em: 23 out. 2020.
- 58 FARO. **FARO® Focus Laser Scanners**. Disponível em: <<https://www.faro.com/pt-br/produtos/construction-bim/faro-focus/>>. Acesso em: 23 out. 2020.
- 59 SAN JOSÉ ALONSO, J. I. et al. Comparing Time-of-Flight and Phase-Shift. the Survey of the Royal Pantheon in the Basilica of San Isidoro (León). **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII-5/, n. September, p. 377–385, 2012.
- 60 BATLLE, J.; MOUADDIB, E.; SALVI, J. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey. **Pattern Recognition**, 1998.
- 61 GENG, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. **Advances in Optics and Photonics**, v. 3, n. 2, p. 128, 2011.
- 62 LACHAT, E.; LANDES, T.; GRUSSENMEYER, P. **Performance investigation of a handheld 3D scanner to define good practices for small**

- artefact 3D modeling**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. **Anais...**Otawa,Canada: 2017
- 63 BRASIL. **Inmetro. Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal - VIM**. Ed Luso-Br ed. Rio de Janeiro - RJ: INMETRO, 2012.
- 64 ABDEL-BARY EBRAHIM, M. 3D Laser Scanners' Techniques Overview. **International Journal of Science and Research**, v. 4, n. 10, p. 2319–7064, 2013.
- 65 HALL, E. L. et al. Curved Surface Measurement and Recognition for Robot Vision. n. June, p. 187–199, 1982.
- 66 FARO TECHNOLOGIES INC. **FARO® Quantum FaroArm® & ScanArm Series**. Disponível em: <<https://www.faro.com/products/3d-manufacturing/faroarm/>>. Acesso em: 2 out. 2020.
- 67 BRAU-AVILA, A. et al. Kinematic parameter identification procedure of an articulated arm coordinate measuring machine based on a metrology platform. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 1–4, p. 1027–1040, 2019.
- 68 HEXAGON METROLOGY. **Portable Measuring Arms**. Disponível em: <<https://www.hexagonmi.com/en-US/products/portable-measuring-arms/>>. Acesso em: 2 out. 2020.
- 69 CUESTA, E. et al. Testing coordinate measuring arms with a geometric feature-based gauge: In situ field trials. **Measurement Science and Technology**, v. 27, n. 5, 2016.
- 70 LI, F. et al. **Integrated tactile and optical measuring systems in three dimensional metrology**. Proceedings of The Queen's Diamond Jubilee Computing and Engineering Annual Researchers' Conference 2012: CEARC'12. **Anais...**2012
- 71 ZEISS. **ZEISS SPECTRUM Family**. Disponível em: <<https://www.zeiss.com.br/metrologia/produtos/sistemas/maquinas-de-medicao-de-coordenadas/portal/spectrum.html#technicaldata>>. Acesso em: 21 out. 2020.

- 72 HAMMAD MIAN, S.; AL-AHMARI, A. New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries. **International Journal of Metrology and Quality Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2014.
- 73 CARBONE, V. et al. Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 17, n. 4, p. 263–271, 2001.
- 74 COLOSIMO, B. M.; PACELLA, M.; SENIN, N. Multisensor data fusion via Gaussian process models for dimensional and geometric verification. **Precision Engineering**, v. 40, p. 199–213, 2015.
- 75 HÉBERT, P.; LAURENDEAU, D.; POUSSART, D. Scene Reconstruction and Description: Geometric Primitive Extraction from Multiple View Scattered Data. **Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, 1993.
- 76 RUTISHAUSER, M.; STRICKER, M.; TROBINA, M. Merging range images of arbitrarily shaped objects. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, p. 573–580, 1994.
- 77 BERALDIN, J. **Basic Theory on Surface Measurement Uncertainty of 3D Imaging Systems**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering · January 2009. **Anais...2009**
- 78 WANG, Y.; FENG, H.-Y. Modeling outlier formation in scanning reflective surfaces using a laser stripe scanner. **Measurement**, v. 57, p. 108–121, 2014.
- 79 BOEHLER, W.; MARBS, A. Investigating Laser Scanner Accuracy. **The International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, p. 696–701, 2003.
- 80 WEYRICH, T. et al. Post-processing of Scanned 3D Surface Data. **Symposium on Point-Based Graphics**, p. 85–94, 2004.
- 81 BOEHLER, W.; MARBS, A. 3D scanning instruments. **Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording**, p. 9–18, 2002.

- 82 WILSON, M. **What is a LiDAR scanner, the iPhone 12 Pro's camera upgrade, anyway?** Disponível em: <<https://www.techradar.com/news/what-is-a-lidar-scanner-the-iphone-12-pros-rumored-camera-upgrade-anyway>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- 83 GUO, Y. et al. Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey. **Journal of LATEX Class Files**, p. 1–24, 2019.
- 84 CARFAGNI, M. et al. Metrological and Critical Characterization of the Intel D415 Stereo Depth Camera. 2019.
- 85 FIGUEIREDO LEITE, J. V. DE; TEIXEIRA, J. M. N.; TEICHRIEB, V. Optimizing 3D object visualization on the web. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 9740, p. 287–298, 2016.
- 86 PEREIRA, F. et al. Point cloud coding: A privileged view driven by a classification taxonomy. **Signal Processing: Image Communication**, v. 85, n. October 2019, p. 115862, 2020.
- 87 ANGELA, M. et al. Methods for LiDAR point cloud classification using local neighborhood statistics neighborhood statistics. v. 8731, 2013.
- 88 FILIN, S. Surface clustering from airborne laser scanning data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 34, 2002.
- 89 WANG, G. et al. Image Reconstruction is a New Frontier of Machine Learning. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 37, n. 6, p. 1289–1296, 2018.
- 90 HE, L.; LI, Z.; CHEN, S. **Aligning algorithm of 3D point cloud model based on dimensionality reduction**. Proceedings - 2017 2nd International Conference on Multimedia and Image Processing, ICMIP 2017. **Anais...** Wuhan, Hubei, China: 2017
- 91 ZHANG, J. et al. A Review of Deep Learning-Based Semantic Segmentation for Point Cloud. **IEEE Access**, v. 7, p. 179118–179133, 2019.
- 92 RUSU, R. B.; COUSINS, S. **3D is here : Point Cloud Library (PCL)**. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. **Anais...** Shanghai, China: 2011

- 93 ALDOMA, A. et al. Point Cloud Library - Three-Dimensional Object Recognition and 6 DoFPose Estimation. **IEEE ROBOTICS & AUTOMATIONMAGAZINE**, n. September, p. 80–91, 2012.
- 94 SUGIMOTO, K. et al. **Trends in efficient representation of 3D point clouds**. Proceedings - 9th Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, APSIPA ASC 2017. **Anais...2018**
- 95 ROCA-PARDIÑAS, J. et al. From laser point clouds to surfaces: Statistical nonparametric methods for three-dimensional reconstruction. **Computer Aided Design**, v. 40, n. 5, p. 646–652, 1 maio 2008.
- 96 GIRARDEAU-MONTAUT, D. **CloudCompare (version 2.11 RC 1) GPL software]. (2020). Retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>, 2020.** Disponível em: <<https://www.danielgm.net/cc/>>
- 97 CIGNONI, P. et al. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. **Sixth Eurographics Italian Chapter Conference**, p. 129–136, 2008.
- 98 BAE, K. H.; LICHTL, D. D. A method for automated registration of unorganised point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 1, p. 36–54, 2008.
- 99 MURTIYOSO, A.; GRUSSENMEYER, P. AUTOMATIC HERITAGE BUILDING POINT CLOUD SEGMENTATION and CLASSIFICATION USING GEOMETRICAL RULES. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 2/W15, p. 821–827, 2019.
- 100 NGUYEN, A.; LE, B. **3D point cloud segmentation: A survey**. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM. **Anais...2013**
- 101 JIANG, J.; ZHANG, Z.; MING, Y. **Data segmentation for geometric feature extraction from Lidar point clouds**. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). **Anais...IEEE**, 2005
- 102 MANCERA-TABOADA, J.; RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P.; GONZALEZ-AGUILERA, D. **Turning point clouds into 3d models: The aqueduct of segovia**. Lecture Notes in Computer Science (including

- subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **Anais...**Seoul, Korea, Republic of: 2009
- 103 CHEN, M. et al. **Real-time 3D mapping using a 2D laser scanner and IMU-aided visual SLAM**. 2017 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, RCAR 2017. **Anais...**2017
- 104 ZHANG, L. et al. Visual–inertial fusion-based registration between real and synthetic images in airborne combined vision system. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 16, n. 2, p. 1–14, 2019.
- 105 MILIOTO, A. et al. **LiDAR Panoptic Segmentation for Autonomous Driving**. Proceedings of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). **Anais...**2020
- 106 RUMMELHARD, L. et al. **Ground estimation and point cloud segmentation using SpatioTemporal Conditional Random Field**. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. **Anais...**2017
- 107 BHANU, B. et al. **Range Data Processing: Representation of Surfaces By Edges**. Proceedings - International Conference on Pattern Recognition. **Anais...**1986
- 108 SAPPA, A. D.; DEVY, M. **Fast range image segmentation by an edge detection strategy**. Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 3DIM. **Anais...**2001
- 109 AL-DURGHAM, M.; HABIB, A. A Framework for registration and segmentation of Heterogeneous Lidar Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 2, p. 135–145, 2013.
- 110 RUAN, X.; LIU, B. Review of 3D Point Cloud Data Segmentation Methods. **International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls**, v. 5, n. 1, p. 66–71, 2020.
- 111 KORNILOV, A. S.; SAFONOV, I. V. An overview of watershed algorithm implementations in open source libraries. **Journal of Imaging**, v. 4, n. 10, 2018.
- 112 MANGAN, A. P.; WHITAKER, R. T. Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. **IEEE Transactions on Visualization and**

- Computer Graphics**, v. 5, n. 4, p. 308–321, 1999.
- 113 EGMENATION, S. et al. Current Methods in Image Segmentation. **Annu. Rev. Biomed. Eng.**, p. 315–337, 2000.
- 114 FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381–395, 1981.
- 115 SCHNABEL, R.; WAHL, R.; KLEIN, R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. **Computer Graphics Forum**, v. 26, n. 2, p. 214–226, 2007.
- 116 STACHNISS, C. **RANSAC - Random Sample Consensus (Cyrill Stachniss, 2020)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Cu1f6vpEilg&t=1254s>>. Acesso em: 2 out. 2020.
- 117 RUSU, R. B. et al. **Learning informative point classes for the acquisition of object model maps**. 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2008. **Anais...IEEE**, 2008
- 118 RUSU, R. B. et al. **Aligning Point Cloud Views using Persistent Feature Histograms**. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. **Anais...Nice, France: IEEE**, 2008
- 119 RUSU, R. B.; BLODOW, N.; BEETZ, M. **Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration**. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. **Anais...Kobe, Japan: 2009**
- 120 CHEN, Y.; MEDIONI, G. **Object Modeling by Registration of Multiple Range Images**. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. **Anais...Sacramento, California: IEEE**, 1991
- 121 BESL, P. J.; MCKAY, N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 14, p. 239–255, 1992.
- 122 ZHANG, Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. **International Journal of Computer Vision**, v. 13, n. 2, p. 119–152, 1994.
- 123 UNIVERSITY, S. **The “Stanford Bunny”**. Disponível em:

- <<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>>. Acesso em: 7 out. 2020.
- 124 PAVAN, N. L.; SANTOS, D. R. UM MÉTODO AUTOMÁTICO PARA REGISTRO DE DADOS LASER. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 3, p. 572–589, 2015.
- 125 WANG, Z. et al. A pose estimation system based on deep neural network and ICP registration for robotic spray painting application. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 1–4, p. 285–299, 2019.
- 126 BERGER, M. et al. **State of the Art in Surface Reconstruction from Point Clouds**. Proceedings of the Eurographics 2014, Eurographics STARs. **Anais...2014**
- 127 KHALOO, A.; LATTANZI, D. Robust normal estimation and region growing segmentation of infrastructure 3D point cloud models. **Advanced Engineering Informatics**, v. 34, p. 1–16, 2017.
- 128 BERGER, M. et al. A benchmark for surface reconstruction. **ACM Transactions on Graphics**, v. 32, n. 2, 2013.
- 129 BERNARDINI, FAUSTO; MITTLEMAN, JOSHUA; RUSHMEIER, H. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 5, n. 4, p. 349–359, 1999.
- 130 KAZHDAN, M.; BOLITHO, M.; HOPPE, H. **Poisson Surface Reconstruction**. Eurographics Symposium on Geometry Processing. **Anais...2006**
- 131 WANG, Y.; FENG, H.-Y. Outlier detection for scanned point clouds using majority voting. **CAD Computer Aided Design**, v. 62, p. 31–43, 2015.
- 132 BUADES, A. et al. A review of image denoising algorithms , with a new one
To cite this version : **A SIAM Interdisciplinary Journal, Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 4, n. 2, p. 490–530, 2010.
- 133 RAKOTOSAONA, M. J. et al. PointCleanNet: Learning to Denoise and Remove Outliers from Dense Point Clouds. **Computer Graphics Forum**, v. 39, n. 1, p. 185–203, 2019.
- 134 GAO, X.; HU, W.; GUO, Z. **Graph-Based Point Cloud Denoising**. 2018

- IEEE 4th International Conference on Multimedia Big Data, BigMM 2018. **Anais...2018**
- 135 HAN, X. F. et al. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. **Signal Processing: Image Communication**, v. 57, n. May, p. 103–112, 2017.
- 136 BRANCH, J. W.; SANCHEZ-TORRES, G.; LEAL, E. Sparse regularization-based approach for point cloud denoising and sharp features enhancement. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 11, p. 1–18, 2020.
- 137 HU, C.; PAN, Z.; LI, P. A 3D point cloud filtering method for leaves based on manifold distance and normal estimation. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, 2019.
- 138 TALKS, M. **Lidar360 & Cloud Compare - Remove outliers**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=jbCxoUUQC3k&t=857s> %0A>. Acesso em: 12 out. 2020.
- 139 GIRARDEAU-MONTAUT, D. **Noise Filter**. Disponível em: <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Noise_filter>. Acesso em: 12 out. 2020.
- 140 SOLUTIONS, C. **Correlated Solutions Catalogue**, 2018. Disponível em: <<https://www.correlatedsolutions.com/software-downloads/>>
- 141 SUTTON, M. et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method. **Image and Vision Computing**, v. 1, p. 133–139, 1983.
- 142 GIVI, M. et al. Performance evaluation of a portable 3D imaging system. **Precision Engineering**, v. 59, p. 156–165, 2019.
- 143 BAE, K.; BELTON, D.; LICHTI, D. D. A Closed-Form Expression of the Positional Uncertainty for 3D Point Clouds. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 31, n. 4, p. 577–590, 2009.
- 144 LI, L. et al. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, 2017.
- 145 LECOMPTE, D. et al. **Study and generation of optimal speckle patterns for DIC**. Proceedings of the SEM Annual Conference and Exposition on

- Experimental and Applied Mechanics 2007. **Anais...2007**
- 146 WANG, L.; DING, H.; WANG, S. **Measurement Error Compensation Using Data Fusion Technique for Laser Scanner on AACMMs**. ICIRA 2010: Intelligent Robotics and Applications. **Anais...Shanghai, China: 2010**
- 147 XUE, S. et al. Point Cloud Registration Method for Pipeline Workpieces Based on PCA and Improved ICP Algorithms Point Cloud Registration Method for Pipeline Workpieces Based on PCA and Improved ICP Algorithms. **Materials Science and Engineering**, v. 612, 2019.
- 148 SENIN, N.; COLOSIMO, B. M.; PACELLA, M. Point set augmentation through fitting for enhanced ICP registration of point clouds in multisensor coordinate metrology. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 1, p. 39–52, 2013.
- 149 WANG, J. et al. Consolidation of low-quality point clouds from outdoor scenes. **Eurographics Symposium on Geometry Processing**, v. 32, n. 5, p. 207–216, 2013.
- 150 JOINT COMITEE FOR GUIDES IN METROLOGY; JCGM100:2008; GUM1995. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. **JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections**, v. 50, n. September, p. 134, 2008.
- 151 XIA, S. et al. Comparison of different body measurement techniques: 3D stationary scanner, 3D handheld scanner, and tape measurement. **Journal of the Textile Institute**, v. 110, n. 8, p. 1103–1113, 2019.

Anexo A – Rótulo da plastilina Roma nº 01 – Utilizada em ensaios de coletes balísticos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1912685/CA

SCULPTORS THE WORLD OVER
THE FAVORITE OF SCHOOLS AND

of the sculptor's tool—whether it be today or years hence.
smooth, even texture and consistency respond perfectly to every touch
teriorate. Its uniform plasticity improves through use and with age. Its
ROMA ITALIAN PLASTILINA never will harden, crust or de-
TILINA AVOID INGESTION
accordance with the original formula for ROMA ITALIAN PLAS-
made in the U.S.A. exclusively by SCULPTURE HOUSE in strict
ROMA ITALIAN PLASTILINA the world's finest Plastilina now is

Roma Italian Plastilina, made exclusively by SCULPTURE HOUSE, is available in four degrees of consistency.

No. 1—Soft: For those who prefer an extremely plastic modeling plastilina. Best for large work.

No. 2—Medium: A slightly firmer consistency—the type most generally used by everyone for all average size work. Available in Yellow-Green, and Dove-Grey on special order.

No. 3—Medium Firm: A more consistent degree of firmness, generally used for smaller models and by those who prefer a firmer modeling plastilina. Available in Grey-Green only.

No. 4—Very hard, for small figures—Medallions—Reliefs.

ROMA PLASTILINA



DONE GENUINE WITHOUT THIS SIGNATURE



Italian

MADE IN U.S.A.



**2 libre No. 1
VERDE-GRIGIA**

**2 POUNDS No. 1
GREY-GREEN**

www.SculptureHouse.com



8 12124 00102 9

POTTERY CLAY
JOLLY KING PLASTIC CLAY

STONE & WOOD CARVING TOOLS
HANDMADE MODELING TOOLS
ARMATURES

Jolly King BRAND
SCULPTURE ACCESSORIES

BONE-WARE SELF-HARDENING CLAY
JOLLY KING
STEEL MODELING STANDS

HAND FORGED STEEL PLASTER TOOLS
ARMATURE MATERIALS
CASTING SUPPLIES

CONFORMS TO ASTM D-4236.

ARE AVAILABLE AT ART SHOPS EVERYWHERE

Always shellac any surfaces to which ROMA Italian Plastilina is to be applied. This assures better adhesion and prevents porous surfaces from absorbing some of its essential oils.

Anexo B – Artigo Publicado - CBM 2019



Aplicação de Scanner 3D para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos

Filipe Dmengeon Pedreiro Balbino¹, Khrissy Aracélly Reis Medeiros², Carlos Roberto Hall Barbosa¹

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

¹Programa de Pós-Graduação em Metrologia Qualidade e Inovação (PósMQI)

²Departamento de Engenharia Mecânica (DEM)

filipedmengeon@hotmail.com

Resumo. A utilização de *Scanner 3D* permite a digitalização de objetos por meio da captura de suas coordenadas espaciais, gerando uma nuvem de pontos representativa do modelo real. O emprego deste dispositivo tem sido muito difundido em diversos meios, que vão desde finalidades artísticas até científicas e de engenharia. Particularmente, este trabalho apresenta a aplicação deste dispositivo para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), tendo em vista o aumento da confiabilidade na avaliação destes materiais.

Palavras Chave: Ensaios de Coletes Balísticos; Medições de trauma; Scanner 3D; Paquímetro; Nuvem de Pontos.

1. Introdução

A tecnologia de digitalização de modelos e superfícies experimentou rápidos avanços desde que foi desenvolvida e implementada nos anos 80. O que inicialmente se constituía de pontas de apalpação que tocavam milhares de vezes o objeto de interesse, evoluiu para soluções que utilizavam o laser para realizar as mesmas medições. O aumento do poder computacional ao longo desses anos muito contribuiu para o avanço da tecnologia e sua acessibilidade em termos econômicos e práticos, permitindo assim a disseminação do uso de equipamentos de escaneamento tridimensional a laser em muitas aplicações para diferentes fins [1].

Objetivando caracterizar amostras de coletes balísticos em relação à resistência mecânica do material empregado e a seu comportamento mediante o impacto de munições, medições de profundidades de trauma costumam ser realizadas para determinar e quantificar o trauma observado.

Os instrumentos de medição para esta aplicação balística devem satisfazer o critério de apresentar resolução igual ou melhor do que 1 mm, como estabelece a norma NIJ 0101.04 [2]. Entretanto, tão somente o atendimento a este critério não satisfaz a necessidade de repetibilidade para os ensaios, uma vez que a qualidade da medição fica condicionada à experiência do operador [3].

Como exemplo, pode-se citar o uso do paquímetro convencional de profundidade, que atende à necessidade de resolução solicitada, mas cujo emprego pode ocasionar erros de leitura em relação ao valor real de profundidade que deveria ser medido.

Dessa forma, uma das aplicações possíveis do *Scanner 3D* refere-se à realização de medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos, dado que este equipamento apresenta como

principais vantagens a sua portabilidade, facilidade de manuseio e operação e, ainda, a geração de informações confiáveis para finalidades metrológicas.

Nesse sentido, este trabalho apresenta uma análise sobre a aplicação de um scanner a laser 3D na caracterização de materiais deformados em ensaios balísticos realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), demonstrando as vantagens e as implicações associadas às normas vigentes, a partir de uma série de medições realizadas com 8 amostras ensaiadas (8 painéis). A seção a seguir apresenta uma breve revisão dos principais trabalhos relacionados ao tema, seguida dos materiais e métodos empregados, os resultados e discussões, fechando com as conclusões.

2. Revisão Bibliográfica

A aplicação de instrumentos de digitalização 3D tem se tornado muito comum em diversas áreas, como por exemplo no levantamento de biomassa com potencial risco de inflamabilidade em florestas dos Estados Unidos [4]. O emprego de tal equipamento por biólogos, bombeiros e profissionais da defesa civil possibilitaria não só a quantificação de materiais orgânicos inflamáveis, como também a capacidade de fazer frente à ameaça de incêndios de grandes proporções.

Aplicado à modelagem 3D de artefatos, o desempenho de um scanner portátil foi investigado [5] para a definição de boas práticas na utilização deste dispositivo. Com o propósito de avaliação de precisão, foram levantados diversos parâmetros metrológicos relacionados ao equipamento e sua fidelidade em reproduzir pequenas e médias geometrias. Por meio da comparação das nuvens de pontos produzidas pelo scanner com o emprego de técnicas de fotogrametria, demonstrou-se que a repetibilidade dos resultados por vezes é influenciada pela maneira como o Scanner 3D é manuseado ao redor do objeto que se deseja digitalizar.

De modo geral, a tecnologia de digitalização 3D tem sido cada vez mais usada no levantamento de medidas antropométricas, com aplicações em áreas relacionadas à medicina, esportiva e até têxtil. Um exemplo é uma aplicação na aquisição de dados úteis para a ciência de ciclismo [6]. A digitalização de um ciclista de elite devidamente posicionado em sua bicicleta permitiu que uma modelagem quase perfeita da área frontal do indivíduo fosse realizada. Posteriormente, a varredura 3D foi analisada usando simulações de fluidodinâmica computacional (CFD), objetivando a otimização do posicionamento do atleta e diminuição do coeficiente de arrasto associado.

A utilização dos processos de digitalização 3D em grandes estátuas [7], com vistas à preservação e documentação do patrimônio histórico, permitiu o levantamento de modelos 3D de conhecidas obras clássicas. Neste trabalho, o autor ainda fez menção aos parâmetros que podem vir a influenciar a aquisição de formas e cores.

Visando a aplicações metrológicas com menor nível de incerteza, alguns dos aparelhos de digitalização 3D têm evoluído e agregado, ao sistema óptico, sistemas de medição por toque [8]. Estes sistemas híbridos resolvem este problema de incerteza e, se necessário, podem ser empregados para aquisições de maiores quantidades de dados, com maior rapidez em comparação aos sistemas convencionais de toque.

No contexto dos ensaios balísticos, a tecnologia tem contribuído não só para a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, na proposição de soluções balísticas, mas também para os ensaios de conformidade dos mesmos. Isto pode ser observado em um estudo [9] comparativo e de aplicabilidade entre os métodos de digitalização e os convencionais na medição da profundidade de trauma, no qual, foram estabelecidos diversos graus de confiabilidade dos métodos, baseados em estudos de erros associados. Inclusive, este trabalho apresentou grande relevância para estudos posteriores mais abrangentes sobre todo o processo de avaliação de conformidade de coletes balísticos.

Portanto, sabe-se que existem muitas aplicações para o Scanner 3D, como já foi mencionado, bem como uma infinidade de possibilidades ainda não exploradas para sua utilização. Assim, este trabalho visa apresentar resultados oriundos da aplicação de um Scanner 3D para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos a partir de ensaios realizados com diferentes munições em painéis, para obtenção de imagens geradas a partir do escaneamento do material de suporte, a plastilina.

3. Materiais e Métodos

3.1. Ensaio balísticos em coletes

Para avaliação de traumas em coletes balísticos, são realizados ensaios em sistemas de blindagem multicamada (SBM), utilizando munição de calibre e velocidade específicos que estejam em conformidade com a norma NIJ 0101.04 [2].

A norma supracitada estabelece diversos níveis de proteção (**Tabela 1**), que variam basicamente em função da ameaça a que estará exposto determinado colete balístico ou blindagem de uso individual e também estabelece faixas de velocidade para projéteis de cada nível.

Tabela 1 – Níveis de proteção estabelecidos pela norma NIJ 0101.04 [2].

Nível	Munição	Velocidade
I	.22LR	329 ± 9 m/s
	.380 ACP	322 ± 9 m/s
IIA	9 mm	341 ± 9 m/s
	.40 S & W	322 ± 9 m/s
II	9 mm	367 ± 9 m/s
	.357 Mag	436 ± 9 m/s
IIIA	9 mm	436 ± 9 m/s
	.44 Mag	436 ± 9 m/s
III	7.62 mm NATO	847 ± 9 m/s
IV	.30 M2 AP	878 ± 9 m/s

Os coletes necessitam ser preparados antes da realização do ensaio e essa preparação se inicia com a climatização do material por pelo menos 12 horas nas mesmas condições de temperatura e umidade em que será realizado o ensaio. Após este procedimento, ocorre a marcação dos pontos que receberão os disparos.

O material de suporte é constituído de plastilina (um tipo específico de massa de modelar), acondicionada em recipiente de 610 mm x 610 mm x 197 mm. Antes da realização do ensaio, a plastilina passa por um condicionamento de temperatura, o qual visa deixar a sua consistência semelhante àquela especificada na norma NIJ 0101.04 [2]. Para validar o condicionamento e a consistência da massa, é realizado o teste de queda (**Figura 1**), que consiste na queda de esferas com tamanho e massa padronizados da altura de 2 m, sabendo-se que as profundidades das indentações devem estar compreendidas entre 17 mm e 21 mm.

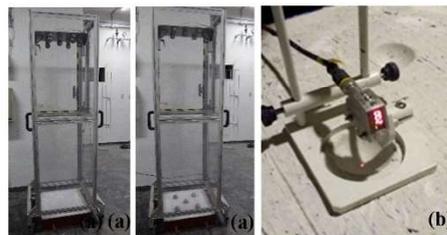


Figura 1 – (a) Teste de queda; (b) Medição de profundidade de indentação após o teste.

Com os parâmetros da plastilina validados pelo teste de queda, o ensaio segue com a fixação do colete balístico na face com a plastilina à mostra. São disparados 6 tiros contra o painel balístico, sendo que nos três primeiros são observados os critérios de deformação, que não deve exceder 44 mm de profundidade, segundo a norma NIJ 0101.04 [2]. Nos outros três disparos, apenas o critério de perfuração é observado.

Em cada painel balístico são realizadas 2 medições de profundidade, sendo utilizado sempre: o 1º tiro e, dentre o 2º e 3º tiros, é escolhido aquele que teve maior velocidade.

Para a medição da profundidade observada na plastilina, o procedimento especificado em norma consiste em: (i) o operador realiza a “raspagem” (**Figura 2**) da face que recebeu os impactos, de maneira a deixá-la plana e uniforme para a medição com o paquímetro; (ii) uma régua metálica é apoiada sobre a deformação que se deseja medir, de maneira a servir de apoio para o paquímetro; (iii) o operador localiza visualmente o local de maior profundidade; (iv) a medição é realizada com o cuidado de não inserir o paquímetro na plastilina.

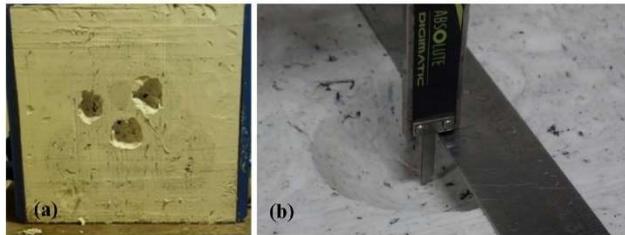


Figura 2 – (a) Plastilina após “raspagem”; (b) Medição de profundidade com paquímetro.

Neste processo de caracterização, ocorrem tipicamente alguns inconvenientes [9], tais como: Para cada “raspagem” (item i) a superfície de referência pode ser diferente, retirando menos ou mais material do que seria necessário e, ainda, a medição é em grande parte baseada na experiência do operador, conforme relatado no procedimento descrito anteriormente nos itens (ii), (iii) e (iv) o que pode ocasionar uma série de erros em sequência. Assim, ao fim do processo como um todo não se tem a certeza de que a resolução de 1 mm é atendida.

3.2. Scanner 3D a Laser

Produzido pela fabricante FARO Technologies Inc., o *FARO Freestyle3D Objects* é um scanner a laser 3D portátil, operado manualmente. Apresenta características de emprego voltadas à digitalização de pequenos e médios objetos, sendo capaz de detectá-los desde 0,3 m até 0,8 m. A incerteza de medição da nuvem gerada é geralmente menor do que 0,5 mm e a quantidade de pontos capturados por segundo pode chegar a 88000, o que justifica a grande densidade das nuvens de pontos geradas [10].

Para empregar o equipamento, composto por um projetor de luz infravermelha, duas câmeras infravermelhas e uma câmera colorida, é necessário conectá-lo a um *tablet* ou *desktop*, no qual é executado o *software* FARO Capture®.

A aquisição das informações é feita pelas duas câmeras infravermelhas que capturam um padrão projetado também em infravermelho (**Figura 3**). Baseando-se nessas informações são calculadas as coordenadas 3D por meio de triangulação. Movimentos suaves ao redor do objeto são percebidos por meio de giroscópios e acelerômetros e as informações adquiridas por estes sensores auxiliarão na composição do sistema global de coordenadas. A câmera colorida também realiza fotos em conjunto com as demais câmeras infravermelho e suas imagens servem para aprimorar os dados colhidos e adicionar informações de cores aos pontos [10].



Figura 3 – Projeção de pontos por luz infravermelha [10].

Para que a aquisição de dados possa ser realizada, além do *scanner*, existe a necessidade de outros dois softwares: *FARO Capture*® e o *FARO Process*®. O primeiro é instalado diretamente no *tablet* ou *notebook* que estará conectado diretamente ao *scanner*, oferecendo uma interface gráfica para calibração do equipamento, balanço de branco e a aquisição propriamente dita. O segundo é utilizado após a etapa de aquisição e é responsável por realizar um pós-processamento das informações, visando gerar a nuvem final de pontos. Por esse motivo, necessita ser instalado em um computador com boa capacidade de processamento.

Antes da realização de qualquer medição, é aconselhável que se realize a calibração do equipamento. Esta se dá pelo uso de uma placa de calibração fornecida pelo fabricante com alvos ópticos impressos. Como mencionado anteriormente, o software *FARO Capture*® gerencia o processo de calibração e solicita ao usuário a movimentação do *scanner* em relação à placa, de maneira a cobrir diversas distâncias, como pode ser visto na *Figura 4*.

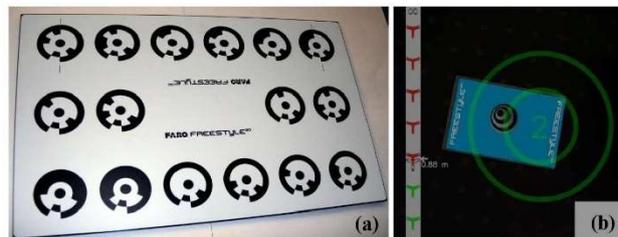


Figura 4 – (a) Placa de calibração; (b) processo de calibração visualizado no tablet [10].

Por se tratar de um equipamento que possui o sistema de triangulação como princípio de funcionamento, algumas limitações referentes à aquisição de dados devem ser consideradas. Por exemplo, luminosidade e cor são parâmetros que podem influenciar consideravelmente a aquisição de informações pelo *scanner*, pois o padrão projetado sobre o objeto pode ser atenuado ou mesmo absorvido por este. Nestes casos, o fabricante recomenda contornar o problema por meio do uso de *sprays* ou pós reveladores sobre a superfície, de maneira que esta volte a refletir o padrão infravermelho.

Com o objetivo de medir a distância entre o *scanner* e o objeto, são emitidos curtos pulsos luminosos sobre este, sendo que o equipamento faz a medição do tempo decorrido entre a emissão e a recepção da luz refletida. Assim, possíveis erros na medição de tempo do equipamento ocasionarão menor precisão na localização dos pontos digitalizados da superfície [1].

Por questões geométricas de construção do *Scanner* (posicionamento de câmeras e sensores), a distância ótima de aquisição sugerida pelo fabricante é de 50 cm, sendo que qualquer variação desta distância para mais ou para menos pode dificultar a leitura para o equipamento ou comprometer a precisão da nuvem de pontos obtida.

3.3. Procedimento de Ensaio

Nas deformações decorrentes do ensaio balístico, a profundidade de trauma é relevante para fins de avaliação da capacidade do material do colete balístico em resistir e atenuar os referidos impactos.

Assim, objetivando-se apresentar resultados oriundos da aplicação do *Scanner 3D* para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos, realizou-se um ensaio balístico em 8 painéis com 2 diferentes tipos de munições. Foram obtidas imagens e informações a partir do escaneamento em uma amostra de plastilina usada durante todo o ensaio.

Visando realizar uma comparação quantitativa, foi feita a medição da indentação causada pelo trauma na plastilina, utilizando também um paquímetro digital de profundidade modelo Mitutoyo Absolute® 150 mm, com 0,01 mm de resolução.

Após cada painel ensaiado, utilizou-se inicialmente o *Scanner 3D*, seguido do paquímetro mencionado. Tal procedimento foi necessário, pois o uso do paquímetro implicaria em aplainar a

superfície da plastilina em relação às bordas da caixa que a contém. Assim sendo, o *Scanner 3D* não poderia digitalizar deformações positivas e negativas em relação à superfície não deformada.

A configuração experimental do ensaio balístico (**Figura 5**) consistiu nos seguintes componentes:

- 1) Sistema de disparo composto de estativa, receptor de provetes e provete. Este último se constitui de um cano raiado que tem por objetivo realizar o disparo de determinado calibre e tipo de munição, podendo ser trocado conforme a necessidade do ensaio;
- 2) Barreira balística composta por dois sistemas de cronógrafos (dois *starts* e dois *stops*) para realizar a medição da velocidade do projétil. Para os níveis I, IIA, II e IIIA, fica com seu centro posicionado a 2,5 m da boca do provete balístico; e
- 3) Caixa de plastilina com colete balístico, posicionada a 5 m da boca do provete para os níveis balísticos mencionados.

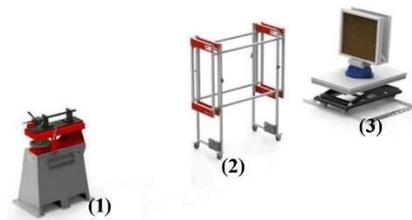


Figura 5 – Aparato experimental para ensaio de coletes balísticos [11].

Inicialmente posicionou-se o colete sobre a caixa de plastilina (já validada pelo teste de queda), foram efetuados os três primeiros disparos e em seguida procedeu-se à digitalização usando o *scanner FARO 3D Objects*. Após a digitalização, realizou-se a medição dos traumas utilizando-se também o paquímetro, com arredondamento para o valor inteiro mais próximo em milímetros.

Na sequência, o colete foi então reposicionado sobre a plastilina e realizaram-se os três outros disparos restantes. Ao término do ensaio do painel frontal deste primeiro colete, a superfície da plastilina foi aplainada novamente e seguiu-se para o ensaio do painel dorsal. Este procedimento foi repetido para mais 3 coletes usados no ensaio.

O começo da digitalização ocorreu com o scanner posicionado a aproximadamente 50 cm da caixa de plastilina, com o operador permanecendo praticamente estático com o scanner em frente à amostra e o mais perpendicular possível. A aquisição de dados durou em média de 20 a 40 segundos, sendo adquiridos de 500 mil a 1 milhão de pontos nesse intervalo de tempo. O processo foi repetido nos 7 painéis subsequentes, perfazendo 4 coletes completos (ou 8 painéis balísticos).

Ao final da etapa de aquisição, os dados foram pós-processados com o auxílio do *software FARO Process*®, responsável por tratar as nuvens de pontos e fazer alguns ajustes, eliminando ruídos, redundâncias de leitura e gerando a nuvem de pontos final.

4. Resultados e Discussões

Com a nuvem de pontos obtida pela varredura das cavidades da superfície da plastilina, o objeto de interesse pôde ser constituído e suas dimensões e profundidades determinadas por meio do emprego do *software Poliworks Inspector*®, que permitiu manipular e realizar o tratamento estatístico dos dados.

Para o tratamento da nuvem de pontos no *software Poliworks Inspector*®, buscou-se a localização de conjuntos de pontos distantes das cavidades e que não tinham sido deformados por ocasião do impacto balístico. Estes pontos serviram para a criação de um plano por meio de um ajuste entre os referidos pontos.

Uma vez criado o plano, cada cavidade foi analisada individualmente para estabelecer a distância entre cada ponto considerado e o plano recém-criado. Ao fim deste processo, foi obtido um mapa de cores onde é possível visualizar desde os mínimos até os máximos valores para deformação, conforme pode ser observado na **Figura 6**. Nesta etapa do processo de tratamento, identificou-se também o ponto que apresenta a maior distância em relação ao plano estabelecido.

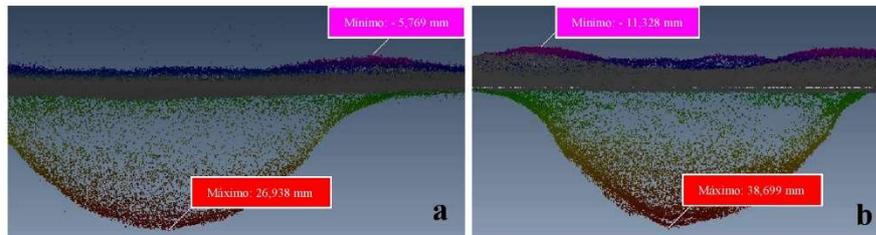


Figura 6 – Deformações digitalizadas da plastilina para (a) Calibre 9 mm e (b) Calibre .44 Mag com os respectivos valores máximos 26,938 mm e 38,699 mm.

De posse dos valores obtidos por meio dos dois métodos de medição (Paquímetro e *Scanner 3D*), foi elaborada a **Tabela 2** que apresenta, para a mesma profundidade máxima de indentação, dois resultados de medição.

Tabela 2 – Comparativo de medições realizadas com paquímetro e Scanner 3D (em milímetros).

Munição	Instrumento de medição	Medições de profundidade em cada painel balístico							
		Painel 01		Painel 02		Painel 03		Painel 04	
9 mm	Paquímetro	26,000	22,000	25,000	24,000	24,000	21,000	24,000	19,000
	Scanner 3D	26,938	22,384	24,790	25,403	23,372	20,020	23,811	19,238
	Diferença	0,938	0,384	-0,210	1,403	-0,628	-0,980	-0,189	0,238
	Diferença em relação ao paquímetro (%)	3,6	1,8	-0,84	5,9	2,6	-4,7	-0,79	1,3
.44MAG		Painel 05		Painel 06		Painel 07		Painel 08	
	Paquímetro	35,000	33,000	35,000	31,000	35,000	33,000	35,000	31,000
	Scanner 3D	35,400	33,900	38,699	32,580	35,800	33,993	34,969	32,007
	Diferença	0,400	0,900	3,699	1,580	0,800	0,993	-0,031	1,007
	Diferença em relação ao paquímetro (%)	1,1	2,7	10,5	5,1	2,3	3,0	-0,088	3,3
Média das Diferenças							0,644		
Desvio Padrão das Diferenças							1,084		

Para a maioria das comparações realizadas, observou-se que a diferença de valores entre os métodos empregados não foi superior a 1 mm, entretanto para 4 comparações as diferenças foram de 1,007 mm (painel 08), 1,403 mm (painel 02), 1,580 mm e 3,699 mm (painel 06). Em termos percentuais, esta última diferença chega a representar 10,5 % do valor medido pelo paquímetro.

Analisou-se novamente o perfil do qual a diferença em relação ao paquímetro foi máxima (**Figura 7**) e foi observada em uma diferente projeção. Percebeu-se que existe uma região de “platô” na adjacência da profundidade máxima. Tal região apresentou um valor de profundidade que coincidiu com a medição realizada pelo paquímetro. O mesmo foi observado para os outros 3 casos discrepantes. Além deste motivo, acredita-se que estas diferenças observadas entre as duas técnicas de medição empregadas se devem também a fatores tais como: o nivelamento da plastilina para realizar a medição com o paquímetro e a elevada capacidade de aquisição e amostragem do *Scanner 3D*, que possibilitou a identificação do ponto de maior profundidade. Assim, os dados gerados pelo *Scanner 3D*, além de fornecerem mais informações a respeito das profundidades consideradas, permitiram uma melhor estimativa de seus valores máximos.

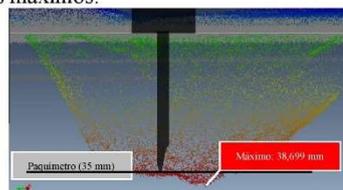


Figura 7 – Perfil de profundidade para indentação de 38,699 mm sob outro ângulo de vista e superposição da medição realizada pelo paquímetro (35 mm) para a mesma profundidade (linha preta).

5. Conclusões

O presente artigo buscou abordar a aplicação do *Scanner FARO Freestyle 3D Objects* na digitalização, metrologia e avaliação das indentações em plastilina originadas dos impactos de munições sobre coletes balísticos.

O equipamento mostrou-se confiável, proporcionando não só a verificação das maiores profundidades de cada indentação como também um aumento na quantidade de informações que pode ser retirada do ensaio em cada digitalização. Esta nova metodologia possibilita considerável incremento na confiabilidade do processo metroológico, uma vez que praticamente foi eliminada a influência do operador e seus erros associados.

Outra grande vantagem da aplicação do scanner 3D para medições de profundidades de trauma em ensaios de coletes balísticos diz respeito à possibilidade de armazenar as informações oriundas das medições realizadas, viabilizando não somente possíveis contraprovas como também a criação de um banco de dados com todas as informações colhidas. A obtenção de considerável quantidade de dados permitiria o uso destas informações para fins de séries estatísticas e de pesquisas.

Com os dados disponíveis não foi possível realizar o estudo da incerteza de medição envolvida, caracterizando a necessidade de realização de mais ensaios e maior número de amostras para avaliação deste importante parâmetro em trabalhos futuros.

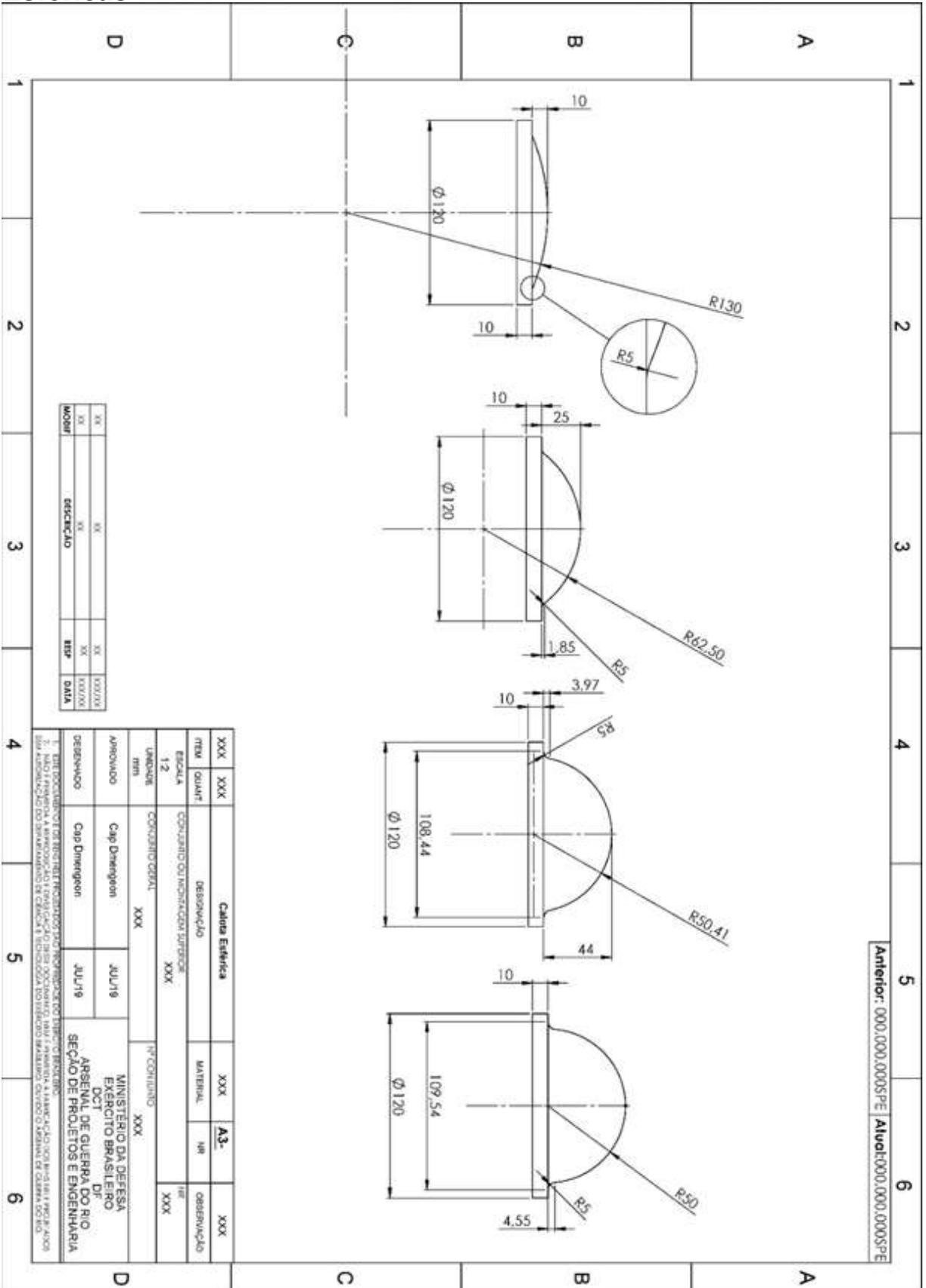
Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências de fomento CNPq, CAPES, FINEP e FAPERJ.

Referências Bibliográficas

- [1] Bernardini F and Rushmeier H 2002 The 3D Model Acquisition Pipeline *Comput. Graph. Forum* **21** 149–72
- [2] Justice N I of 2015 Ballistic Resistance of Personal Body Armor - NIJ Standard - 0101.04 *Encycl. Crime Punishm.* 1–4
- [3] Hagy D, Morgan J, Caplan M and Stoe D 2008 Ballistic Resistance of Personal Body Armor *NIJ Stand.* 74
- [4] Rua J 2018 Exploration of FARO freestyle 3D laser scanners as a method for estimating surface fuel loading for wildland fire management
- [5] Lachat E, Landes T and Grussenmeyer P 2017 Performance investigation of a handheld 3D scanner to define good practices for small artefact 3D modeling *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* vol 42
- [6] Bouillod A, Oggiano L, Soto-Romero G, Brunet E and Grappe F *Preliminary study: A new method to assess the effective frontal area of cyclists*
- [7] Levoy M, Rusinkiewicz S, Ginzton M, Ginsberg J, Pulli K, Koller D, Anderson S, Shade J, Curless B, Pereira L, Davis J and Fulk D 2000 The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues *Most* 131–44
- [8] Li, Feng ; Longstaff A 2012 Integrated tactile and optical measuring systems in three dimensional metrology
- [9] Gillich B, Walton W, Miser C, Fournier A, Hosto J, Huber J, Boughers W and Andres C 2012 Laser Scanner Certification study for body armor back-face deformation measurement
- [10] FARO 2017 FARO Freestyle 3D User Manual 174
- [11] High Pressure Instrumentation B803-AC Remote Controlled Sample Carrier – Technical Data

Anexo C – Desenho Técnico - Usinagem das Calotas Esféricas



Anexo D – Artigo Publicado - Sensors 2020



Article

Comparative Analysis of Object Digitization Techniques Applied to the Characterization of Deformed Materials in Ballistic Tests

Filipe Dmengeon Pedreiro Balbino ¹, Khriissy Aracélly Reis Medeiros ² 
and Carlos Roberto Hall Barbosa ^{1,*} 

¹ Postgraduate Programme in Metrology, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Marquês de São Vicente Street, 225, Gávea, Rio de Janeiro 22451-900, Brazil; filipedmengeon@hotmail.com

² Mechanical Engineering Department (DEM), Optical Fiber Sensors Laboratory (LSFO), Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Marquês de São Vicente Street, 225, Gávea, Rio de Janeiro 22451-900, Brazil; kmedeiros@puc-rio.br

* Correspondence: hall@puc-rio.br

Received: 23 July 2020; Accepted: 20 August 2020; Published: 4 September 2020



Abstract: Several three-dimensional scanning methods have been developed and improved over the past 40 years. The peculiarities of each technique, associated with the computational advances of the period, allowed the increasing application and diffusion of the technology in several sectors, among them those related to metrology in ballistics and the testing of protective materials. The specific goal of such ballistic tests is to estimate the depth of indentation caused by projectiles. In particular, this study presents a comparative analysis between two three-dimensional optical scanning methods, taking into account the same object of interest. The comparative analysis was based on reference planes detected by Random Sample Consensus methodology in each cloud. By comparing the results of the different techniques, it was found for this case that three-dimensional reconstruction by stereo images estimated values closer to the real ones in comparison to those estimated by the structured light scanner, mainly due to the fact that, for three-dimensional reconstruction, the image acquisition was conducted statically.

Keywords: digitization; ballistic tests; depth measurement; three-dimensional reconstruction; three-dimensional scanners

1. Introduction

From the 21st century onwards, the advancement of technology and its accessibility in economic terms made three-dimensional (3D) digitization a powerful tool. Industry and society, in general, started to have systems available for digitizing physical objects and other structures with a high geometric fidelity, based on blue/white light technologies incorporated into high-resolution optics to reproduce parts details with precision in a short time. Three-dimensional scanning instruments have evolved with touch probes added to the optical system, constituting hybrid systems that can be used to acquire larger amounts of data faster than conventional touch systems, enabling metrological applications with increasingly smaller levels of measurement uncertainty [1], which explains its recent dissemination, allowing even dimensional analyses with a high level of reliability [2].

Since then, several areas have benefited from the emergence and subsequent popularization of the aforementioned new technologies. However, their application has not been widespread in the field of body armor testing, mainly due to the belief that 3D scanning technologies are associated with equipment and software with high acquisition costs and maintenance prices. In this context, the mechanical resistance of the material used in ballistic vests and their behavior under the impact

of ammunition are conventionally assessed by measuring the depths of trauma observed in the plasticine clay.

Traditionally, calipers and similar instruments are used to measure trauma in body armor tests, because such measuring instruments meet the need for a resolution equal to or better than 1 mm, as required by the US National Institute of Justice (NIJ) standards NIJ 0101.04 [3] and NIJ 01.01.06 [4]. The caliper remains the most applied instrument in this area; however, when considering the number of necessary intermediate steps so that the trauma depth can be measured with this instrument, it yields a large uncertainty of the measured value. Additionally, considering that the measurements performed in the traditional way are highly dependent on the operator, the repeatability and reproducibility of the process may be compromised [5].

Thus, to solve this cost-related question, try to mitigate these process-related metrological problems, and provide satisfactory results for the application under discussion, surface digitization techniques were considered to reduce the number of intermediate steps and to establish some absolute benchmark against which the trauma can be measured. It is notable that conventional digitization techniques are a fertile field for applications of this type [6], added to the fact that such technology proves to be more advantageous regarding the metrological reliability of the data that it can provide [7].

Examples of conventional scanning techniques include those that use 3D scanners, such as the FARO 3D Objects Scanner [8], widely used in digitizing models and for acquiring spatial information about objects—as well as the 3D reconstruction technique using stereo images. The 3D reconstruction by stereo images is the most viable technique from the economic and implementation points of view, and is commonly applied in areas related to computer vision [9]. In addition, the 3D reconstruction technique by stereo images constitutes an important part of other more complex techniques, such as the Digital Image Correlation (DIC), whose digitization process is carried out in successive moments, making it possible to map the evolution of the object of interest over time [7].

As a result of the digitization of an object carried out by the aforementioned equipment, the three-dimensional coordinates of the points that compose that object are obtained. This set of points is called a point cloud, the composition of which usually varies from thousands to billions of points [10] and digitally represents the object of interest, with a greater or lesser degree of accuracy, depending on the equipment and technique employed [11]. Based on the data collected, the generated dense point clouds can be processed by a variety of software (Geomagic™, Polyworks™, Verisurf™, among others [12]) and used with the CAD (Computer-Aided Design) graphics software, which enables the three-dimensional reconstruction of the digitized information and even allows reverse engineering jobs [13,14].

In this sense, considering that the use of digitization technologies is not widespread in the area of body armor testing, this study aims at comparatively analyzing two techniques of the acquisition of shapes without contact applied to the characterization of deformed materials in ballistic tests. Particularly, the potential of two 3D image reconstruction techniques were assessed by comparing the point clouds generated by the techniques of structured light projection and 3D stereo image reconstruction using Charged Coupled Device (CCD) cameras.

The arrangement of this paper is as follows: Section 2 presents a short literature review regarding 3D scanning techniques; the theoretical principles of the body armor tests are given in Section 3; Section 4 presents the 3D scanning techniques used in this work; the materials and methods for the point cloud acquisition are presented in Section 5; the results and discussions are in Section 6; and the conclusions of the manuscript, including future works recommendations, are described in Section 7.

2. Review of Surface 3D Scanning

Given the wide variety of digitization techniques available, optimal results can be achieved with the application of digitization techniques and appropriate instruments for different applications, such as the survey of geodesic and forest canopy information [15]; the preservation of historical heritage [16,17]; anthropometric measurements [18]; and applications related to medicine, where it is possible to digitize

organs and structures using computed tomography and magnetic resonance, allowing subsequent manipulation by doctors and surgeons to plan and execute surgical procedures [9].

Sa et al. [19] presented a comprehensive classification of the methods available for digitizing 3D shapes. In general, the methods were divided into contact and non-contact methods. Optical techniques are classified in the latter case, including those related to 3D Scanners and 3D Reconstruction by stereo images. As a precursor reference, Higgins' work [20] stands out, which presents an algorithm that can digitally reconstruct an object based on two or more photographs of it. In this study, the author proposed a method to find the fundamental matrix F that relates the images' points to those of the object, thus allowing its 3D reconstruction. The empirical foundations of this technique are based on human vision, where the brain, when fusing two images, allows the human being to have notions of depth and distance. Fundamentally, Higgins' work [7,20] served as a basis for developing the 3D reconstruction techniques, photogrammetry, and DIC.

In 1983 and the following years, Sutton et al. [21] proposed a technique that made use of the results presented by Higgins which had at its core the "mapping" of the changes that occurred on the surface of a given object over time, allowing the analysis of displacements and deformations on a macro and microscopic scale (through the use of suitable lenses).

Regarding photogrammetry, it has become widely used as a digitization technique in geodetic sciences since the 2000s. Techniques such as Structure-From-Motion (SFM) [22] started to stand out in this scenario, mainly due to the low cost and the quality of the data set that can be obtained. The application of this technique, associated with lasers [23], the projection of light patterns [24,25], and inertial positioning systems [26], allowed the development of high-resolution 3D scanners capable of generating dense point clouds that are quite reliably faithful to the original objects.

In particular, applicability studies for 3D scanners and their comparison with conventional methods were developed by Asís et al. [27] with solar panels applications. Additionally, Xia et al. [28] made the comparison between conventional techniques and two different types of scanners, aiming at application in the textile area, while National Research Council Of The National Academies [5] studied it in the scope of the measurement of trauma depths in ballistic vest tests. The latter study was of high relevance for the area, since it served as the basis for several subsequent studies on the entire ballistic vest conformity assessment process [5].

3. Ballistic Tests on Bulletproof Vests (Body Armor)

There are currently several standards regarding the testing of ballistic vests, which vary according to the employment needs of each country or region, aiming to meet levels of protection related to certain ballistic threats. Currently the most used standardization is that formulated by the American National Institute of Justice, whose standards NIJ 0101.04 [3] and NIJ 01.01.06 [4] are widely known. For assessing the so-called "behind armor blunt trauma" in ballistic vests, standardized tests are carried out in multilayer shielding systems (MSS), using ammunition of specific calibers and speeds that comply with the aforementioned standards.

The aforementioned standards establish different levels of protection (Table 1), which vary according to the threat to which a specific ballistic vest or armor for individual use will be exposed, and also establish speed ranges for projectiles of each level.

Table 1. Levels established by NIJ 0101.04 [3].

Level	Ammunition	Speed
I	0.22 LR	329 ± 9 m/s
	0.380 ACP	322 ± 9 m/s
IIA	9 mm	341 ± 9 m/s
	0.40 S & W	322 ± 9 m/s
II	9 mm	367 ± 9 m/s
	0.357 Mag	436 ± 9 m/s
IIIA	9 mm	436 ± 9 m/s
	0.44 Mag	436 ± 9 m/s
III	7.62 mm NATO	847 ± 9 m/s
IV	0.30 M2 AP	878 ± 9 m/s

The support material for ballistic tests consists of plastiline (a specific type of modeling clay), packed in a 610 × 610 × 197 mm container. Before conducting the test, the plastiline undergoes temperature conditioning, aiming to make its consistency similar to that specified in the NIJ 0101.04 [3] standard. According to this same standard, six shots are fired at the ballistic panel, with the deformation criteria being assessed in the first three traumas, where the depth should not exceed 44 mm [3]. In the other three shots, only the perforation criterion is observed—that is, confirming that there was no perforation of the ballistic panel.

After receiving the shots, the modeling clay has the deformed aspect of Figure 1a and to measure the depths, a conventional caliper is commonly used for this application (Figure 1b).

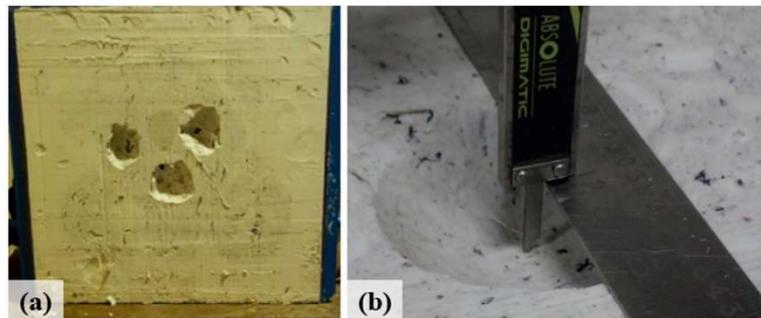


Figure 1. Original sample: (a) clay after “scraping”; (b) depth measurement with a caliper.

The use of calipers was extensively addressed in [5], and some comparisons with coordinate measuring machines and 3D scanners were made. It was found that the caliper underestimates the depth measurements because it depends on the experience of the operator. Additionally, the research concluded that the combined uncertainty for the process using the caliper, taking into account the instrument and the operator, reaches 0.823 mm. The same measurement process performed with a measuring arm able to perform 3D scans led to an estimated uncertainty of 0.145 mm, a considerably superior result. Thus, considering that the caliper remains widely used in this context, the use of non-contact technologies has been widely proposed, as is the case of several surface digitization processes [29,30].

4. 3D Scanning Techniques

4.1. Optical 3D Scanners by Structured Light Projection

In this type of equipment, the acquisition of information is conducted by two infrared cameras that capture a pattern also projected in infrared (Figure 2). Based on this information, 3D coordinates are calculated using triangulation. Smooth movements around the object are perceived by gyroscopes and accelerometers, and the information acquired by these sensors helps in the composition of the global coordinate system. A color camera also takes photos in conjunction with the infrared cameras, and its images serve to enhance the data collected and to add color information to the points [8].



Figure 2. Infrared light dot projection [8] seen with the aid of a night vision camera.

For data acquisition to be carried out, in addition to the scanner, there is a need for software to perform the post-processing information and a computer with a good processing capacity to generate the final point cloud.

Initially, before any measurement is performed, the equipment needs to be calibrated (Figure 3). To mitigate the effects of local brightness, this procedure must be performed in the same place where the digitization is to be performed. Following the manufacturer's guidelines (FARO®), the scanning must be made used at a distance between 0.3 and 0.8 m from the object, reaching a measurement uncertainty of 0.5 mm [31].



Figure 3. (a) Calibration plate; (b) calibration process displayed on the screen [8].

Structured light 3D scanners are devices that have the triangulation system as their working principle and have limitations regarding data acquisition, such as brightness and color, which may considerably affect the acquisition of information, as the projected pattern on the object can be attenuated or even absorbed by it.

In terms of operation, the distance between the scanner and the object is estimated by emitting short light pulses over it and measuring the time elapsed between the emission and the reception of the reflected light. It is emphasized that possible errors in the equipment's time measurement can reduce the accuracy in the location of the digitized points on the surface [29].

4.2. 3D Reconstruction by Stereo Images

The use of stereo images for object reconstruction is a relatively simple technique to be used and aims to obtain the dimensional information of a given object based on at least a pair of images of that object.

The process for 3D reconstruction by stereo images is widely described in the literature [32,33]. Truco and Verri [34] present the process as one of the techniques applied in computer vision.

To obtain information of interest, the following sequence must be followed:

- (a) Calibration of the cameras, which defines the internal and external parameters of the vision system used [34]. Calibration allows the acquisition to be carried out with some level of standardization of information at the level of the vision system employed, using some known reference standard (Figure 4).
- (b) Acquisition of stereo images of the same object by a pair of identical or similar cameras. It should be noted that information such as the distance between cameras and other aspects, such as the luminosity and reflectivity of the surface of interest, can influence the acquisition process, as previously mentioned.
- (c) A stereo analysis extracts information by comparing the two images and the location of objects in three-dimensional space [34].

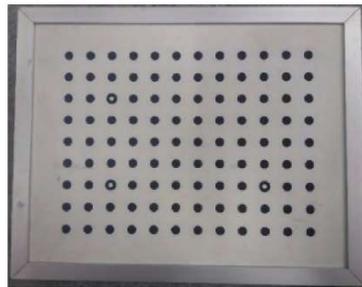


Figure 4. Plate used to calibrate the stereo camera system.

5. Materials and Methods

Aiming at comparing the two techniques of 3D reconstruction of objects described in the previous section, in the scope of application in ballistic vest tests, a digital model representative of the object of interest—the original sample—was used to carry out the comparative study. A flowchart with the sequential structure of the various processes employed in this work is shown in Figure 5, with each process being described in a separate subsection.

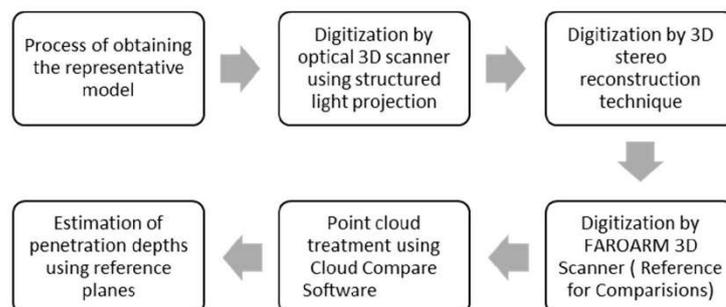


Figure 5. Flowchart of the structure of the subsections.

5.1. Process of Obtaining the Representative Model and Point Cloud

To compare the 3D digitizing techniques (Handheld 3D scanner [31], 3D reconstruction by stereo images [35], and FAROARM 3D Scanner [36]) in the present study, a standard sample was initially built on a wooden board using a 3D milling machine. This wooden sample reproduces on its surface the deformations observed in the modeling clay shown in Figure 1a and presents several advantages over the plastiline clay box originally used in the tests, such as ease of handling, portability, and the preservation of the machined shapes. Such factors make it more difficult to use the plastiline clay box as a sample to compare different techniques.

The flowchart of Figure 6 depicts the process of obtaining the representative wooden model, which was later used to obtain the point clouds defined as Cloud B, Cloud C, and Cloud D.

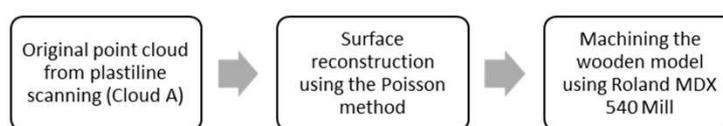


Figure 6. Flowchart of obtaining the wooden milled model.

The first digitization (Cloud A) refers to the traumas observed in the plastiline (original sample) after the impact on a particular ballistic vest. This first point cloud was obtained using the 3D FARO 3D Objects Scanner [8], with a reading time of approximately 30 s and a distance of approximately 50 cm from the object.

Based on this initial point cloud, properly treated with the aid of the Cloud Compare software [37], to eliminate points and unwanted artifacts present in the digitization, it was possible to obtain a cloud containing only the plastiline face deformed by the impacts (Figure 7a). A surface was then obtained (Figure 7b), using the Poisson surface reconstruction method [38].

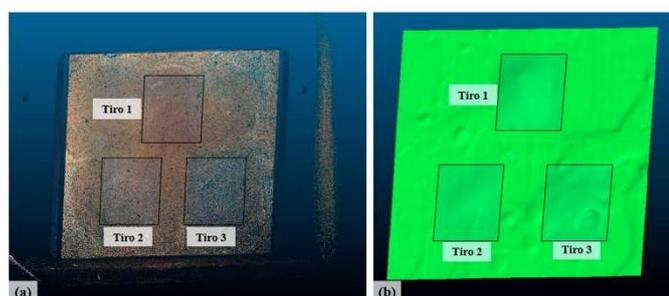


Figure 7. Digitization of plastiline (original sample): (a) cloud A and (b) the surface treatment, cleaning, and reconstruction of the region of interest using the Poisson method.

Because of the aforementioned implications for the original sample, the object in Figure 7b was then used to make a physical model in wood (26.5 cm × 37.5 cm) using a Roland MDX-540 milling machine. Figure 8 shows the wooden model obtained. The use of this approach sought to obtain representativeness of the traumas that are usually observed in the execution of ballistic tests.

This manufactured physical model (MPM) was then subjected to three different digitization processes, as follows.

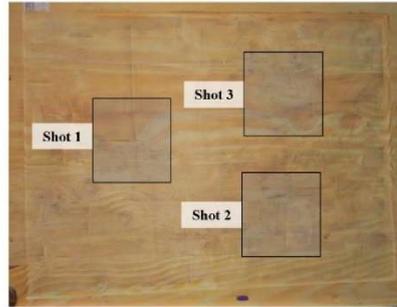


Figure 8. Milling: physical model made of wood.

5.2. Digitization by the Optical 3D Handheld Scanner Using Structured Light Projection

The wooden sample described in the previous section was first digitized using a structured light scanner manufactured by FARO, called the FARO 3D Objects 3D Scanner [31]. The scanner was previously calibrated using the manufacturer's recommendations, and data acquisition was performed at the suggested optimal distance of 50 cm for 30 s. To generate the final point cloud, the FARO Capture and FARO Process software were used. As a result of this process, point cloud B shown in Figure 9 was obtained.

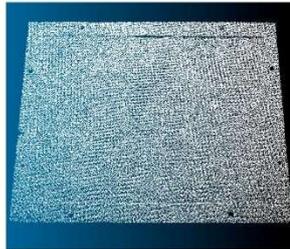


Figure 9. Point Cloud B, generated using the 3D Scanner FARO 3D Objects.

5.3. Digitization by 3D Stereo Reconstruction Technique

To digitize the wooden sample using the 3D reconstruction technique using stereo images, it was necessary to prepare the plate's surface by dyeing it white and randomly inserting black dots on it (known as speckles). After that, it was possible to adjust and provide the 3D reconstruction software with the correct location of each surface region. In a real application, it is possible to project some light pattern on the clay box or add little black spheres and mix it with clay. The process of painting the plastiline surface proves to be unfeasible, both because of the oily nature of the modeling clay and because of the large amount of time spent in the process, compromising ballistic tests.

Once pigmented (Figure 10), the sample was then positioned, with the aid of fasteners, approximately 2 m from a pair of identical CCD cameras. The calibration of these cameras was made using a plate with holes with standardized distances to provide the correct information to the reconstruction software.

Once the system was adjusted, the simultaneous capture of the images by the two CCD cameras is shown in Figure 11.

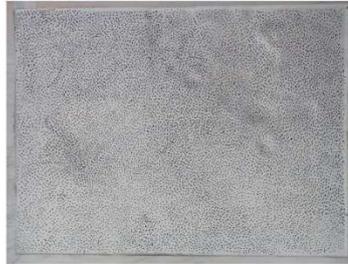


Figure 10. Physical model pigmented with aleatory black dots (speckles).

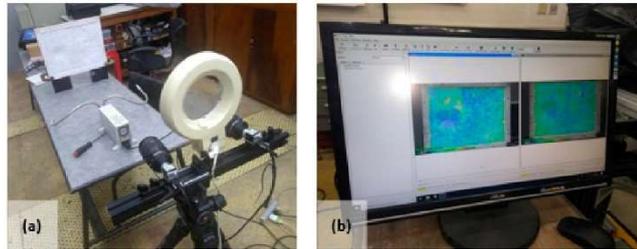


Figure 11. Stereo image capture process: (a) test setup for stereo image capture and (b) 3D reconstruction software.

From the information collected, the point cloud representing the surface of the wooden sample could be estimated using the 3D reconstruction software, VIC 3D, from the company Correlated Solutions, making it possible to obtain Point Cloud C shown in Figure 12.

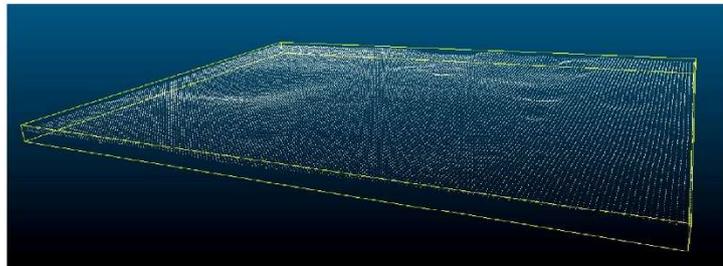


Figure 12. Point Cloud C from digitalization via 3D reconstruction by stereo images.

5.4. Digitization by FAROARM® 3D Scanner.

This work aims to compare the results from two digitization techniques (structured light and 3D reconstruction). For this purpose, the results must be compared with some ground truth measurements. The FAROARM 3D Scanner (Figure 13) was selected for this purpose for the following reasons: availability, a measurement uncertainty of $\pm 25 \mu\text{m}$, the acquisition of a large number of points (2000 points per line with $40 \mu\text{m}$ of minimum spacing) [36] in a short period, and the possibility of scanning the whole machined physical model (MPM). The use of a Coordinate Measuring Machine (CMM) with a better accuracy would be more time consuming, and probably the deepest point on the surface would not be measured. The point cloud that originated from this process was named “Point Cloud D”.

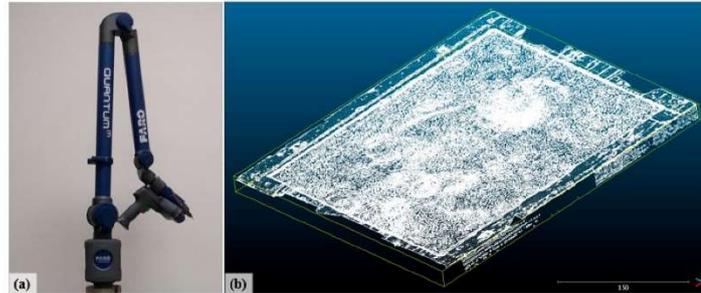


Figure 13. FAROARM 3D Scanner [36] (a) and the result of the machined physical model scanning process, (b) presented through the software CloudCompare.

5.5. Point Cloud Treatment via Cloud Compare Software

At the end of the data acquisition by different techniques, the next step consisted of processing and subsequent comparison between the three point clouds: Cloud B (digitization via structured light scanner) with Cloud D (obtained from the FAROARM 3D Scanner), and Cloud C (scanning via stereo images) with Cloud D.

To this end, the delimitation and extraction of a region of common interest to the three point clouds were carried out for all clouds, as shown in Figure 14 for point Cloud A.

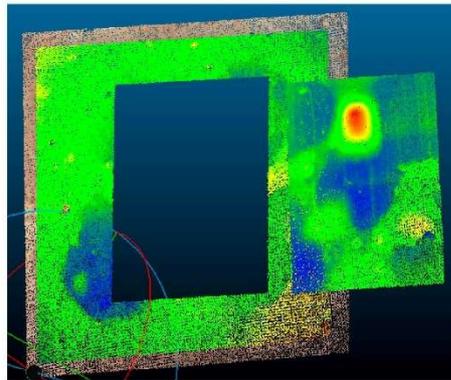


Figure 14. Extraction of the Cloud A region of interest.

In Figure 15, it is possible to see the regions of interest extracted from the point clouds that correspond to Clouds A, B, C, and D.

To achieve the results presented in Figure 15, an alignment process was carried out between clouds A, B, C, and D using the Interactive Closest Point (ICP) algorithm proposed by Besl et al. [39] and Zhang [40]. During the treatment of the point clouds, the ICP algorithm allowed the identification of non-coincident regions between the clouds, which were eliminated. This rough alignment was necessary to extract the same region of interest of all clouds and consider it to estimate the reference planes. The application of this algorithm is quite widespread today to perform alignments between point clouds, and it proves to be quite reliable for high-accuracy applications, as proposed by Xue et al. [41] and Senin et al. [42], who applied the ICP algorithm to align point clouds with different point densities, as is the case in this work.

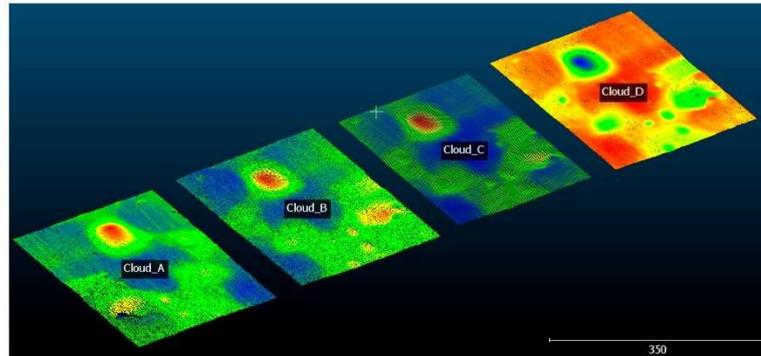


Figure 15. Point clouds A, B, C, and D.

After cloud segmentation, an algorithm based on the Random Sample Consensus (RANSAC) method proposed by Schnabel et al. [43] and implemented in the CloudCompare software was applied to detect an existing planar region in each cloud (Figure 16). The criterion used to estimate planes was mainly the predefined angle $\alpha < 25^\circ$, which considers the angle between the normal of the candidate plane and the normal of the plane, initially defined by the three points chosen randomly at each iteration of the adjustment process of the best plane [43]. This plane was used as a reference plane and to determine a scalar field in each point cloud and finally measure the maximum depth for each trauma.

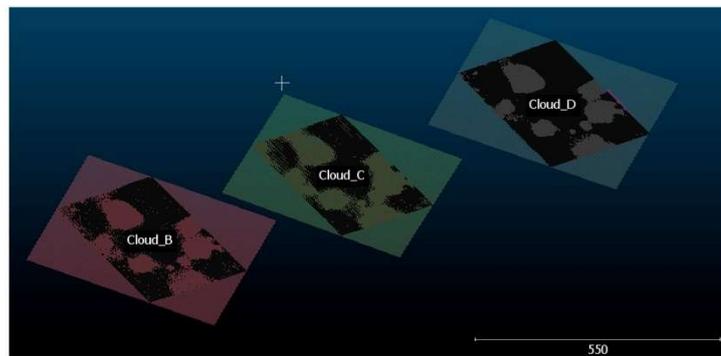


Figure 16. Random Sample Consensus RANSAC applied to clouds B, C, and D, and reference planes for each data set.

Concerning this, RANSAC was selected for the reasons described in [44], mainly due to the robustness with which it can handle outliers and clouds of different sizes. Considering that our data only have smoothed sloped surfaces, RANSAC has good behavior when applied to this data set to recognize planes.

5.6. Estimation of Penetration Depths Using Reference Planes

Once the reference planes were successfully estimated for each point cloud, it was possible to recognize the trauma regions in each set of points (Figure 17). These regions were manually segmented and had their depth measured using the reference plane previously defined.

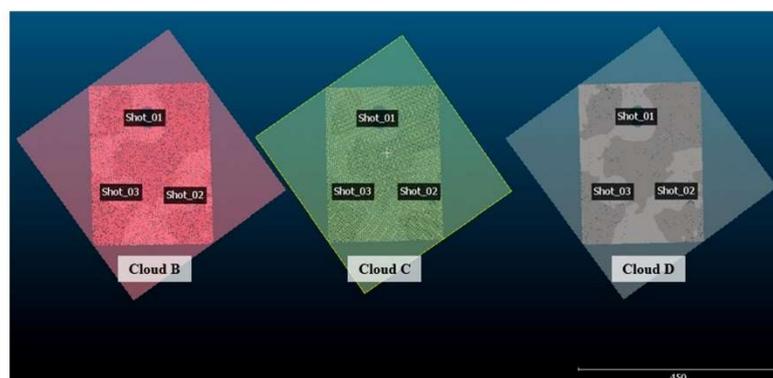


Figure 17. Trauma regions identified in clouds B, C, and D.

Finally, to compare the performance of the techniques used, the maximum depth values measured were extracted from the scalar fields computed for each cloud and compared.

6. Results and Discussions

With the application of the procedure described in the previous section, it was possible to obtain the information described in Table 2 and shown in Figure 18. The table and the figure contain information on the measurement results, using the FAROARM point cloud measurements as a reference.

Table 2. Depth estimates from the measurements made with a 3D handheld Scanner, 3D Reconstruction, and FAROARM 3D Scanner.

Clouds	Depth Estimates (mm)		
	Shot 01	Shot 02	Shot 03
B (Handheld Scanner—Milled Plate)	8.80	3.63	4.91
C (3D Reconstruction—Milled Plate)	8.21	3.40	4.45
D (FARO Arm Scanner—Milled Plate)	8.12	2.85	4.28

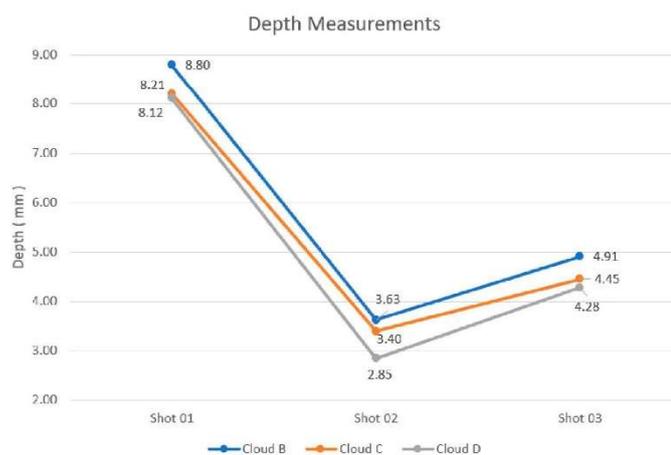


Figure 18. Graphical representation of the measurements taken considering each point cloud and also the deformations of the traumas.

As expected, due to the different measuring principles and instrument performances, each technique generated different results for the depth of the same shot. Comparing the results of Clouds B and C in Table 2 and Figure 18, it was found that the values of Cloud C were lower in their entirety, characterizing a trend of the technique of 3D reconstruction by stereo images to yield depth values below those observed for the 3D Handheld Scanner.

With the values obtained for each depth measurement, the differences between the depths of point clouds B and C in relation to the point cloud taken as reference (Cloud D) were calculated. The difference values obtained are presented in Table 3, and also the average of the errors, the standard deviation, and the type “A” uncertainty.

Table 3. Differences in mm for the depth estimates made using cloud D as a reference.

Clouds	Differences in mm				Values in mm	
	Shot 01	Shot 02	Shot 03	Average	Standard Deviation	Uncertainty
Cloud B–Cloud D	0.68	0.78	0.63	0.70	0.08	0.04
Cloud C–Cloud D	0.09	0.55	0.17	0.27	0.25	0.14

Lower differences were obtained for the 3D reconstruction technique, and it is possible to assume that these results are very close to the actual values. Although the standard deviation and type “A” uncertainty are smaller for the handheld scanner, as seen in Figure 18 and Table 3, the average error was about three times higher than that observed for the 3D reconstruction technique, which demonstrates that this technique can be applied in this measurement process with satisfactory results and even better than using the handheld 3D scanner. The maximum difference observed was 0.78 mm for the handheld 3D Scanner, below the 1 mm resolution defined by the NIJ 0101.04 [3] standard, allowing the application of both techniques in the measurement process considered. Xia et al. [28] obtained very similar results when comparing a handheld scanner and a static scanner. Although the results were for the comparison between the two scanners, it is possible to establish common points between the present work and the one presented by Xia et al. In both works, the best results were obtained by static acquisition techniques.

In practical terms, despite the larger associated errors, the handheld 3D scanner is more suitable for the application of interest, considering that it still meets the standard requirements, mainly due to its ease of use. Even though the 3D reconstruction technique has shown better results than the handheld 3D scanner at a relatively low associated cost, its application is more challenging because of the configuration for acquiring images of this type of test in question. On the other hand, the measuring arm stands out as the best solution; however, the cost involved—of up to five to six times more than the handheld unit—would make its application unfeasible.

7. Conclusions and Future Work

Intending to evaluate the applicability of the 3D reconstruction technique in measuring trauma in body armor tests, the present work sought to compare different 3D scanning techniques, comparing the point clouds obtained from the same object of interest.

It was possible to compare the results using the RANSAC methodology, and it was found that, for the experiments carried out, although the variability is higher for the reconstruction method compared to digitization using the scanner, the 3D reconstruction using stereo images showed values closer to the real values for all measurements performed in the regions of interest. It was observed that the average of the observed errors was also considerably lower.

The results using 3D reconstruction obtained satisfactory results for the comparison in question. Some reasons may explain this good performance:

- As the 3D reconstruction technique is based on the use of stereo images of a given object, and considering that the surface presented relatively small deformations when compared to others commonly observed in ballistic tests, the focal distance for capturing the images allowed good depth estimates. The observed fact also explains the ease in establishing reference plans using the RANSAC methodology. Possibly, the result would be different with very deformed surfaces.
- For 3D Scanner data acquisition, the operator must do some small movements around the object of interest, and these movements can be a source of error. In the 3D reconstruction process, the acquisition is made statically.

Considering that the results of 3D reconstruction were satisfactory in the study in question, further investigations would be necessary to understand the maximum depth values to be measured by this technique without losing the accuracy required for compliance with the current standards.

Three-dimensional scanning instruments used for the intended application bring numerous benefits, such as the possibility of the automated measurement of traumas through the recognition of shapes and algorithms, the elimination or reducing of the operator's influence on measurements, and the possibility of archiving the scans as part of the process.

Additionally, it was observed that, despite the specific software employed in this study being an effective tool, it would be interesting to develop a specific computational implementation for this purpose. The application of an automated signal processing algorithm would be simpler and would reduce the time spent in the entire process.

Considering that the treatment of point clouds was extremely relevant for the extraction of information of interest, special attention should be given to the process in order to find the best methods for establishing reference planes, removing outliers, and identifying points of larger depth in trauma regions.

Bearing in mind that some factors, such as the luminosity, distribution and quantity of speckles, and focal length, can influence the results obtained, further experimental investigations would be necessary to analyze how each of these can influence the measurement.

The use of the feature point histogram technique, as identified in the works [41,45], and some variations [46] that use histograms to identify objects in the clouds associated with machine learning techniques are promising, since it would be possible to automatically recognize trauma regions.

Finally, for future research, the possibility of using mathematical tools and methodologies as proposed by Pandey et al. [47] can be applied, which would make use of the information present in point clouds to perform the alignment, taking as reference the dominant planes present in each set. Projection Pursuit [48] or Principal Component Analysis (PCA) [49] can be used to find the dominant plane in point clouds originated from trauma scans, as was explored in the present study, and can be used as a reference for depth measurements.

It is also believed that the tests performed can be repeated considering a larger number of points of interest. Another possibility is a flatness study for different digitization techniques. However, for this, it would be necessary to scan a calibrated surface plate, as it would thus be possible to observe possible "deformations" between the techniques, which evidently would demand more experimental work.

Author Contributions: Methodology, F.D.P.B., K.A.R.M. and C.R.H.B.; Software, F.D.P.B.; Investigation, F.D.P.B., K.A.R.M. and C.R.H.B.; Writing—original draft preparation, F.D.P.B.; Writing—review and editing, F.D.P.B., K.A.R.M. and C.R.H.B.; Supervision, K.A.R.M. and C.R.H.B.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank for the financial support provided by the Brazilian funding agencies CNPq, CAPES, FINEP, and FAPERJ. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Finance Code 001.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Li, F.; Longstaff, A. Integrated tactile and optical measuring systems in three dimensional metrology. In Proceedings of the Queen's Diamond Jubilee Computing and Engineering Annual Researchers' Conference 2012: CEARC'12, Huddersfield, UK, 26 April 2012; pp. 1–6.
- Webster, J.G.; Bell, T.; Li, B.; Zhang, S. Structured Light Techniques and Applications. *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.* **2016**, 1–24. [CrossRef]
- National Institute Of Justice. Ballistic Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standard—0101.04. *NIJ J.* **2001**, 1–4. [CrossRef]
- National Institute Of Justice. Ballistic Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard—0101.06. *NIJ J.* **2008**, 74. [CrossRef]
- National Research Council Of The National Academies. *Testing of Body Armor Materials Phase III*; National Research Council of the National Academies: Washington, DC, USA, 2012; ISBN 9780309255998.
- Rubio, I.; Antonio, D.Á.; Bernier, R.; Rusinek, A.; Loya, J.A.; Miguelez, M.H.; Rodr, M. Postmortem Analysis Using Different Sensors and Technologies on Aramid Composites Samples after Ballistic Impact. *Sensors* **2020**, 2853. [CrossRef]
- Bing, P. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. *Meas. Sci. Technol.* **2018**, 29, 82001–82032.
- FARO Technologies, Inc. FARO Freestyle 3D User Manual 2017. Available online: https://knowledge.faro.com/Hardware/Legacy-Hardware/Freestyle/User_Manual_for_Freestyle3D-SCENE_Capture_and_SCENE_Process (accessed on 21 August 2020).
- Ferraiuoli, P.; Taylor, J.C.; Martin, E.; Fenner, J.W.; Narracott, A.J. The accuracy of 3D optical reconstruction and additive manufacturing processes in reproducing detailed subject-specific anatomy. *J. Imaging* **2017**, 3, 45. [CrossRef]
- Sugimoto, K.; Cohen, R.A.; Tian, D.; Vetro, A. Trends in Efficient Representation of 3D Point Clouds. In *2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; pp. 364–369. [CrossRef]
- Roca-Pardiñas, J.; Lorenzo, H.; Arias, P.; Armesto, J. From laser point clouds to surfaces: Statistical nonparametric methods for three-dimensional reconstruction. *Comput. Aided Des.* **2008**, 40, 646–652. [CrossRef]
- Ebrahim, M.A.B. 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *Int. J. Sci. Res.* **2013**, 4, 2319–7064.
- Várady, T.; Martin, R.R.; Cox, J. Reverse engineering of geometric models—An introduction. *Comput. Aided Des.* **1997**, 29, 255–268. [CrossRef]
- Anwer, N.; Mathieu, L. From reverse engineering to shape engineering in mechanical design. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* **2016**, 65, 165–168. [CrossRef]
- Rua, J. Exploration of FARO Freestyle 3D Laser Scanners as a Method for Estimating Surface Fuel Loading for Wildland Fire Management. Diploma Thesis, Rutgers University, Camden, NJ, USA, 2018. [CrossRef]
- Levoy, M.; Rusinkiewicz, S.; Ginzton, M.; Ginsberg, J.; Pulli, K.; Koller, D.; Anderson, S.; Shade, J.; Curless, B.; Pereira, L.; et al. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. *Most* **2000**, 131–144.
- Rodríguez-Martín, M.; Rodríguez-González, P. Suitability of Automatic Photogrammetric Reconstruction Configurations for Small Archaeological Remains. *Sensors* **2020**, 2936. [CrossRef] [PubMed]
- Bouillod, A.; Oggiano, L.; Soto-Romero, G.; Brunet, E.; Grappe, F. Preliminary study: A new method to assess the effective frontal area of cyclists. In Proceedings of the 4th International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support, Porto, Portugal, 7–9 November 2016.
- Sa, A.M.E.; Filho, E.S.D.M.; Carvalho, P.; Velho, L. Coded Structured Light for 3D-Photography: An Overview. *Rita* **1999**, 4, 203–219.
- Longuet-Higgins, H.C. Longuet-Higgins A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections. *Nature* **1981**, 293, 133–135. [CrossRef]
- Sutton, M.; Wolters, W.; Peters, W.; Ranson, W.; McNeill, S. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vis. Comput.* **1983**. [CrossRef]
- Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* **2012**, 179, 300–314. [CrossRef]

23. Isa, M.A.; Lazoglu, I. Design and analysis of a 3D laser scanner. *Measurement* **2017**, *111*, 122–133. [CrossRef]
24. Battle, J.; Mouaddib, E.; Salvi, J. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey. *Pattern Recognit.* **1998**. [CrossRef]
25. Stančić, I.; Musić, J.; Zanchi, V. Improved structured light 3D scanner with application to anthropometric parameter estimation. *Measurement* **2013**, *46*, 716–726. [CrossRef]
26. Chen, M.; Yang, S.; Yi, X.; Wu, D. Real-time 3D mapping using a 2D laser scanner and IMU-aided visual SLAM. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, Okinawa, Japan, 14–18 July 2018; pp. 297–302.
27. De Asís López, F.; García-cortés, S.; Roca-pardiñas, J.; Ordóñez, C. Geometric optimization of trough collectors using terrestrial laser scanning: Feasibility analysis using a new statistical assessment method. *Measurement* **2014**, *47*, 92–99. [CrossRef]
28. Xia, S.; Guo, S.; Li, J.; Istook, C. Comparison of different body measurement techniques: 3D stationary scanner, 3D handheld scanner, and tape measurement. *J. Text. Inst.* **2019**, *110*, 1103–1113. [CrossRef]
29. Bernardini, F.; Rushmeier, H. The 3D model acquisition pipeline. *Comput. Graph. Forum.* **2002**, *21*, 149–172. [CrossRef]
30. Boehler, W.; Marbs, A. 3D scanning instruments. *Proc. CIPA WG 6 Int. Work. Scanning Cult. Herit. Rec.* **2002**, 9–18. [CrossRef]
31. FARO Technologies Inc. *FARO Freestyle3D Objects TechSheet*. 2016. Available online: https://knowledge.faro.com/Hardware/LegacyHardware/Freestyle/Technical_Specification_Sheet_for_the_Freestyle3D (accessed on 21 August 2020).
32. Ma, Z.; Liu, S. A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications. *Adv. Eng. Inform.* **2018**, *37*, 163–174. [CrossRef]
33. Khan, U.; Yasin, A.U.; Abid, M.; Awan, I.S.; Khan, S.A. A Methodological Review of 3D Reconstruction Techniques in Tomographic Imaging. *J. Med. Syst.* **2018**, *42*. [CrossRef] [PubMed]
34. Truco, E.; Verri, A. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1998.
35. Correlated Solutions, Inc. VIC-3D 8 System. Available online: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-3d> (accessed on 21 August 2020).
36. FARO Technologies Inc. Technical Specification Sheets for the Quantum FaroArm/ScanArm and Gage. Available online: https://knowledge.faro.com/Hardware/FaroArm_and_ScanArm/FaroArm_and_ScanArm/Technical_Specification_Sheets_for_the_Quantum_FaroArm-ScanArm_and_Gage (accessed on 21 August 2020).
37. CloudCompare (Version 2.11 RC 1) [GPL Software]. 2020. Available online: <http://www.cloudcompare.org/> (accessed on 21 August 2020).
38. Kazhdan, M.; Bolitho, M.; Hoppe, H. Poisson Surface Reconstruction. *Eurographics Symp. Geom. Process.* **2006**, *7*, 61–70.
39. Besl, P.J.; McKay, N.D. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **1992**, *14*, 239–255. [CrossRef]
40. Zhang, Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *Int. J. Comput. Vis.* **1994**, *13*, 119–152. [CrossRef]
41. Xue, S.; Zhang, Z.; Lv, Q.; Meng, X.; Tu, X. Point Cloud Registration Method for Pipeline Workpieces Based on PCA and Improved ICP Algorithms. *Mater. Sci. Eng.* **2019**, *612*. [CrossRef]
42. Senin, N.; Colosimo, B.M.; Pacella, M. Point set augmentation through fitting for enhanced ICP registration of point clouds in multisensor coordinate metrology. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **2013**, *29*, 39–52. [CrossRef]
43. Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. *Comput. Graph. Forum* **2007**, *26*, 214–226. [CrossRef]
44. Li, L.; Yang, F.; Zhu, H.; Li, D.; Li, Y.; Tang, L. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 433. [CrossRef]
45. Ackermann, F. Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. *Photogramm. Rec.* **2006**, *11*, 429–439. [CrossRef]
46. Sidor, K.; Wysocki, M. Recognition of Human Activities Using Depth Maps and the Viewpoint Feature Histogram Descriptor. *Sensors* **2020**, *20*, 2940. [CrossRef]

47. Pandey, G.; Giri, S.; McBride, J.R. Alignment of 3D point clouds with a dominant ground plane. In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, BC, Canada, 24–28 September 2017; pp. 2143–2150.
48. Friedman, J.H.; Tukey, J.W. A Projection Pursuit Algorithm for Exploratory Data Analysis. *IEEE Trans. Comput.* **1974**, *23*, 881–890. [[CrossRef](#)]
49. Rahmani, H.; Mahmood, A.; Du, Q.H.; Mian, A. Hopc: Histogram of oriented principal components of 3d pointclouds for action recognition. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Zurich, Switzerland, 5–12 September 2014; pp. 742–757.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Apêndice A – Testes Estatísticos Aplicados

Conforme descrito no capítulo 6, foram aplicados os seguintes testes estatísticos nos dados: teste de Shapiro-Wilk, testes f (*Fischer-Snedecor*) e testes t de Student. Os testes foram realizados ao nível de confiança de 95 %, com obtenção de valor p para cada conjunto de medições, sendo este considerado para aceitação ou rejeição da hipótese nula.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

O teste de normalidade de Shapiro–Wilk foi realizado no software R, que na sua implementação faz uso dos seguintes passos:

- 1) Ordenação das amostras em ordem crescente de valores;
- 2) Cálculo da soma dos quadrados dos desvios:

$$Soma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

- 3) Cálculo de um coeficiente b com base no número de amostras de cada conjunto:

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} (x_{(n-i+1)} - x_i) , n \text{ par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} (x_{(n-i+1)} - x_i) , n \text{ ímpar} \end{cases}$$

Onde a_n é um coeficiente tabelado.

- 4) Cálculo da estatística do teste:

$$W = \frac{b^2}{Soma^2}$$

- 5) Comparação do valor obtido com o valor tabelado;
- 6) Aceitação ou não da hipótese nula de normalidade ao nível de significância de 5% (Valor- $p > 0,05$).

Teste *f* (*Fischer-Snedecor*)

O teste objetiva comparar variâncias de duas amostras independentes e necessita que ambas sejam normalmente distribuídas:

$$\bar{X} \sim N\left(\mu_1, \frac{\sigma_1^2}{n_1}\right) \text{ e } \bar{Y} \sim N\left(\mu_2, \frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)$$

Uma vez que se deseja comparar as variâncias, sabe-se que a razão seguinte segue distribuição Qui-quadrado com $n - 1$ graus de liberdade:

$$Q = \frac{(n - 1)s^2}{\sigma^2} \sim \chi_{n-1}^2$$

Calculou-se a estatística *F* onde Q_i, n_i e s_i foram calculados para cada amostra:

$$F = \frac{\frac{Q_1}{n_1 - 1}}{\frac{Q_2}{n_2 - 1}} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}$$

Considerando que o teste estatístico é bilateral, a região central foi considerada como sendo de aceitação (Figura A1).

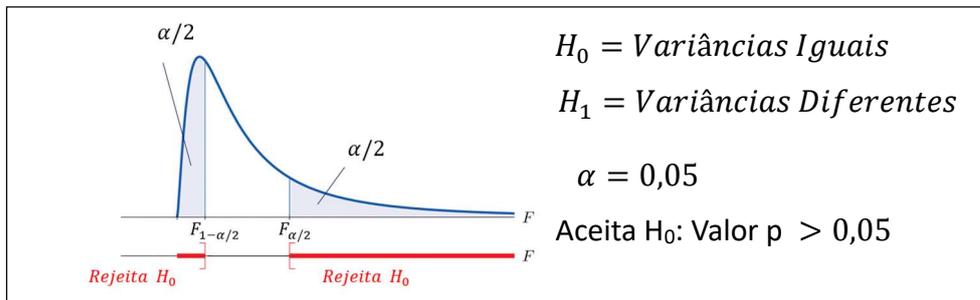


Figura A1 – Diagrama representando regiões de aceitação e rejeição para o Teste *f* (*Fischer-Snedecor*).

O teste estatístico foi realizado no software Excel e a aceitação ou rejeição da hipótese nula foi verificada com aplicação de Valor-p.

Teste *t* de Student

Este teste consistiu na comparação de médias de duas amostras após a verificação de normalidade seguido da verificação de igualdade de variâncias por meio da aplicação anterior do Teste *f*.

Assim, considerando dados normais de duas amostras:

$$\bar{X} \sim N\left(\mu_1, \frac{\sigma_1^2}{n_1}\right) \quad \text{e} \quad \bar{Y} \sim N\left(\mu_2, \frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)$$

Desta forma:

$$\bar{X} - \bar{Y} \sim N\left(\mu_1 - \mu_2, \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)$$

A aplicação do teste foi realizada por meio do software Excel, após verificação da igualdade das variâncias.

Para variâncias desconhecidas e iguais foi aplicada a seguinte expressão:

$$T = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \left(\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right)}}$$

Para variâncias desconhecidas e diferentes foi aplicada a seguinte expressão:

$$T = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)}}$$

Nas duas situações considerou-se que o teste estatístico era bilateral, assim a região central foi considerada como sendo de aceitação (Figura A2).

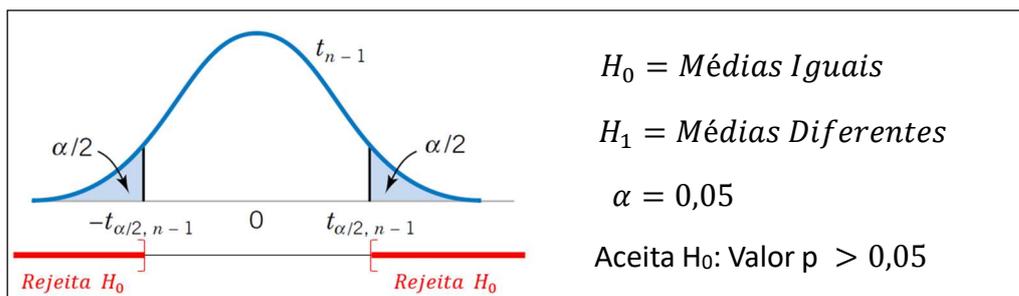


Figura A2 – Diagrama representando regiões de aceitação e rejeição para o Teste t

A aceitação ou rejeição da hipótese nula foi verificada com aplicação de Valor P fornecido pelo software Excel.