

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO**

Pedro de Deus Vieira Buschinelli

**MEDIÇÃO ÓPTICA DE FORMAS 3D EM MEIO
SUBAQUÁTICO ATRAVÉS DE INTERFACES PLANAS DE
REFRAÇÃO UTILIZANDO TRIANGULAÇÃO INVERSA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Armando
Albertazzi Gonçalves Jr.

Coorientador: Prof. Tiago Loureiro
Figaro da Costa Pinto

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Buschinelli, Pedro de Deus Vieira
Medição óptica de formas 3D em meio subaquático através de interfaces planas de refração utilizando triangulação inversa / Pedro de Deus Vieira Buschinelli ; orientador, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., coorientador, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, 2017.
327 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Fotogrametria. 3. Medição subaquática de forma. 4. Projeção de franjas. 5. Triangulação inversa. I. Albertazzi, Armando. II. Pinto, Tiago. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Pedro de Deus Vieira Buschinelli

**MEDIÇÃO ÓPTICA DE FORMAS 3D EM MEIO
SUBAQUÁTICO ATRAVÉS DE INTERFACES PLANAS DE
REFRAÇÃO UTILIZANDO TRIANGULAÇÃO INVERSA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 11 de outubro de 2017.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng. – Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Meinhard Sesselmann, Dr. Eng.
Universidade Federal de Minas Gerais

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Analucia Vieira Fantin, Dra. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador prof. Armando Albertazzi, por me aceitar como aluno de doutorado, pela paciência, sabedoria e orientação.

Ao meu coorientador prof. Tiago Pinto, pelos *brainstorms*, contribuições e orientações em geral.

À Analucia Fantin e ao Florian Caullery pelo auxílio matemático.

Ao colega e agora mestre Gabriel Matos, pela troca de conhecimentos, grande ajuda nos experimentos e no Labview.

Ao colega doutorando Sergio Petrovcic pela ajuda inicial na conversão do código do MATLAB para o C++.

Ao projeto SHIC 2, Petrobras e ao prof. Daniel Willemann pela bolsa e empréstimo de equipamentos.

Aos bolsistas Patryk Gonçalves e Lucas Trindade pelo auxílio nos experimentos no início da tese.

Ao Cleber Marques do LABSOLDA/UFSC pela solda do padrão de esferas.

Ao Fabio Silva pela modelagem do sistema estéreo e tanque de água no SolidWorks.

Ao técnico de laboratório Elsio Varela pelo auxílio nos experimentos.

Aos funcionários do laboratório de metrologia da Fundação CERTI, em especial ao Matheus de Oliveira no auxílio na seleção do padrão plano e Girlei Flores Jr. pela medição dos padrões (par de esferas e plano) na máquina de medir por coordenadas.

À Debora Simioni pela medição do índice de refração da água do tanque no Laboratório Físico-químico (UNOCHAPECÓ).

Aos companheiros do Labmetro, Mauro Eduardo, Claudio Schmitz; e todos que de alguma forma contribuíram para esse trabalho. À secretária Rosana pelo auxílio nos entraves burocráticos e descontração.

À minha família pelo incentivo constante e à minha namorada Nelize pela paciência e apoio nos conturbados e intensos últimos meses do doutorado.

RESUMO

A medição geométrica em meio subaquático abrange desde a verificação da profundidade por embarcações a medições 3D de complexas estruturas submersas, como tubulações, portos e plataformas. É uma ferramenta de suma importância para indústrias como a de óleo & gás e naval. Todavia, seu uso também pode ser citado em diferentes áreas e aplicações, como na medição de artefatos antigos, naufrágios e no mapeamento geológico e de corais. Tipicamente, a medição subaquática de distâncias, e mais recentemente de formas 3D, é realizada por sonares, uma vez que a água é um excelente acoplante acústico. No entanto, a medição óptica de formas 3D apresenta vantagens em relação aos sonares e à medição manual, como maior densidade de pontos e menor incerteza. A principal limitação técnica é a redução da qualidade do sinal da luz devido a efeitos degradantes intrínsecos a sua propagação pela água, sendo os principais a absorção e o espalhamento (*scattering*). Por essa razão, sistemas ópticos são geralmente adequados para aplicações subaquáticas de curtas distâncias (alguns metros). Outro importante efeito que deve ser considerado é a refração na interface de visão da câmera (janela) que separa o sistema óptico da água. As janelas de visão típicas são do tipo domo ou plana. O uso de janelas domo geralmente resulta em menores distorções devido à refração, mas são de difícil alinhamento. Em contraste, janelas planas são simples de serem fabricadas, baratas e mais resistentes a impactos. O sistema formado por uma câmera com visão através de interfaces plano-paralelas de refração não possui um centro único de projeção ou *single-view-point* (SVP), e sim um eixo onde todos os feixes de luz cruzam, sendo, portanto, denominada de câmera axial. A modelagem fisicamente correta deste tipo de sistema de visão é um tema de crescente interesse e algumas propostas de solução existem. A presente tese consiste na realização de medição 3D com um sistema de visão estéreo ativo (projeção de franjas) através de interfaces plano-paralelas de refração utilizando a medição orientada ao objeto ou triangulação inversa (InvT). Este tipo de triangulação consiste na procura por pontos 3D válidos contidos em um volume de medição com resolução e dimensão pré-definidos, resultando em uma nuvem de pontos regular. O trabalho contempla o desenvolvimento de uma calibração estéreo dos parâmetros que modelam fisicamente a refração, o que inclui a distância e o eixo de

inclinação das câmeras em relação às superfícies de refração; o desenvolvimento de método de *raytracing* através das interfaces planas de refração para a projeção de pontos 3D, requerida pela InvT; e métodos para redução do número de pontos a serem testados pela InvT. Além do desenvolvimento teórico, uma avaliação metrológica foi realizada através de experimentos controlados para avaliar as técnicas propostas. Medições subaquáticas foram realizadas utilizando o modelo de refração e também com compensação por ajuste focal e correção de distorções 2D. Os resultados foram comparados com o desempenho do sistema no ar.

Palavras-chave: Fotogrametria; Medição subaquática de forma; Projeção de franjas; Triangulação inversa; Visão estéreo.

ABSTRACT

Underwater geometrical measurement ranges from depth check by ships to 3D measurement of complex structures, as pipes, harbors and platforms. It is a tool of utmost importance for industries such as oil & gas and naval. Although, its applications may also include other areas as measurement and documentation of ancient artifacts, shipwrecks, geological and reefs mapping. Usually length and more recently 3D shape measurements are performed by sonars, since water is an excellent acoustic coupler. When high resolution is needed for short range measurements, optical principle becomes an attractive solution, which can delivery much higher point density and lower uncertainty. The major technical limitation is the reduction of the light signal quality due to detrimental effects during its propagation through water, which are mainly: attenuation and scattering. For these reason, optical systems are more suitable for short range applications (up to few meters). Another important effect that must be considered is the refraction that occurs on the camera's vision interface (port) which separates the optical system to the water. Typical types of ports are: dome and flat. Dome ports reduces the refraction effect but are usually hard to align. In contrast, flat ports are very simple, inexpensive, and more robust to impacts. The vision system resultant from a camera and a set of flat and parallel refractive interfaces does not have a unique projection center, or single-view-point (SVP) but an axis were all light rays intersects and for this reason it is named an axial camera. It has been shown that the resultant distortion for this type of configuration is 3D, or distant dependent. Physically correct modeling of this type of vision system has been a topic of growing interest and some solutions exists. The present thesis consists of the 3D measurement using an active (fringe projection) stereo system and object-oriented measurement or inverse triangulation (InvT) through flat refractive interfaces. This type of triangulation contrasts with the usual technic, since it is object-oriented instead of sensor-oriented, allowing a pre-defined measurement volume and resolution, resulting in a regularly spaced point cloud. The work contemplates the development of a stereo calibration technic of a physically correct refraction model, with includes the interfaces distances and camera lens axis orientation in relation to the interface; development of a raytracing algorithm to direct project 3D points though flat refractive interfaces, which is needed in InvT; and

methods to reduce the processing time and number of points tested during the InvT. Aside from the theoretical development, a metrological evaluation was executed through controlled experiments to validate the proposed techniques. Underwater measurements were conducted using the refraction model and refraction compensation by focal length and 2D lens distortion adjustment. The results were compared which in-air performance.

Keywords: Photogrammetry; Underwater shape measurement; Fringe projection; Inverse triangulation; Stereo vision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturas submersas na indústria de óleo & gás (GENESIS, 2017).	47
Figura 2 –Mergulhador cara a cara com esfinge de granito negro da civilização submersa de Alexandria no Egito (GODDIO, 2004) (topo). Vasos em sítio arqueológico a 328 m de profundidade (DRAP et al., 2015).	48
Figura 3 –Medição manual utilizando escalas rígidas feita por um mergulhador (esquerda) (“FN Diving webpage - Inspection”, 2011). Sistema de medição subaquática por triangulação laser e respectivo resultado de medição de um tubo amassado (direita) (“2G Robotics”, 2015).	49
Figura 4 – Esquemático de uma câmera escura - pinhole (MELLISH, 2003).	53
Figura 5 – Câmera escura – pinhole, projeção do exterior na parede de um quarto de uma casa abandonada através de um pequeno furo na janela. Local: leste de Baltimore, EUA (BRUCE, 2012).	54
Figura 6 – Modelo computacional de câmera pinhole. Ponto M projetado no ponto m no plano imagem π . Adaptado de (ZHANG, 2004).	55
Figura 7 - Imagem típica numa calibração por objeto 2D tipo tabuleiro de xadrez (BOUGUET, 2013).....	57
Figura 8 – Configuração para calibração utilizando dois planos ortogonais (a) e movimentos controlados de um plano (b). Adaptado de (ZHANG, 2004).	58
Figura 9 – Sistema estereoscópico comercial formado por duas câmeras e um projetor durante a medição de um objeto (GOM, 2015).	62
Figura 10 – Plano epipolar em um sistema estéreo. Fonte: adaptado de (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).	63
Figura 11 – Exemplo de linhas epipolares. Fonte: (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).	63
Figura 12 – Triangulação inversa. Três diferentes pontos 3D são testados para um determinado nó na malha XY. O cubo representa o	

volume de medição definido, com resolução nos eixos X , Y e Z respectivamente de δx , δy e δz .	65
Figura 13 – Exemplo de mapa de fase de uma das câmeras, linha de varredura em Z projetada e ponto de mínimo valor absoluto da diferença de fase obtido (PINTO, 2010).	66
Figura 14 – Módulo da diferença entre os mapas de fase de duas câmeras para uma determinada linha de varredura em Z . Nota-se nitidamente o ponto de mínimo valor absoluto da diferença de fase. Adaptado de (PINTO, 2010).	66
Figura 15 – Cena obtida por dois ângulos de visão diferentes. Câmera antiga e duas esferas, uma com superfície reflexiva e outra branca fosca. Base da câmera marcada por um retângulo vermelho. Letra na parte frontal da câmera marcada por um retângulo amarelo (HOFMANN, 2006).	70
Figura 16 – Janela de 4×4 pixels obtida em N tempos diferentes para duas câmeras. Adaptado de (SCHAFFER et al., 2011).	73
Figura 17 – Padrão de luz formado devido à iteração da luz do sol com a superfície ondulada da água em uma piscina (SWIRSKI et al., 2011).	74
Figura 18 – Perfil luminoso projetado e gráficos da variação da intensidade de luz e fase para uma linha do perfil. Adaptado de (HOFMANN, 2006).	75
Figura 19 – Resultado de medição do rosto de um manequim. Pontos pretos calculados por triangulação de duas câmeras com projeção de franjas e gray-code. Pontos em vermelho e em azul obtidos através da triangulação entre uma câmera e o projetor, abrangem, respectivamente, a região lateral direita e esquerda do nariz e da face (incluindo orelha) (PINTO; KOHLER; ALBERTAZZI, 2012).	77
Figura 20 - Técnicas de projeção de luz estruturada. Traduzido de (GENG, 2011).	79
Figura 21 – Absorção da luz em diferentes oceanos e regiões: 1-5) Pacífico em diferentes regiões; 6) Atlântico; 7) Báltico - águas profundas e 8) Báltico - superfície. Adaptado de (WOZNIAK; DERA, 2007).	82
Figura 22 –Imagens originais obtidas com a polarização na posição de máxima e mínima transmissão (parte superior). Imagem da melhor polarização após correção de cores simples (baseada no fato da cor da	

- areia ser branca) e imagem resultante após o processamento (parte inferior). Os pontos são referentes à regiões com o mesmo contraste. Traduzido de (SCHECHNER; KARPEL, 2005)..... 84
- Figura 23 – Variação da intensidade do retroespalhamento (backscattering) em relação a posição da fonte de luz (TREIBITZ; SCHECHNER, 2012)..... 85
- Figura 24 – Resultado de experimento utilizando iluminação multidirecional. a) Iluminação com ângulo “a”. b) Iluminação com ângulo “b”. c) Iluminação simultânea com ângulo “a” e “b”. d) Resultado obtido com a técnica desenvolvida pelos autores, combinando as imagens a) e b). Traduzido de (TREIBITZ; SCHECHNER, 2012).. 86
- Figura 25 – Refração da luz na transição entre dois meios. 87
- Figura 26 – Janela plana da Nauticam Austrália modelo “Compact port 15 #18303” (esquerda) e janela domo em acrílico com 171 mm de diâmetro. Modelo “6” Acrylic Dome Port #18801” Nauticam Austrália (direita) (AUSTRALIA, 2009)..... 89
- Figura 27 – Exemplo de imagem subaquática obtida por câmera com janela plana (esquerda) e domo (direita) (GUIMARÃES, 2012). Comprimento focal de 14 mm. 89
- Figura 28 – Refração em uma janela (ou interface) plana (esquerda) e numa janela domo (direita). Adaptado de (SEDLAZECK; KOCH, 2012). 90
- Figura 29 – Formação de imagem através de uma janela plana fina. Adaptado de (KNIGHT, 2012)..... 90
- Figura 30 – Janela domo e caixa estanque Nexus para lentes Nikon 14-24 e câmera D700. (“New Nexus Glass Dome Ports|Underwater Photography Guide”, 2010)..... 93
- Figura 31 – Diagrama de raios da refração em uma janela domo fina. O centro de projeção está coincidente com o centro do domo, de raio r . Adaptado de (KNIGHT, 2012)..... 93
- Figura 32 – Janela totalmente corretiva. Adaptado de (NEWTON; BALDWIN; FRYER, 1989)..... 95
- Figura 33 – Desenho técnico da janela totalmente corretiva desenvolvida por Ivanoff em 1952 (IVANOFF; LE GRAND; CUVIER, 1952). Sendo η o índice de refração, padronizado na presente tese como μ 95

Figura 34 – janela totalmente corretiva “Unterwasservorsatz II” da Carl Zeiss (EBAY, 2013).....	96
Figura 35 – Desenho da máscara e caminho óptico exposto na patente US 6612693 B2 (esquerda). Protótipo de máscara de mergulho MAX TM Optics da HydroOptix (direita) (KRANHOUSE; ROGERS, 2003), (“HydroOptix”, [s.d.].....	97
Figura 36 – Taxonomia de métodos de medição de formas. Adaptado de (LEONE; DIRACO; DISTANTE, 2008).....	98
Figura 37 – Esquemático do módulo de transporte e cabos de referenciamento do STL para inspeção de hidroelétricas (MIRALLÈS et al., 2010).	99
Figura 38 – Foto (esquerda) de flange de 254 mm (10”) e resultado de medição (direita) (EMBRY et al., 2012).....	100
Figura 39 – Lumeneye da Savante (esquerda). Imagem subaquática da linha de laser sobre pedras (direita superior) e o respectivo resultado de medição (direita inferior) (“Savante”, 2015).	100
Figura 40 – Fotos dos três sistemas de medição a laser da 2G Robotics (“2G Robotics”, 2015).	101
Figura 41 – Exemplos de resultados de medições realizadas com o sistema ULS-100 da 2G Robotics (“2G Robotics”, 2015).....	101
Figura 42 – Sistema de medição ToF Investigator da Scopos (esquerda). Vista frontal (centro) e lateral (direita) do resultado de medição em tempo real de uma chapa com furo a aproximadamente 2 m de distância. Nota-se o grande ruído na medição (SCOPOS, 2013).....	102
Figura 43 – Imagem (esquerda) e gráfico (direita) resultante do sistema STIL (JAFFE et al., 2001).	103
Figura 44 – ROV durante aquisição de fotos para a medição de objetos em sítio arqueológico.	104
Figura 45 – Modelo 3D obtido a partir de fotos de vasos de sítio arqueológico a 328 m de profundidade após duas horas de aquisição (DRAP et al., 2015).	104
Figura 46 – Mapa 2D com a cobertura aproximada de uma imagem destacada no retângulo vermelho (esquerda) e reconstrução 3D (direita) (NICOSEVICI et al., 2009).....	105

Figura 47 – Resultado de medição de cascalhos embaixo da água obtidos com o sistema AREM trinocular em diversas posições diferentes (CAMPOS et al., 2009).	106
Figura 48 – Gráfico da variação da intensidade de luz menos a média total ao longo de 35 imagens para dois pontos correspondentes nas imagens (a) e (b) marcados com “⊗” e não correspondentes, marcado com “⊙” na imagem (b) (SWIRSKI et al., 2011).	107
Figura 49 – DIDSON 300 m (METRIC, [s.d.]).	109
Figura 50 – Echoscope (CODAOCTOPUS, 2013).	110
Figura 51– Imagens de medições com os sistemas DIDSON US300 e Echoscope (CODAOCTOPUS, 2013).	111
Figura 52 – Fotos (superior) de um cilindro de concreto (esquerda) e de aço (direita) com suas respectivas imagens acústicas (inferior) obtidas com o sistema DIDSON. Traduzido de (YU et al., 2006).	111
Figura 53 – Sonar 3D BV5000 da BlueView (“TELEDYNE BlueView”, [s.d.]).	112
Figura 54 – Resultados de medições utilizando o BV5000: conjunto de várias medições (esquerda), note que as regiões circulares sem dado são onde o sistema foi posicionado. Medição de flange (direita) (“TELEDYNE BlueView”, [s.d.]).	113
Figura 55 – Esquemático do sistema câmera + sonar em um AUV (HURTOS; CUFÍ; SALVI, 2010).	114
Figura 56 – a) Quando submerso, os dois objetos (círculo e quadrado) são projetado na mesma posição, já no ar (projeção sem distorção) os objetos são projetados em posições diferentes. b) Foto obtida através de um aquário vazio e c) preenchido com água. Pode-se notar nas regiões indicadas pelas setas que objetos oclusos no ar aparecem quando o aquário é preenchido e vice-versa (TREIBITZ et al., 2012).	116
Figura 57 – Visualizar através de uma interface plana resulta num sistema não central de projeção (nSVP) (TREIBITZ et al., 2012).	117
Figura 58 – Formação da superfície cáustica. Caminho óptico real (a); Caminho óptico aparente (b). Gráfico 3D de uma superfície cáustica (c) (TREIBITZ et al., 2012).	117

Figura 59 – a) Calibração do sistema. b) Tabuleiro e dimensões conhecidas utilizadas. c) Objetos medidos com o sistema para validação da calibração (TREIBITZ et al., 2012).	118
Figura 60 – Visão geral da projeção através de n camadas plano-paralelas de refração (esquerda). Caminho óptico completo para cada pixel fica num plano e todos os planos coincidem em um mesmo eixo que passa pelo centro da câmera (centro). Após o cálculo do eixo, análises podem ser realizadas no plano de refração para estimar a espessura da camada e os índices de refração (direita). Adaptado de (AGRAWAL et al., 2012).	120
Figura 61 – Foto da montagem do experimento (esquerda) e foto tirada através do aquário com os pontos reprojatados (direita) com a aproximação central (verde) e com o método proposto (vermelho) (AGRAWAL et al., 2012).	122
Figura 62 – Erro na medição de um plano triangulando câmeras calibradas utilizando o modelo SVP (vermelho) e o modelo de câmera axial considerando a refração (verde) (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012).	123
Figura 63 – Calibração por dois diferentes comprimentos de onda. Traduzido de (YAU; GONG; YANG, 2013).	124
Figura 64 – Sistema estereoscópico portátil com projeção de franjas para medição subaquática (BRÄUER-BURCHARDT; KÜHMSTEDT; NOTNI, 2015) (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b).	125
Figura 65 – Erro máximo (ϵ_{max}) de reprojeção em pixels para objetos em distâncias diferentes da calibrada. Distância da calibração e da medição foram respectivamente de 1,3 e 6,5 (AOV no ar de 40°). d = distância do centro de projeção à interface f = comprimento focal. Valores normalizados em relação ao tamanho do pixel (TREIBITZ et al., 2012).	127
Figura 66 – Gráfico do erro máximo $\epsilon(\theta_{air})$ simulado da reprojeção para calibração e medição realizada em distâncias similares. O aumenta com o ângulo de visão no ar (θ_{air}). Valores normalizados em relação ao tamanho do pixel (TREIBITZ et al., 2012). Gráficos em escalas diferentes.	127
Figura 67 – Distribuição de erros (em pixels) de reprojeção no ar e na água (direita) (BIANCO et al., 2013).	129

- Figura 68 – Fotos do sistema sendo calibrado (esquerda) e durante uma medição (direita) com projeção de um padrão de luz (BIANCO et al., 2013). 129
- Figura 69 – Triangulação inversa através de $n - 1$ interfaces planas de refração (n meios). Três pontos de procura por um z válido em um nó da malha XY sendo projetados nas câmeras “ L ” e “ R ”. O paralelepípedo representa o volume de medição, com resoluções espaciais δX , δY e δZ 136
- Figura 70 – Projeção inversa de ponto na imagem \mathbf{m} em sistema estéreo através de múltiplas interfaces planas de refração. Adaptado de (AGRAWAL et al., 2012). 137
- Figura 71 – Triangulação inversa de ponto 3D \mathbf{M} em sistema estéreo através de múltiplas interfaces planas de refração. Planos de refração (POR) πL e πR formados pelos respectivos vetores \mathbf{A} e $\mathbf{v}0$. O ponto 3D \mathbf{M} está contido em ambos os planos de refração. 138
- Figura 72 – Diagrama de blocos da triangulação inversa..... 144
- Figura 73 – Refino em Z (ZScan) para o módulo da diferença de fase ($\Delta\phi$) com quatro graus/iterações de refino. Esquemático dos refinos em cada iteração exposto abaixo do eixo Z . O número de divisões em cada iteração é apenas ilustrativo. 145
- Figura 74 – Diagrama de blocos do refino em Z (ZScan). 148
- Figura 75 – Gráfico do módulo da diferença de fase ($\Delta\phi$) com pontos de amostragem durante refino em Z . Devido a descontinuidades no $\Delta\phi$, um falso mínimo é obtido, acarretando em uma faixa de procura na próxima iteração de refino fora da região do mínimo global. Com a correção da faixa de procura, o mínimo global pode ser encontrado. Esquemático dos refinos em cada iteração exposto abaixo do eixo Z . O número de divisões em cada iteração é apenas ilustrativo. 150
- Figura 76 – Foto e resultado de medição sem refino em Z no ar de face do manequim. Nota-se regiões com falhas circulares devido aos alvos de cor escura colados no objeto. 152
- Figura 77 – Comparação do resultado de medição de região do queixo da cabeça de manequim (Figura 76). Nota-se claramente os artefatos causados pela descontinuidade da fase. Com apenas um passo de tolerância na correção da faixa de procura ($\tau C_{ormax} = 1$) quase todos artefatos desaparecem. Já com cinco a medição é praticamente mesma

do que a obtida com o processamento sem refino (diferença de 10 pontos, ou 0,03%).....	153
Figura 78 – Diagrama de blocos da Projeção Inversa Através de Múltiplas Interfaces Planas de Refração (InvProjRefra).....	157
Figura 79 – Ilustração do primeiro ($i = 0$), segundo e último passo ($n - 1$) do método para projeção inversa InvProjRefra. No primeiro passo define-se interseção com a primeira interface (\mathbf{q}_1) e direção no segundo meio (\mathbf{v}_1). O procedimento é repetido até que se obtenha a interseção na última interface (\mathbf{q}_n) e direção no último meio (\mathbf{v}_n). No caso de interfaces paralelas de refração, todas as normais (\mathbf{n}_i) às interfaces são iguais ao inverso da direção do eixo da câmera ($-\mathbf{A}$) e os pontos quaisquer nas interfaces (\mathbf{ppi}) podem ser obtidos pelas espessuras dos meios (Figura 70).....	157
Figura 80 – Vetor de erro \mathbf{V}_e utilizado no método iterativo. O método corrige \mathbf{m}_i (subtraindo \mathbf{m}_c) até que se obtenha um vetor erro de comprimento menor do que o erro máximo tolerado ou o número máximo de iteração seja atingido. Imagem esquerda adaptada de (AGRAWAL et al., 2012).....	159
Figura 81 – Diagrama de sequência do algoritmo iterativo de cálculo da projeção direta através de interfaces planas de refração.	160
Figura 82 – Medição de rosto de manequim efeito de duplicação vertical devido a calibração incorreta. Note região dos olhos e alvo com duplicações verticais.	162
Figura 83 – Obtenção do erro residual durante a calibração dos parâmetros de refração (PR). 1) Definição dos PR. 2) Projeção inversa dos pares de pontos nas imagens. 3) Cálculo da mínima distância entre feixes triangulados e ponto médio. 4) Ajusta os pontos 3D conhecidos do padrão aos pontos 3D triangulados utilizando método do tipo de Horn. 5) Calcula distância entre pontos. Os PR são os que minimizam o erro dado por $\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2$ e $\mathbf{S} - \mathbf{M}$ para todos os pontos e poses do padrão.	163
Figura 84 – Vista superior do esquemático da configuração “reversa” para testes em laboratório, onde o meio de medição fica contido em um tanque com paredes inclinadas (esquerda) e do sistema vedado (direita).	167

Figura 85 – Configuração do experimento sem o tanque de água. Sistema estéreo com projetor e terceira câmera (no canto esquerdo superior da imagem) utilizada para auxiliar nos experimentos.	169
Figura 86 – Visão da terceira câmera, linha central de referência destacada (verde).....	170
Figura 87 – Foto (esquerda) e dimensões (direita) do tanque de água montado para os experimentos da tese, o lado “A” foi o utilizado com o sistema estéreo e possui ângulo entre normais das janelas de 40°.	170
Figura 88 – Posicionamento do tanque com água na frente do sistema estéreo.	171
Figura 89 – Imagens adquiridas durante a medição de uma face de manequim no ar. As primeiras oito imagens são referentes aos passos da técnica de projeção de franjas, já as nove subsequentes (9-17) ao gray-code para a remoção do salto de fase.	172
Figura 90 – Padrão de calibração com 15 × 10 divisões com 10 mm de lado.....	176
Figura 91 – Padrão de círculos durante definição do centro do volume de medição no ar.	177
Figura 92 – Detalhe da distância da lente à parede do tanque.....	178
Figura 93 – Padrão plano de vidro de microscópio antes e após pintura, com respectivo erro de planeza de 3 μm e 28 μm . Diâmetro e espessura, respectivamente, em torno de 205 mm e 10,2 mm.....	181
Figura 94 – Padrão plano (planeza 0,028 mm) fixo em suporte para facilitar a realização das medições em diferentes posições.	182
Figura 95 – Posições sugeridas pelo VDI/VDE 2634 (VDI/VDE-2634, 2008).	183
Figura 96 – Par de esferas de aço durante calibração em máquina de medir por coordenadas da Mitutoyo na Fundação CERTI. Foram obtidos 13 pontos em cada esfera e realizados três ciclos de medição.	184
Figura 97 – Padrão de par de esferas, indicação da distância entre centros (L_p) e diâmetro (DP).	185
Figura 98 – Cabeça de manequim durante calibração com sistema GOM ATOS (GOM, 2015) em laboratório da Fundação CERTI.	186

Figura 99 – Resultado da medição de referência (calibração) da cabeça de manequim com o sistema GOM ATOS.	186
Figura 100 – Réplica de parte de região cavitada de pá de turbina hidráulica preenchida com cordões de solda.....	187
Figura 101 – Exemplo de superfície obtida e detalhe da nuvem de pontos da medição da face de um manequim no ar com a resolução padrão do sistema $0,1 \times 0,1 \times 0,01 \text{ mm}^3$	188
Figura 102 – Exemplo de mapa de desvios. Medição de referência do objeto é colorida conforme os desvios em relação à medição sendo avaliada. Note o histograma de desvios ao lado da escala do mapa de cores e sistema de coordenadas no canto inferior esquerdo.....	189
Figura 103 – Interface do software desenvolvido na tese no Labview.	194
Figura 104 – Uma das aquisições do padrão tipo xadrez durante a calibração no ar. Imagem da câmera esquerda, direita e auxiliar.....	195
Figura 105 – Mapa de distorção radial e tangencial da calibração SVP no ar para a câmera esquerda. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.	198
Figura 106 – Mapa de distorção completo da calibração SVP no ar da câmera esquerda. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.	199
Figura 107 – Histograma relativo (%) do erro de reprojeção (em pixel) da calibração no ar para a câmera da esquerda (<i>L</i>) e direita (<i>R</i>) antes da otimização estéreo.....	199
Figura 108 – Vista superior, lateral e perspectiva das poses calculadas do padrão após calibração SVP no ar. Cubo de lado 200 mm representa o volume de medição. Sistema de coordenadas da câmera esquerda...200	
Figura 109 – Imagens obtida pelo sistema e pela terceira câmera durante calibração SVP na água.....	201
Figura 110 – Mapa de distorção radial e tangencial da calibração SVP na água. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.....	203
Figura 111 – Mapa de distorção completo da calibração SVP na água. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem. ...204	

Figura 112 – Comparação entre o mapa de distorção dos parâmetros obtidos na calibração no ar (cima) e na água (baixo) da câmera esquerda.	206
Figura 113 – Exemplo de correção da distorção de imagens obtidas no ar (A) e na água (W) (coluna da esquerda) com parâmetros de distorção obtidos em calibração no ar e na água (coluna da direita). Imagens obtidas com a câmera esquerda. No detalhe, as regiões em pontilhado comparam a imagem obtida na água após a correção da distorção com os parâmetros obtidos no ar e na água.	207
Figura 114 – Poses estimadas do padrão após a otimização dos parâmetros de refração. O cubo refere-se ao volume de medição de 200^3 mm ³ definido no ar.	210
Figura 115 – Vetores de erro para todas as nove posições do padrão. Foram excluídos da otimização três pontos da linha superior, começando pelo segundo da esquerda para a direita. O maior vetor representa um erro de 0,30 mm.	212
Figura 116 – Histograma relativo (%) do erro dado pela distância dos pontos triangulados e do padrão.	213
Figura 117 – Vista perspectiva e superior da variação do erro residual de calibração variando a distância da parede do tanque na câmera esquerda e direita ($d0L$, $d0R$) em ± 1 mm após a otimização.	214
Figura 118 - Erro de calibração em relação à variação da distância à parede do tanque da câmera esquerda (L). Parâmetros de refração otimizados com $d0L = 16,938$ mm.	215
Figura 119 – Erro de calibração em relação à variação da espessura da parede do tanque de água. Parâmetros de refração otimizados com $d1 = 6,00$ mm (valor nominal).	215
Figura 120 – Erro da calibração em relação à variação do índice de refração da água em $\pm 0,001$. Parâmetros de refração otimizados com $\mu 2 = 1,3381$. Sendo e o erro médio.	216
Figura 121 – Vista perspectiva do modelo CAD do sistema e do volume de medição (cubo de 200 mm de lado) no ar.	217
Figura 122 – Vista perspectiva do modelo CAD do sistema e tanque mostrando o campo de projeção; campo de visão das câmeras e cinco	

posições de um plano medido, ilustrando o volume útil de medição na água.....	218
Figura 123 – Base cinemática utilizada no experimento.....	219
Figura 124 – Fotos durante aquisição com plano na mesma posição no ar e na água.	219
Figura 125 – Imagens obtidas pelo sistema no ar (acima) e na água (abaixo) na mesma posição ($Z \sim 0$ mm).....	220
Figura 126 – Desvio ao plano ajustado em cada medição. Os valores abaixo da legenda de cores que estão separados por “/” representam o desvio: mínimo, máximo e σ . Valores em milímetros.....	221
Figura 127 – Vista frontal e perspectiva da medição do plano na mesma posição no ar (preto), água (SVP) (verde) e água (Refra) (azul).	221
Figura 128 – Vista superior e lateral da medição do plano na mesma posição no ar e água.....	222
Figura 129 – Vista superior e lateral da medição do plano na mesma posição no ar e água após remoção de pontos espúrios (1/1000) e distantes $\pm 0,2$ mm.	222
Figura 130 – Vista frontal e perspectiva das nuvens de pontos obtidas da medição do plano com deslocamentos controlados durante um dos quatro ciclos de medição na água.	226
Figura 131 – Vista superior e lateral das nuvens de pontos obtidas da medição do plano com deslocamentos controlados durante um dos quatro ciclos de medição na água. A linha pontilhada representa o eixo Z e a linha contínua vermelha representa o vetor normal ao plano #1. Nota-se que as linhas são visualmente coaxiais.	226
Figura 132 – Tendência na medição de distância no ar, água (SVP) e água (Refra).	228
Figura 133 – Tendência na medição de distância no ar.	228
Figura 134 – Tendência na medição de distância na água (SVP).	228
Figura 135 – Tendência na medição de distância na água (Refra).....	229
Figura 136 – Contorno do histograma normalizado (distribuição probabilidade, área = 1) do desvio para todas as posições e ciclos dos deslocamentos controlados do plano em cada meio e calibração. O número de pontos no ar é menor pois foram feitos 3 ciclos ao invés de 4	

(água), todavia, com apenas um ciclo os histogramas já possuíam todos forma similar à exposta no gráfico.	229
Figura 137 – Desvio aos planos ajustados nas cinco posições de um dos ciclos de aquisição na água com modelo Refra.	231
Figura 138 – Desvio ao plano ajustado das nuvens de pontos de um dos ciclos nas posições #1 100 mm e #5 -100 mm obtidas na água com modelo SVP (verde) e Refra (azul e rosa). Nota-se formato “C” nos erros, e formato “S” na posição #1 com modelo SVP.	231
Figura 139 – Desvio ao plano ajustado a nuvem de pontos de um dos ciclos na posição #1 no ar. Nota-se erro sistemático, todavia pequeno se comparado ao obtido na água.	232
Figura 140 – Seis posições obtidas no ar, enumeradas de 1 a 6 da esquerda para a direita.	232
Figura 141 – Vista frontal e perspectiva das 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano em posições aleatórias no ar.	233
Figura 142 – Vista superior e lateral das 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano em posições aleatórias no ar.	233
Figura 143 – Desvio ao plano ajustado de todas as 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano no ar em posições não controladas. Valores em milímetros.	234
Figura 144 – Vista em perspectiva do desvio ao plano ajustado (em mapa de cores) de todas as 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano no ar em posições não controladas. Retângulo inferior representa um lado do volume de medição (200 × 200 mm ²).	234
Figura 145 – Vista em perspectiva dos resultados de medição do plano na água em posições não controladas de 1-5; 6-10 e 11-18.	235
Figura 146 – Vista frontal e perspectiva das medições do plano na água em posições não controladas.	235
Figura 147 – Vista superior e lateral de todas as medições do plano na água em posições não controladas.	236
Figura 148 – Histograma normalizado (distribuição probabilidade, área = 1) do desvio ao plano obtido em posições aleatórias, referente a: seis medições no ar, medições de 1 a 13 na água com modelo SVP e Refra.	238

Figura 149 – Vista em perspectiva do desvio dos resultados na água (Refra) nas posições 5, 7 e 18 da medição do plano em posições aleatórias.	239
Figura 150 – Comparação entre os desvios obtidos com o modelo SVP e Refra na medição na água na posição 18 ($Z \sim 230$ mm). Os valores abaixo da legenda de cores que estão separados por “/” representam o desvio: mínimo, máximo e σ em milímetros. Nota-se erro devido a problemas no processamento das franjas em ambos os casos. Já no processamento com o modelo SVP existe um erro sistemático nas bordas que chega a 0,4 mm.	239
Figura 151 – Esferas ajustadas nas medições no ar do par de esferas em todas 16 posições aleatórias. Do canto esquerdo superior no sentido horário: posições 1 a 5, 6 a 10, 11 a 16 e todas. Volume de medição representado pelo cubo.....	241
Figura 152 – Vista frontal e superior de todas 16 medições do par de esfera no ar incluindo pontos medidos. Volume de medição representando pelo cubo.....	242
Figura 153 – Gráfico do SSE e PE Vs ângulo do vetor distância das esferas relativo à Z para as 16 diferentes posições do par de esferas no ar.	244
Figura 154 – Par de esferas durante uma das medições na água.....	244
Figura 155 – Foto durante medição do par de esferas onde é possível ver a tela do notebook com a imagem obtida pelo sistema estéreo (esquerda). Detalhe das esferas (direita).	245
Figura 156 – Imagem obtida pela câmera esquerda, central e direita durante a medição #11.	245
Figura 157 – Mapas de fase obtidos para a medição #11.....	245
Figura 158 – Resultado de medição do par de esferas na água (Refra) em 23 posições aleatória e respectivas esferas ajustadas. Do canto esquerdo superior no sentido horário: posições 1 a 5, 6 a 10, 11 a 16 e todas (incluindo os pontos medidos). Volume de medição no ar representado pelo cubo.....	246
Figura 159 – Vista frontal e em perspectiva de todas 23 medições do par de esfera na água (Refra).	247

Figura 160 – Gráfico de <i>SSE</i> e <i>PE</i> Vs ângulo do vetor distância das esferas relativo à <i>Z</i> para as 23 diferentes posições do par de esferas na água (Refra).....	249
Figura 161 – <i>SSE</i> e <i>PE</i> no ar e na água para cada aquisição. <i>SSE</i> mínimos e máximos indicados.	250
Figura 162 – <i>SSE</i> e <i>PE</i> da medição do par de esferas no ar e na água Vs o ângulo de orientação das esferas em relação a <i>Z</i> no SCO.....	251
Figura 163 – Histogramas normalizados do <i>SSE</i> no ar e na água.....	251
Figura 164 – Histograma do erro de apalpação (<i>PE</i>) no ar e na água.	252
Figura 165 – Erro da distância entre centros das esferas (<i>SSE</i>) para as medições no ar, água (SVP) e água (Refra) em relação ao ângulo entre o vetor centros e o eixo <i>Z</i>	253
Figura 166 – Histograma de desvios (<i>PE</i>) das medições do par de esferas no ar, água (SVP) e água (Refra). Erro dado pela distância normal de cada ponto medido em relação à superfície da esfera de raio fixo ajustada.	253
Figura 167 – Compilação dos resultados obtidos com a medição no ar, água (SVP) e água (Refra).	254
Figura 168 – Gráfico do erro máximo para medições na água com o modelo de refração (Refra). Nota-se que a componente aleatória é quase insignificativa se comparada ao erro sistemático relativo.	260
Figura 169 – Cabeça de manequim durante medição na água. É possível notar o trajeto da luz do projetor.	261
Figura 170 – Vista superior e detalhe de franjas projetadas sobre a face de manequim.	261
Figura 171 – Medição da parte lateral e posterior da cabeça de manequim.	262
Figura 172 – Imagens adquiridas pelo sistema durante a medição da face no ar e na água (baixo).	262
Figura 173 – Resultado de medição no ar e na água (Refra) da face de manequim.	263
Figura 174 – Desvio do resultado de medição frontal da cabeça de manequim no ar e visão (em recorte) do sistema durante aquisição. ...	264

Figura 175 – Desvio do resultado de medição da face da cabeça de manequim na água com método SVP e Refra. Nota-se o maior tempo de processamento no método Refra devido a necessidade do cálculo do caminho da luz pelas interfaces de refração.....	265
Figura 176 – Resultado de medição da parte lateral esquerda da face de manequim na água (Refra).....	266
Figura 177 – Desvio do resultado de medição lateral da cabeça de manequim no ar e visão (em recorte) do sistema durante aquisição.	267
Figura 178 – Desvio do resultado de medição lateral da cabeça de manequim na água com método SVP e Refra (mesma da figura 176).	268
Figura 179 – Desvio do resultado de medição posterior da cabeça de manequim no ar e visão (em recorte) do sistema durante aquisição.	269
Figura 180 – Desvio do resultado de medição posterior da cabeça de manequim na água com método SVP e Refra.....	270
Figura 181 – Vista frontal e lateral dos resultados de medição da face de manequim na água utilizando o modelo SVP com parâmetros obtidos no ar (vermelho) e na água (verde) e com modelo de refração (Refra) obtido na água (azul).....	271
Figura 182 – Medição da cavidade preenchida com cordões de solda no ar e na água.	272
Figura 183 – Vista frontal da cavidade preenchida com cordões de solda posicionada no interior do tanque para a medição.	272
Figura 184 – Imagens adquiridas pela câmera esquerda e direita no ar e na água (baixo) em posições (Z) distintas.....	273
Figura 185 – Posicionamento da peça no ar (esq.) e na água (dir.) e cubo referente volume de medição no ar.....	274
Figura 186 – Resultado de medição no ar - cavidade preenchida com cordões de solda.	275
Figura 187 – Resultado de medição na água (Refra) – cavidade preenchida com cordões de solda.....	276
Figura 188 – Comparação de parte da medição no ar e na água (Refra) (direita). Nota-se maior ruído na medição na água.	276
Figura 189 – Comparação entre medições obtidas no ar e região utilizada para o ajuste.....	277

Figura 190 – Comparação entre medições obtidas na água com modelo SVP e Refra.....	278
Figura 191 – Comparação dos desvios obtidos da medição da placa com cavidade preenchida com solda utilizando: a) Otimização completa (A, $d0$, $\mu2$), b) Parcial (somente A) ou c) Nenhuma (valores de referência). Canto superior direito: detalhe da diferença de posição visível entre as medições, à frente resultado obtido com b), no meio a) e mais atrás com c).....	280
Figura 192 – Medição de trecho de tubo amassado de PVC de 305 mm (12”) de diâmetro.	281
Figura 193 – Imagens do tubo de PVC obtida pelo sistema durante a medição na água.....	282
Figura 194 – Detalhe de artefato na região central do tubo medido. Foto Vs resultado de medição na água (Refra).....	282
Figura 195 – Vista frontal do resultado de medição de tubo de PVC na água (Refra). Área em XY de quase $200 \times 200 \text{ mm}^2$	283
Figura 196 – Análise do ruído da medição no tubo de PVC na água (Refra). Ajustado plano polinomial de 3ª ordem e obtida a distância de cada ponto ao plano. Escala de cores representa todos os pontos. Nota-se um erro máximo em torno de $\pm 0,1 \text{ mm}$	284
Figura 197 – Resultado de medição na água (Refra) de tubo de PVC e cilindro ajustado de 312,0 mm de diâmetro.	285
Figura 198 – Resultando de medição do tubo de PVC amassado de 305 mm (12”) de diâmetro. Total de pontos: 3.325.575. Tempo de processamento: 8 min. Tempo para criação da malha: 6 min. Diâmetro do cilindro ajustado: 312,0 mm. Medição na água (Refra).	285
Figura 199 – Medição de seção de riser de 6” (154 mm) de diâmetro.....	286
Figura 200 – Imagens obtidas pelo sistema estéreo durante medição de seção de riser de 6” (154 mm) de diâmetro. Pode-se notar reflexo na parte central do tubo.....	287
Figura 201 – Resultado de medição de riser de riser de 6” (154 mm) de diâmetro na água (Refra). Cilindro ajustado ao resultado. Diâmetro médio obtido de 169 mm.....	287

Figura 202 – Resultado de medição de riser de riser de 6” (154 mm) de diâmetro na água (Refra). Nota-se maior ruído devido ao reflexo (Figura 200) em duas faixas próximo a região central da medição e também falhas devido a regiões com cor escura ou reflexivas. Processamento: 3 min 38 s. Total de pontos: 1.424.862.	288
Figura 203 – Imagens adquiridas da câmera esquerda e direita durante medição do plano padrão. Nota-se o reflexo na parede do tanque e na superfície da água.	289
Figura 204 – Caminho óptico da luz para: (a) o índice de refração é diferente em cada posição (caso genérico); (b) índice de refração é diferente em “i-ésimos” discretos meios e (c) em um único meio.	317
Figura 205 – Modelagem bidimensional do caminho óptico entre o ponto m no sensor da câmera e M (ponto de interesse) (esquerda). Parametrização do caminho óptico em triângulos de altura hi , base wi e hipotenusa si (direita).	318
Figura 206 – Câmera Flea 2 da antiga Point Grey (comprada pela Flir) do sistema estéreo.	321
Figura 207 – Lente de 8 mm da Computar utilizada no sistema estéreo (COMPUTAR, 2017a).	322
Figura 208 – Projetor LG / HS101 do sistema estéreo (LG, 2007).	323
Figura 209 – Imagem obtida pela terceira câmera dos padrões de círculos colados nas janelas (pose 1L e pose 1R) do tanque utilizada para a obtenção da orientação e distância de referência.	326
Figura 210 – Esquemático da transformação de coordenadas para a obtenção da posições e orientação das janelas no tanque.	326

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxonomia por distorção das modelagens de câmera. Adaptado de (SWAMINATHAN; GROSSBERG; NAYAR, 2003).....	61
Tabela 2 – Índice de refração do ar, vidro e acrílico sob pressão atmosférica (HECHT, 2001) (BASS et al., 1995).....	87
Tabela 3 – Compilação do índice de refração da água para variações extremas de temperatura, salinidade e pressão ($\lambda = 508,5$ nm) (QUAN; FRY, 1995).....	88
Tabela 4 – Principais especificações do sistema descrito em (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b).....	125
Tabela 5 – Comparação de erros em % de medição da distância dos centros de um padrão de par de esferas (<i>Eesf</i>) e de planeza (<i>Eplano</i>) (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b).....	126
Tabela 6 – Comparação do erro de medição de um plano e um cilindro em meio subaquático com a técnica de estereoscopia ativa e passiva (μ = média, σ = desvio padrão) (BIANCO et al., 2013). Valores em milímetros.....	129
Tabela 7 – Comparação entre as principais técnicas de calibração em meio subaquático para janela plana.....	130
Tabela 8 – Parâmetros de refração.....	137
Tabela 9 – Parâmetros resultantes da refração.....	137
Tabela 10 – Compilação dos parâmetros de entrada e de saída dos algoritmos utilizados. Parâmetros necessários para o cálculo através de interfaces planas de refração são indicados com “*”. As setas indicam → Entrada e ← Saída. São necessários para cada uma das câmeras os dados de medição, parâmetros da câmera e de refração.....	140
Tabela 11 – Número de pontos para um determinado volume de medição e resolução no caso de busca exaustiva ou força bruta.....	142
Tabela 12 – Parâmetro de entrada e saída da triangulação inversa. Parâmetros adicionais devido à refração indicados por “*”.....	143
Tabela 13 – Dados de entrada e saída do refino em <i>Z</i> incluindo a validação do ponto ou não.....	147

Tabela 14 – Parâmetros de entrada e saída do método para projeção inversa através de interfaces planas de refração (InvProjRefra).	155
Tabela 15 – Parâmetros de entrada e saída do método para projeção inversa através de interfaces planas de refração (InvProjRefra).	158
Tabela 16 – Parâmetros de entrada e saída da função custo de calibração.	164
Tabela 17 – Requisito iniciais do sistema.	168
Tabela 18 – Configuração padrão da projeção.	173
Tabela 19 – Configuração padrão de processamento.	174
Tabela 20 – Compilação dos casos de uso e das técnicas de calibração utilizadas.	175
Tabela 21 – Estimativa inicial e limites dos parâmetros de refração. Parâmetros a serem otimizados destacados em vermelho (\mathbf{A} , $d0$, $\mu2$). Coordenadas \mathbf{A} e distâncias d_i em milímetros.	179
Tabela 22 – Dimensões calibradas do par de esferas.	185
Tabela 23 – Avaliação do tempo de processamento para uma medição típica (face de manequim) com resoluções em XYZ de $(0,1 \times 0,1 \times 0,01)$ mm, obtendo aproximadamente 18.400 pontos.	193
Tabela 24 – Parâmetros intrínsecos da câmera e de distorção da lente obtidos na calibração no ar.	196
Tabela 25 – Relação estéreo – rotação e translação do sistema de coordenadas da câmera esquerda para a direita. Valores em milímetros.	197
Tabela 26 - Parâmetros extrínsecos – calibração no ar. Valores em milímetros.	197
Tabela 27 – Parâmetros intrínsecos da câmera e de distorção da lente obtidos na calibração na água.	202
Tabela 28 – Relação estéreo – rotação e translação ($RtLR$) do sistema de coordenadas da câmera esquerda para a direita para a calibração SVP na água. Valores em milímetros.	202
Tabela 29 - Parâmetros extrínsecos – calibração na água. Valores em milímetros.	203

Tabela 30 – Comparação entre calibração SVP obtida no ar e na água.	205
Tabela 31 – Parâmetros de refração conhecidos. Eixo das câmeras A em milímetros.	209
Tabela 32 – Legenda de cores, erro máximo, médio e desvio padrão final das 9 imagens utilizadas na calibração. Valores em milímetros.	210
Tabela 33 – Parâmetros de refração estimados, limites e após a otimização. Os parâmetros que foram otimizados estão destacados em vermelho (A , d_0 , μ_2) e com *. Coordenadas A e distâncias d_i em milímetros.	211
Tabela 34 – Normal e centro da medição do plano na mesma posição no ar e água (SVP e REFRA).	224
Tabela 35 – Diferença entre sistema de coordenadas do objeto (SCO) na água com modelo SVP e Refra ao SCO no ar.	224
Tabela 36 – Posições nominais em Z e cores utilizadas nas nuvens de pontos obtidas.	225
Tabela 37 – Tendência e repetibilidade (<i>Re</i>) com intervalo de 95% de confiança para medição de deslocamentos controlados do plano no ar, água (SVP) e (Refra). Valores em milímetros.	227
Tabela 38 – Diferença entre a tendência utilizando o modelo Refra com o SVP na água (segunda coluna) e medições no ar (terceira coluna). Valores obtidos a partir dos dados das colunas 2, 3 e 4 da tabela 37. Valores em milímetros.	227
Tabela 39 – Desvio mínimo, máximo e σ [mm] para as medições na água processadas com o modelo SVP e Refra. Posições em itálico (14-18) estão muito fora do volume de medição e não foram utilizadas no cálculo do histograma.	237
Tabela 40 – Legenda de cores das posições do par de esferas e compilação do erro de distância entre centros (SSE) e apalpação (<i>PE</i> 1 e 2). Última coluna expõe o ângulo entre o vetor ($\mathbf{c1c2} = LPV$) e o eixo Z no SCO ($LPV \angle Z$). Os erros possuem escalas de cores do verde (menor) ao vermelho (maior). Os ângulos possuem escala reversa de cores.	243
Tabela 41 – Legenda de cores das posições do par de esferas e compilação do erro de distância entre centros (SSE), apalpação (<i>PE</i> 1 e	

2) para medição na água com modelo SVP e Refra. Última coluna expõe o ângulo entre o vetor distância dos centros das esferas ($\mathbf{c1c2} = \mathbf{LPV}$) e o eixo Z no SCO ($\mathbf{LPV}\Delta$). Os erros possuem escalas de cores do verde (menor) ao vermelho (maior). Os ângulos possuem escala reversa de cores.	248
Tabela 42 – Valor máximo, mínimo, médio e desvio padrão dos erros de distância entre centros (SSE) em milímetros obtido para os três casos de medição.	249
Tabela 43 – Valor máximo, mínimo, médio e desvio padrão dos erros de apalpação (PE) em milímetros obtido para os três casos de medição.	250
Tabela 44 – Compilação dos resultados (em milímetros e %) e comparação da diferença relativa entre Água (Refra) e Ar.	255
Tabela 45 – Principais fontes de incerteza de um sistema de visão estéreo ativo com projeção de franjas utilizado no ar e através de interfaces de refração (ex.: medição na água).	256
Tabela 46 – Balanço de incerteza da componente aleatória e erro sistemático não proporcional à distância medida.	259
Tabela 47 – Padrão seguido nas figuras das comparações ar/água.	260
Tabela 48 – Análise do ruído da medição na área indicada na figura 186. Valores em milímetros.	277
Tabela 49 – Comparação dos desvios obtidos da medição da placa com cavidade preenchida com solda utilizando: a) Otimização completa ($\mathbf{A}, d0, \mu2$), b) Parcial (somente \mathbf{A}) ou c) Nenhuma (valores de referência).	280
Tabela 50 – Comparação dos resultados obtidos na tese com sistema de medição similar.	291
Tabela 51 – Síntese comparativa dos métodos de calibração dos parâmetros de refração com suas principais limitação e aspectos positivos.	297
Tabela 52 – Resumo da avaliação do sistema no ar e água.	299
Tabela 53 – Principais especificações das câmeras do sistema estéreo (POINTGREY (FLIR), 2017).	322
Tabela 54 – Especificações da lente de 8 mm da Computar utilizada no sistema estéreo (COMPUTAR, 2017b).	323

Tabela 55 – Especificações do projetor LG / HS101 (LG, 2007).	323
Tabela 56 – Comparação entre eixos e distâncias as janelas de referência e os obtidos na calibração. Dimensões em milímetros.....	327

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D	Espaço bidimensional
3D	Espaço tridimensional
AOV	<i>Angle Of View</i>
AIPR	Através de interfaces planas de refração
AREM	<i>Autonomous Robot for Environmental Monitoring</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DIDSON	<i>Dual-frequency identification sonar</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
INPetro	Instituto de Petróleo, Energia e Gás
InvProjRefra	Método para a Projeção Inversa Através de Interfaces Planas de Refração
InvT	Triangulação inversa
IteraProjRefra	Algoritmo Iterativo para a Projeção Através de Interfaces Planas de Refração
JTC	Janela Totalmente Corretiva
Labmetro	Laboratório de Metrologia e Automatização
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
MO3S	Medição óptica de formas 3D em meio subaquático
NaN	<i>Not a Number</i>
NCC	<i>Normalized Cross-Correlation</i>
nSVP	<i>Non-Single-View Point</i> (Sem centro único de projeção)
OpenCV	Biblioteca aberta de processamento de imagens em C++
O&G	(indústria do) óleo & gás
PE	Erro de apalpação (<i>Probing Error</i>)
POR	<i>Plane Of Refraction</i>

Refra	Modelagem física do caminho da luz através de interfaces planas de refração
ROV	<i>Remotely Operated underwater Vehicle</i>
SCC	Sistema de coordenadas da câmera
SCO	Sistema de coordenadas do objeto
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SHIC	Shearografia Aplicada à Inspeção de Compósitos
SIFT	<i>Scale-Invariant Feature Transform</i>
SSE	Estimativa do erro de escala, diferença entre a distância entre esferas medida e a calibrada (<i>Sphere Spacing Error</i>)
STIL	<i>Streak Tube Imaging Lidar</i>
STL	Sistema de Triangulação a Laser
SURF	<i>Speeded Up Robust Features</i>
SVP	<i>Single-View Point</i> (ponto único de visão, câmera central, <i>pinhole</i>)
TNCC	<i>Temporal Normalized Cross-Correlation</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
XYZScan	Varredura em <i>XYZ</i> com incremento gradual da resolução e limites de forma livre
ZScan	Varredura em <i>Z</i> com incremento gradual da resolução
ZScan2	Varredura em <i>Z</i> com incremento gradual da resolução com maior tolerância a descontinuidades no mapa de fase

LISTA DE SÍMBOLOS

- *Gerais*
 - $\bar{\epsilon}$ Erro médio.
 - $\bar{\epsilon}_{min}, \bar{\epsilon}_{max}$ Erro mínimo e máximo.
 - σ Desvio padrão.
 - ϕ Diâmetro.
 - \cdot Produto escalar (*dot product*).
 - \times Produto vetorial (*cross product*) ou multiplicação simples, quando entre escalares.
 - $\mathbf{a} \angle \mathbf{b}$ Ângulo entre dois vetores quaisquer \mathbf{a} e \mathbf{b} .
- *Modelo de câmera SVP*
 - \mathbf{M} Ponto no espaço tridimensional em coordenadas do objeto.
 - \mathbf{m} Ponto no plano imagem em coordenadas da imagem
 - $\tilde{\mathbf{M}}$ Ponto \mathbf{M} em coordenadas homogêneas.
 - $\tilde{\mathbf{m}}$ Ponto \mathbf{m} em coordenadas homogêneas.
 - P Matriz de projeção (parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera).
 - K Matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera.
 - R Matriz de rotação de sistema de coordenadas.
 - \mathbf{t} Vetor de translação de sistema de coordenadas.
 - $R\mathbf{t}$ Matriz de transformação de sistema de coordenadas. $R\mathbf{t} = [R|\mathbf{t}]$.
 - (u, v) Coordenadas de um ponto no plano imagem em coordenadas da imagem.
 - (u_0, v_0) Coordenadas do centro de projeção em coordenadas da imagem.
 - f Comprimento focal.
 - $\tilde{\pi}$ Plano imagem.
 - $\tilde{\theta}$ Ângulo entre eixo u e v no plano imagem.

- γ Fator de desalinhamento (*skew factor*) no plano imagem.
- (x, y) Coordenadas no plano imagem sem distorção da lente (*pinhole*)
- C** Centro de projeção e sistema de coordenadas da câmera.
- *Modelo de distorção de lentes*

k_i Coeficiente de distorção radial i de ordem $2i$.

ξ_i Coeficiente de distorção tangencial i

r Distância do centro de projeção a um ponto x, y em coordenadas da câmera

(x_d, y_d) Coordenadas no plano imagem considerando a distorção da lente

(\bar{x}_d, \bar{y}_d) Distância do ponto na imagem (com distorção) ao centro de projeção (u_0, v_0) :
 $(\bar{x}_d, \bar{y}_d) = (x_d - u_0, y_d - v_0)$
 - *Triangulação Inversa*

$\delta x, \delta y, \delta z$ Resolução em X, Y e Z .

$N_{X,Y,Z}$ Número de valores discretizados em um dos eixos (XYZ).

N_{XY} Total de nós discretizados na malha XY .

N_{XYZ} Total de pontos discretizados em todo volume de medição.

N_{zt} Número de valores discretizados em Z .

$V(Z)$ Relação de correspondência entre imagens na cota Z .

Δ Quando sozinho representa o passo da derivada.

x_{min}, x_{max} Limite inferior e superior do volume de medição no eixo X .

z_{Lmin}, z_{Lmax} Valores em Z máximo e mínimo válidos obtido no ZScan2.

τ_{Cormax} Constante que define o valor máximo de busca por uma diferença de fase válida no ZScan2.

τ_{tol} Tolerância do algoritmo *IteraProjRefra*.

$\tau_{itermax}$	Número máximo de iterações do algoritmo <i>IteraProjRefra</i> .
τ_K	Constante de multiplicação do algoritmo <i>IteraProjRefra</i> .
\mathbf{m}_c	Vetor de correção em pixel do algoritmo <i>IteraProjRefra</i> .
\mathbf{V}_e	Vetor de erro normalizado do algoritmo <i>IteraProjRefra</i> .
n	Número de graus de refino.

- *Modelo de refração*

\tilde{n}	Plano de refração (POR).
θ	Ângulo do caminho óptico de um feixe de luz e o vetor normal a superfície.
μ	Índice de refração.
N	Número de imagens.
n	Número de meios de refração ou número de iterações.
\mathbf{v}	Vetor unitário de direção do caminho óptico da luz.
\mathbf{q}	Ponto de interseção do feixe com interface de refração.
\mathbf{p}_p	Ponto qualquer no plano.
\mathbf{A}	Eixo da câmera. É normal às interfaces planas de refração e tem início no centro de projeção.
$\hat{\mathbf{n}}$	Vetor unitário normal à superfície de refração.
s	Comprimento do feixe no meio de refração.
L	Comprimento total do caminho óptico.
t_{OPL}	Tempo do caminho óptico.
d	Espessura do meio de refração.
w	Componente X do comprimento do feixe.
\tilde{v}	Velocidade da luz no meio.
β	Fator multiplicativo da direção normal ($\hat{\mathbf{n}}$) no cálculo da direção do vetor refratado (\mathbf{v}_{i+1}).

- α Fator multiplicativo da direção do vetor incidente (\mathbf{v}_i) no cálculo da direção do vetor refratado (\mathbf{v}_{i+1}).
- μ_r Relação entre o índice de refração do meio $i + 1$ e o i : $\mu_r = \mu_{i+1}/\mu_i$.
- c_1 Cosseno do ângulo entre o vetor incidente e a normal a superfície: $c_1 = \cos(\theta_1)$.
- $\overline{c_2 c_1}$ Vetor distância entre feixes projetados ou distância entre centros das esferas do padrão de par de esferas.
- S** Ponto de um padrão no espaço 3D com posição relativa conhecida
- Modelo de magnificação janela plana e domo*

Δ_{lens} Magnificação lente.

Δ_{mf} Magnificação janela plana.

Δy Variação na altura do campo de visão devido à variação no índice de refração

φ Ângulo entre o eixo da câmera e a linha formada pelos pontos F e interseção de feixe vindo do objeto paralelo ao eixo da câmera com a interface.

y_m Altura da imagem sem refração.

y'_m Altura da imagem considerando a refração.

x_w Distância da janela ao objeto sem considerar a refração.

x'_w Distância da janela ao objeto considerando a refração.

X_m Distância da imagem ao centro de projeção considerando refração.

y_w Altura do objeto.

y_a Comprimento da seção da janela plana de refração limitada entre o ponto de interseção da janela com o caminho óptico que passa pelo centro de projeção e a interseção do feixe perpendicular ao eixo da câmera.

y_b Comprimento da seção da janela plana de refração limitada entre o eixo da câmera e o ponto de interseção da janela com o caminho óptico que passa pelo centro de projeção.

d	Distância entre o centro de projeção e o foco da interface domo.
r	Raio da janela domo.
•	<i>Correlação e projeção de franjas</i>
ϕ	Fase.
Φ	Mapa de fase.
$\delta\phi$	Defasagem de fase.
$ \Delta\phi $	Módulo da diferença de fase.
$ \Delta\phi _{min}$	Mínimo valor absoluto (módulo) da diferença de fase.
$ \Delta\phi _{max}$	Valor máximo tolerado do módulo da diferença de fase.
$\sigma\phi_{max}$	Desvio padrão máximo do módulo da diferença de fase dos pontos interpolados.
Γ	Modulação (de 0 a 255).
Γ_{min}	Modulação mínima.
Γ	Mapa de modulação.
$I(u, v)$	Intensidade obtida na imagem no ponto (u, v) .
I_f	Intensidade de fundo.
N	Número de franjas projetadas.
$\rho_{NCC}(u, v, i, j)$	Coefficiente de correlação cruzada normalizada (NCC) no ponto (u, v) em relação a mesma coordenada na outra imagem com delta de (i, j) .
σ_{ab}	Covariância entre a e b .
σ_a	Desvio padrão de a .
(i, j)	Delta de um ponto (u, v) na imagem.

- *Padrões*

D_{P1} Diâmetro calibrado da esfera 1.

D_{P2} Diâmetro calibrado da esfera 2.

L_P Distância calibrada entre centro das esferas.

\mathbf{L}_{PV} Vetor entre os centros das esferas.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	47
1.1	Motivação.....	50
1.2	Objetivos gerais.....	51
1.3	Objetivos específicos.....	51
1.4	Considerações importantes.....	51
1.5	Estrutura do documento.....	52
2	Medição óptica de formas 3D.....	53
2.1	Modelo de câmara pinhole.....	53
2.2	Calibração de câmara pinhole e distorções.....	56
2.2.1	<i>Tipos de calibração.....</i>	<i>56</i>
2.2.2	<i>Correção de distorções.....</i>	<i>58</i>
2.3	Outras modelagens de câmaras.....	60
2.4	Sistemas de visão estéreo.....	61
2.4.1	<i>Triangulação direta (Clássica) e geometria epipolar.....</i>	<i>62</i>
2.4.2	<i>Triangulação inversa.....</i>	<i>63</i>
2.5	Identificação de pontos correspondentes.....	69
2.5.1	<i>Identificação sem projeção (passiva).....</i>	<i>70</i>
2.5.2	<i>Identificação com projeção (ativa).....</i>	<i>72</i>
3	Medição óptica de formas 3D em meio subaquático.....	81
3.1	Propagação da luz em meio subaquático.....	81
3.1.1	<i>Degradação do sinal.....</i>	<i>81</i>
3.1.2	<i>Melhoria do sinal de luz.....</i>	<i>83</i>
3.1.3	<i>Refracção e lei de Snell.....</i>	<i>86</i>
3.2	Tipos de janela de visão (interface ar/água).....	88
3.2.1	<i>Janela plana (flat port).....</i>	<i>89</i>
3.2.2	<i>Janela domo (dome port).....</i>	<i>92</i>
3.2.3	<i>Janela totalmente corretiva (fully corrective port).....</i>	<i>94</i>
3.2.4	<i>Lentes para uso subaquático (lentes “molhadas”).....</i>	<i>97</i>
3.3	Sistemas de medição em meio subaquático (ópticos e acústicos)	97
3.3.1	<i>Triangulação laser.....</i>	<i>98</i>

3.3.2	<i>LiDAR - Light Detection and Ranging</i>	101
3.3.3	<i>Fotogrametria</i>	103
3.3.4	<i>Structure from Motion (SfM)</i>	104
3.3.5	<i>Estereoscopia ativa e passiva</i>	106
3.3.6	<i>Sonar</i>	108
3.3.7	<i>Sistemas híbridos (sonar + óptico)</i>	113
3.4	Calibração de câmeras para uso subaquático	114
3.4.1	<i>Modelo para uma interface plana de refração</i>	115
3.4.2	<i>Modelo para múltiplas interfaces planas de refração</i>	118
3.4.3	<i>Modelo para Interface domo</i>	126
3.4.4	<i>Aproximação utilizando SVP</i>	126
3.4.5	<i>Comparação das técnicas de calibração</i>	130
3.5	Discussão.....	131
4	Triangulação inversa através de interfaces planas de refração	135
4.1	Modelagem geral.....	135
4.2	Triangulação inversa	139
4.2.1	<i>Compilação dos parâmetros utilizados</i>	139
4.2.2	<i>Volume de medição – Cálculos relacionados</i>	141
4.2.3	<i>Triangulação inversa</i>	142
4.2.4	<i>Refino em Z (ZScan)</i>	145
4.2.5	<i>Refino em Z com maior tolerância a descontinuidades (ZScan2)</i>	149
4.2.6	<i>Refino em XY</i>	153
4.2.7	<i>Medição com volume de procura de forma livre (XYZScan)</i>	154
4.3	Projeção através de interfaces planas de refração	154
4.3.1	<i>Método para a projeção inversa através de interfaces planas de refração (InvProjRefra)</i>	154
4.3.2	<i>Algoritmo iterativo para a projeção através de interfaces planas de refração (IteraProjRefra)</i>	158
4.4	Calibração dos parâmetros de refração.....	160
4.5	Visão geral da proposta.....	164
5	Materiais e métodos	167
5.1	Configuração dos experimentos	168
5.2	Sistema óptico estéreo ativo com projeção de franjas.....	171

5.3	Procedimentos e configuração de processamento	172
5.4	Calibração.....	174
5.4.1	<i>Padrão de calibração da câmera.....</i>	<i>175</i>
5.4.2	<i>Calibração no ar (SVP)</i>	<i>176</i>
5.4.3	<i>Calibração na água (SVP).....</i>	<i>177</i>
5.4.4	<i>Calibração na água – parâmetros de refração (Refra)</i>	<i>178</i>
5.5	Avaliação do sistema e medições	180
5.5.1	<i>Avaliação com plano baseada na VDI/VDE 2634</i>	<i>180</i>
5.5.2	<i>Avaliação com par de esferas baseada na VDI/VDE 2634.....</i>	<i>182</i>
5.5.3	<i>Avaliação com objetos de forma complexa calibrados.....</i>	<i>185</i>
5.5.4	<i>Objetos não calibrados (exemplos de medição).....</i>	<i>187</i>
5.6	Visualização e análise dos resultados	188
6	Resultados experimentais e discussões	191
6.1	Implementação do código para a medição.....	191
6.1.1	<i>Código inicial em MATLAB.....</i>	<i>191</i>
6.1.2	<i>Otimização do código (C++) e avaliação da performance</i>	<i>192</i>
6.1.3	<i>Interface final (Labview).....</i>	<i>193</i>
6.2	Calibração das câmeras no ar (SVP)	195
6.2.1	<i>Aquisição das imagens.....</i>	<i>195</i>
6.2.2	<i>Parâmetros obtidos</i>	<i>196</i>
6.2.3	<i>Erro de reprojeção.....</i>	<i>199</i>
6.3	Calibração das câmeras na água (SVP)	201
6.3.1	<i>Parâmetros obtidos</i>	<i>201</i>
6.3.2	<i>Relação com a calibração no ar</i>	<i>204</i>
6.3.3	<i>Comparação da correção da distorção.....</i>	<i>205</i>
6.4	Calibração na água – parâmetros de refração (Refra).....	207
6.4.1	<i>Parâmetros de refração conhecidos.....</i>	<i>208</i>
6.4.2	<i>Aquisição das imagens.....</i>	<i>209</i>
6.4.3	<i>Parâmetros de refração obtidos.....</i>	<i>209</i>
6.4.4	<i>Influência da variação das distâncias.....</i>	<i>213</i>
6.4.5	<i>Influência da variação do índice de refração</i>	<i>215</i>
6.5	Avaliação do volume de medição.....	217
6.6	Avaliação com plano	218
6.6.1	<i>Plano na mesma posição no ar e na água.....</i>	<i>218</i>

6.6.2 Plano normal em posições controladas (Z).....	224
6.6.3 Plano em poses rotacionadas em XY (VDI/VDE)	232
6.7 Avaliação com par de esferas (VDI/VDE).....	240
6.8 Comparação de todos os resultados obtidos.....	253
6.9 Balanço de incertezas.....	255
6.10 Avaliação com objetos de referência.....	260
6.10.1 Cabeça de manequim	261
6.10.2 Calibração SVP no ar utilizada para medições na água.....	270
6.10.3 Placa com cavidade preenchida com cordões de solda.....	271
6.11 Comparação da calibração com e sem otimização	278
6.12 Outros exemplos de medição	281
6.12.1 Tubo de PVC amassado	281
6.12.2 Trecho de riser de 6” (152 m) de diâmetro nominal interno	285
6.13 Avaliações não realizadas	288
6.14 Problemas encontrados.....	288
6.15 Discussão.....	289
7 Conclusões.....	293
7.1 Principais contribuições	293
7.2 Comparação das técnicas desenvolvidas em relação ao estado da arte.....	295
7.3 Principais conclusões do trabalho	298
7.4 Sugestões para trabalhos futuros	300
Referências	303
Apêndice A – Princípio de Fermat e Projeção direta para três meios.....	317
A.1 Princípio de Fermat	317
A.2 Dedução da lei de Snell.....	318
A.3 Menor caminho óptico para três meios de propagação	320
Apêndice B – Parâmetros do sistema óptico estéreo	321
Apêndice C – Obtenção da posição das janelas do tanque por parâmetros extrínsecos	325

1 INTRODUÇÃO

Existem diversas aplicações para a medição óptica de formas 3D em meio subaquático. Exemplos na indústria incluem a inspeção de cascos e hélices de embarcações, portos, tubulações, estruturas e equipamentos marítimos em geral. A figura 1 ilustra a grande diversidade de equipamento e estruturas utilizadas para a exploração de óleo e gás. Além da indústria pesada, a medição de formas em meio subaquático também é importante em outras áreas, como a de ciências biológicas, geologia e arqueologia, onde a medição subaquática possibilita o mapeamento de corais, do leito do oceano e de artefatos antigos. A figura 2 mostra exemplos de artefatos arqueológicos submersos. A medição da sua forma 3D é uma poderosa ferramenta para auxiliar no seu estudo, uma vez que a escavação arqueológica geralmente resulta em danos irreversíveis, sendo assim deve-se assegurar que uma extensa documentação seja realizada durante o processo (DRAP et al., 2015).

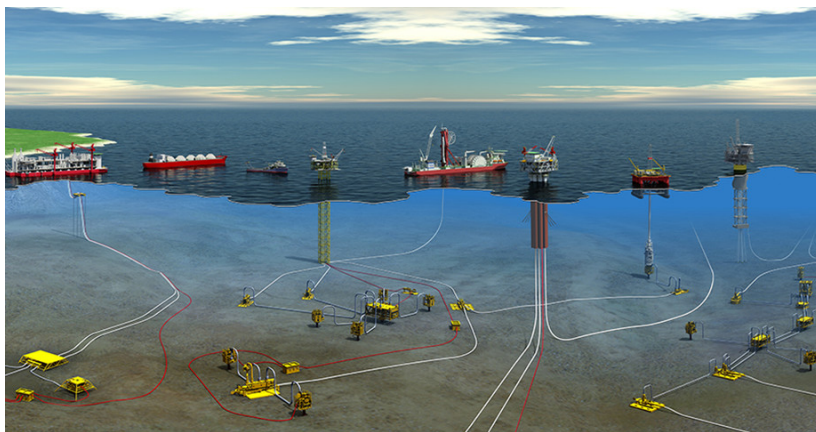


Figura 1 – Estruturas submersas na indústria de óleo & gás (GENESIS, 2017).



Figura 2 –Mergulhador cara a cara com esfinge de granito negro da civilização submersa de Alexandria no Egito (GODDIO, 2004) (topo). Vasos em sítio arqueológico a 328 m de profundidade (DRAP et al., 2015).

Sistemas de ultrassom (ou sonares) têm dominado as medições geométricas subaquáticas por muitos anos, uma vez que a água é um excelente acoplante acústico. No entanto, a incerteza de medição de sonares geralmente é da ordem de dezenas e até mesmo centenas de milímetros e a resolução muito grosseira. Recentemente, métodos ópticos de inspeção tem ganhado espaço nas medições em pequenas distâncias - limitada pelo espalhamento (*scattering*) e atenuação da luz - uma vez que possibilitam medições com grande riqueza de detalhes e melhores (menores) incertezas, podendo chegar a décimos de milímetro ou menos. A figura 3 contrasta a medição manual com escala rígida sendo realizada por um mergulhador, com o resultado de medição de um sistema comercial óptico por triangulação laser para uso subaquático. Além de medições de alta qualidade, a medição por métodos ópticos ajuda a diminuir a necessidade de medições manuais, feitas por mergulhadores, que é uma atividade de risco, muitas vezes demorada e com resultados limitados.

Sistemas de medição óptica também podem ser acoplados em ROVs (*Remoted Operated underwater Vehicle*) (NEGAHDARIPOUR; FIROOZFAM, 2006) (DRAP et al., 2015) ou AUVs (*Autonomous Underwater Vehicle*) (KOCÁK et al., 2004), sendo uma ferramenta extra para esses equipamentos.

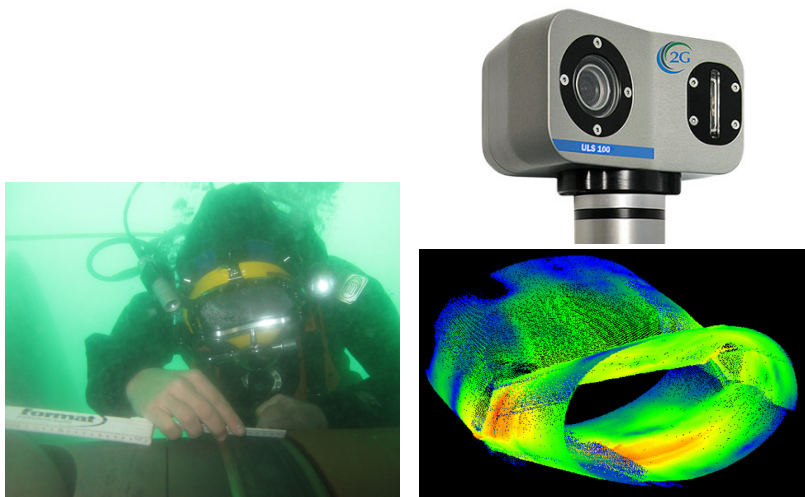


Figura 3 –Medição manual utilizando escalas rígidas feita por um mergulhador (esquerda) (“FN Diving webpage - Inspection”, 2011). Sistema de medição subaquática por triangulação laser e respectivo resultado de medição de um tubo amassado (direita) (“2G Robotics”, 2015).

O principal desafio da medição por meios ópticos em ambientes subaquáticos é encontrar maneiras de lidar com os efeitos causados à luz ao ser propagada na água, além da mudança do caminho óptico devido à refração. A modelagem das interfaces ar/vidro/água e seu efeito em sistemas ópticos ainda é um tema não consolidado e é tópico de recentes estudos (TREIBITZ et al., 2012) (AGRAWAL et al., 2012) (KANG; WU; YANG, 2012) (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b)(JORDT; KÖSER; KOCH, 2016). A compreensão e modelagem da refração em sistemas ópticos subaquáticos visa a compensação desse fenômeno na calibração de câmeras¹ e o desenvolvimento de ópticas corretivas. Esse estudo é de extrema importância uma vez que a calibração de um sistema óptico sem considerar a refração pode levar a erros grosseiros de medição. No caso da visão humana, o desenvolvimento de máscaras de mergulho que compensam a refração pode ser de grande importância para

¹ A palavra “câmera” no presente trabalho, quando não especificado diferente, representa o conjunto “câmera e lente objetiva”.

mergulhadores profissionais, já que a refração causa distorções na percepção de distâncias e no tamanho dos objetos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Conforme descrito anteriormente, a medição óptica de formas 3D em meio subaquático (MO3S) é uma técnica de grande interesse para diversas áreas. No caso da indústria do óleo & gás (O&G) há uma variedade de estruturas em que a técnica pode ser utilizada, incluindo *risers*², sistemas de ancoragem, válvulas e partes estruturais em geral. O Labmetro (Laboratório de Metrologia e Automatização - UFSC) desenvolve projetos na área de O&G em parceria com a Petrobras há quase 20 anos. Atualmente, o projeto SHIC 2 (Shearografia Aplicada à Inspeção de Compósitos), inclui o estudo de um possível sistema de medição de deformação por shearografia em meio subaquático. O presente trabalho visa contribuir com este projeto e com o avanço desta linha de pesquisa voltada à medição óptica subaquática. Novos projetos de pesquisa, com o foco em medição de formas 3D subaquática, poderão beneficiar-se ainda mais da presente tese.

O INPetro (Instituto de Petróleo, Energia e Gás), conta em sua instalação com uma piscina de testes, que poderá ser utilizada para a realização de ensaios com MO3S, inclusive, com ROVs. O interesse pelo desenvolvimento deste tipo de ferramenta parte também da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), a qual realizou um *Workshop* em 2014, onde participaram empresas e organizações com experiência no desenvolvimento de submergíveis, equipamentos robotizados e sensores em geral. A equipe do Labmetro foi convidada, justamente com a proposta de desenvolver uma ferramenta para MO3S.

Por fim, a tese proposta visa vencer o desafio da realização da MO3S com pequena incerteza, sendo o início de uma nova linha de pesquisa no Labmetro, mas ao mesmo tempo, firmemente baseada no conhecimento atual do grupo de pesquisa em medição de formas 3D no ar.

² Tubulações que transportam hidrocarbonetos de embarcações ou plataformas a equipamentos no fundo do mar.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver e validar através de experimentos controlados no ar e em meio subaquático técnicas para realizar a calibração e medição com um sistema óptico estéreo ativo com visão através de interfaces planas de refração utilizando a triangulação inversa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral contempla os seguintes objetivos específicos:

- Estudo da modelagem da propagação da luz na água e levantamento do estado da arte em técnicas de melhoria da qualidade de imagem;
- Levantamento de sistemas disponíveis e do estado da arte para medições 3D subaquáticas;
- Estudo do estado da arte sobre calibração de câmera para uso subaquático;
- Implementação/desenvolvimento de código para calibração dos parâmetros de refração;
- Desenvolvimento e avaliação teórica e prática de triangulação inversa através de duas interfaces planas de refração não necessariamente perpendiculares ao eixo da câmera;
- Montagem em laboratório de sistema para medição subaquática com volume de medição em torno de $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ e erro 3D máximo de alguns décimos de milímetros.
- Avaliação metrológica do sistema desenvolvido baseado na VDI/VDE-2634 (VDI/VDE-2634, 2008);
- Avaliação do erro de medição realizando a comparação do resultado obtido com objetos de forma complexa calibrados.

1.4 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

O termo “interfaces planas”, quando não especificado o contrário, refere-se a “interfaces plano-paralelas”.

Os algoritmos e códigos computacionais desenvolvidos para realizar a triangulação inversa através de interfaces planas de refração também podem ser utilizados para o processamento no ar, tanto configurando os índices de refração todos iguais a um e/ou espessura dos meios iguais a zero, como não passando parâmetros de refração na chamada do método.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O documento está dividido em sete capítulos. No capítulo 2 é apresentada a modelagem de câmeras no ar e sua calibração. Em sequência, descreve-se a medição estéreo e o estado da arte em técnicas de detecção de pontos correspondes para a triangulação.

O capítulo 3 expõe técnicas de modelagem da propagação da luz e melhoria da qualidade da imagem em meio subaquático. São descritos os tipos de janelas de visão (interface ar/água); sistemas de medição subaquática, incluindo sonares e sistema híbridos (opto-acústicos). Nas últimas duas seções do capítulo, é descrito o teorema de Fermat, modelagem da refração em interfaces planas de refração e calibração de câmeras para meio subaquático.

No capítulo 4 apresenta-se os conceitos desenvolvidos na presente tese, incluindo: calibração dos parâmetros de refração; triangulação através de interfaces planas de refração e método de refino com maior tolerância a descontinuidades (*ZScan2*). Os procedimentos adotados, incluindo a configuração dos experimentos são descritos no capítulo 5. Já o capítulo 6 expõe e discute os resultados obtidos.

Por fim, as principais contribuições, análise das técnicas desenvolvidas em relação ao estado da arte e conclusões finais são expostas no capítulo 7.

2 MEDIÇÃO ÓPTICA DE FORMAS 3D

A presente tese se fundamenta em técnicas de visão computacional, que englobam a modelagem matemática da formação de imagens em câmeras, projeção de padrões, processamento de imagens, detecção de pontos correspondentes (ou homólogos, isto é, pontos nas imagens que representam o mesmo ponto na cena/objeto) e sua triangulação para cálculo da forma 3D. Esses tópicos são abordados a seguir.

2.1 MODELO DE CÂMERA *PINHOLE*

Uma câmera escura, também denominada de câmera *pinhole*, consiste de uma estrutura onde a principal entrada de luz é um furo (*pinhole*). A luz da cena externa é projetada através do furo na superfície interior, formando uma imagem do exterior rotacionada em 180°, conforme ilustra a figura 4. O resultado pode ser surpreendente, como mostra a foto do interior de um quarto na figura 5. Câmeras modernas também são “câmeras escuras”, porém utiliza-se um sensor eletrônico para captar e digitalizar a imagem e lentes no lugar do pequeno furo.

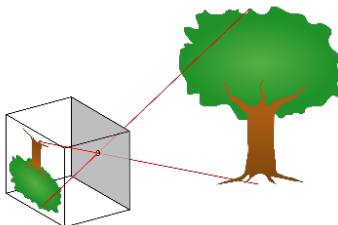


Figura 4 – Esquemático de uma câmera escura - *pinhole* (MELLISH, 2003).



Figura 5 – *Câmara escura – pinhole*, projeção do exterior na parede de um quarto de uma casa abandonada através de um pequeno furo na janela. Local: leste de Baltimore, EUA (BRUCE, 2012).

A modelagem matemática deste tipo de câmera é conhecida como modelo *pinhole*, câmera central, ou de ponto único de visão (SVP, *Single-View Point*). A figura 6 mostra a projeção de um ponto 3D qualquer, dado por $\mathbf{M} = [X \ Y \ Z]^T$, através do centro óptico \mathbf{C} , interseccionando o plano imagem $\tilde{\pi}$ no ponto 2D $\mathbf{m} = [u, v]^T$. Por simplicidade, o plano imagem está posicionado entre o centro de projeção e o objeto, o que facilita o desenho do sistema de coordenadas da imagem no esquema e também seu equacionamento, sem a inversão do sinal das coordenadas. Fisicamente, o plano imagem está atrás do centro óptico e rotacionado em 180° , conforme exposto anteriormente nas figuras 4 e 5.

Deve-se atentar que a projeção de um ponto 3D para o plano imagem é uma projeção direta (*forward projection*), já o caminho inverso, é denominado de projeção inversa e resulta em uma linha onde o ponto 3D está contido.

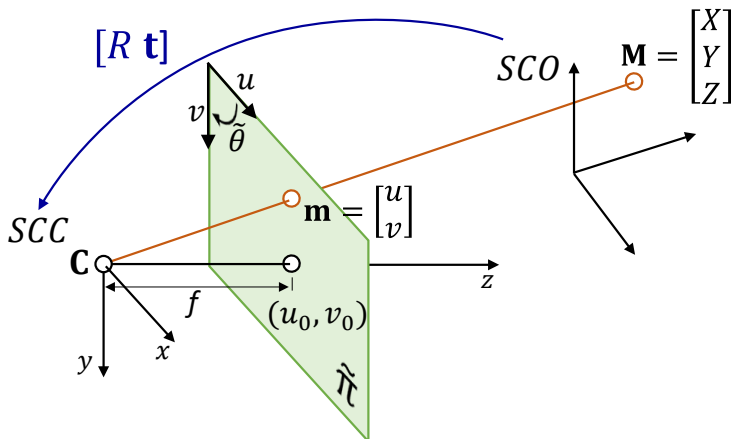


Figura 6 – Modelo computacional de câmera *pinhole*. Ponto \mathbf{M} projetado no ponto \mathbf{m} no plano imagem $\tilde{\pi}$. Adaptado de (ZHANG, 2004).

Expandindo os pontos para coordenadas homogêneas, tem-se $\tilde{\mathbf{m}} = [u \ v \ 1]^T$ e $\tilde{\mathbf{M}} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$. Conforme (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004) (ZHANG, 2004), a relação entre o ponto 3D e o 2D é dada pela equação:

$$\tilde{\mathbf{m}} = K[R \ \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}} \equiv P\tilde{\mathbf{M}}, \quad (1)$$

sendo:

$$K = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$P = K[R \ \mathbf{t}], \quad (3)$$

$$\gamma = f_u \cot(\tilde{\theta}), \quad (4)$$

onde a matriz K representa os *parâmetros intrínsecos* (ou internos) da câmera, sendo (u_0, v_0) a posição do centro de projeção no plano imagem; f_u, f_v os fatores de escala nos eixos X e Y ; γ o fator de desalinhamento (*skew factor*) entre os eixos. Para pixels quadrados, o que é o caso da grande maioria dos sensores comerciais, $f_u = f_v$ e $\gamma = 0$, uma vez que $\tilde{\theta} = 90^\circ$ (ZHANG, 2004). Os *parâmetros extrínsecos* (ou externos), definidos pela matriz de rotação R e o vetor de translação \mathbf{t}

relacionam o sistema de coordenadas global ou do objeto (SCO) com o da câmera (SCC). Por fim, P é a matriz de projeção, que engloba os parâmetros intrínsecos e extrínsecos. Por simplicidade do texto, a transformação para coordenadas homogêneas será subentendida. Sendo assim, a equação (1) também pode ser escrita como:

$$\mathbf{m} = K[R \quad \mathbf{t}]M \equiv PM. \quad (5)$$

2.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMERA *PINHOLE* E DISTORÇÕES

Para obtenção dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera descritos anteriormente é necessário realizar sua calibração. Métodos típicos de calibração utilizam um padrão plano, tipo tabuleiro de xadrez (*checkerboard*). Uma série de imagens é obtida e os parâmetros são estimados a partir das correspondências 2D-3D. A seguir, são descritos os principais métodos de calibração, assim como a correção das distorções.

2.2.1 Tipos de calibração

Conforme (ZHANG, 2004), as quatro principais técnicas de calibração de câmeras (no caso SVP) são:

1D - Calibração baseada em linha

Os objetos utilizados nessa categoria são compostos por pontos colineares. É possível calibrar a câmera se for imposta uma restrição ao movimento do padrão, como por exemplo, rotação em torno de um ponto fixo. Tal restrição pode ser eliminada se algum dos parâmetros da câmera forem conhecidos ou para o caso da calibração de um sistema de visão estéreo (FRANÇA et al., 2011). Em (DE FRANÇA et al., 2010) o método descrito em (ZHENGYOU ZHANG, 2004) é revisado. Como resultado obteve-se um método de menor complexidade e capaz de melhor estimar os parâmetros da câmera.

2D - Calibração baseada em objeto 2D (plano)

O padrão utilizado neste método consiste de um conjunto de pontos conhecidos dispostos em um mesmo plano. Para tal, tipicamente utiliza-se padrões de retângulos pretos e brancos estilo tabuleiro de xadrez (ver

figura 7), sendo os pontos 2D definidos pelas quinas de interseção. O padrão 2D pode ser impresso e colado sobre uma superfície plana, como um vidro grosso e a distância dos pontos pode ser medida com um microscópio de medição, por exemplo. A partir de uma série de imagens (tipicamente 8) é possível calibrar a câmera, conforme (ZHENGYOU ZHANG, 1999). É um método de calibração muito conveniente, uma vez que não é necessário conhecer a posição do plano e o padrão pode ser feito de maneira simples. Além disso, existem *softwares* gratuitos, como uma *toolbox* para Matlab (BOUGUET, 2013) que possibilitam a calibração por este método.

Este tipo de calibração requer a identificação dos pontos 2D de interesse na imagem. Um método (denominado de ChESS) para identificação robusta desses pontos é descrito em (BENNETT; LASENBY, 2014). Apesar do padrão xadrez ser o mais comum, existem variações, como o uso de padrão circulares (HEIKKILA; SILVEN, [s.d.]).

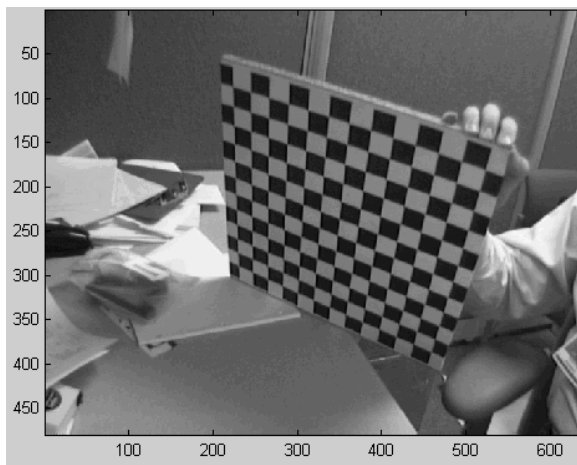


Figura 7 - Imagem típica numa calibração por objeto 2D tipo tabuleiro de xadrez (BOUGUET, 2013).

3D - Calibração baseada em objeto 3D

A calibração é realizada observando um objeto cuja geometria 3D é conhecida. Os objetos geralmente consistem de dois ou três planos ortogonais entre si. Outra opção é a realização de deslocamentos

controlados de um plano. A figura 8 ilustra ambos os casos. A calibração com objetos 3D geralmente resulta numa melhor estimativa dos parâmetros, sendo assim, esse deve ser o método de escolha quando é possível obter esse tipo de aparato e a redução do erro é prioridade (ZHANG, 2004).

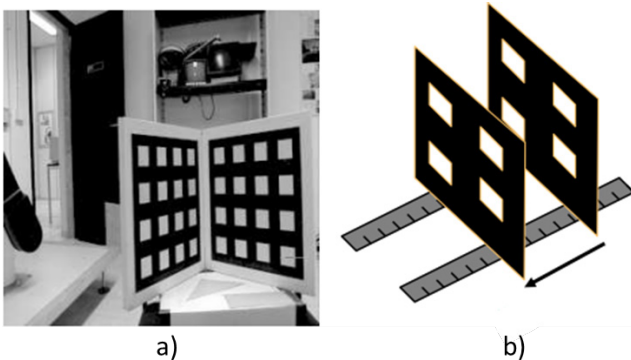


Figura 8 – Configuração para calibração utilizando dois planos ortogonais (a) e movimentos controlados de um plano (b). Adaptado de (ZHANG, 2004).

Autocalibração

Não utiliza nenhum aparato especial. A calibração é obtida através de múltiplas imagens em diferentes posições de uma mesma cena estática (HARTLEY, 1994). Necessita calcular um número maior de parâmetros, o que resulta em um problema matemático muito mais complexo. Apesar de utilizar a própria cena para a calibração, é necessário conhecer pelo menos a distância entre dois pontos, caso contrário, a calibração é adimensional, ou seja, carece do fator de escala correto.

Por fim, Sempre que possível, deve-se realizar a calibração prévia da câmera, uma vez que a auto calibração resulta em erros maiores nos parâmetros estimados (ZHANG, 2004).

2.2.2 Correção de distorções

Como a modelagem *pinhole* simplifica a lente objetiva para um ponto, é necessário compensar as distorções e não idealidades das lentes antes do cálculo de transformação para coordenadas de imagem. Conforme (BROWN, 1971), as distorções radial e tangencial (descentralização) das lentes podem ser modeladas por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{x}_d \\ \bar{y}_d \end{bmatrix} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) + \\ &\begin{bmatrix} \xi_1 (r^2 + 2\bar{x}_d^2) + \xi_2 \bar{x}_d \bar{y}_d \\ 2\xi_1 \bar{x}_d \bar{y}_d + \xi_2 (r^2 + 2\bar{y}_d^2) \end{bmatrix} (1 + \xi_3 r^2 + \xi_4 r^4 + \dots), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{sendo: } \begin{bmatrix} \bar{x}_d \\ \bar{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d - u_0 \\ y_d - v_0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$r^2 = x^2 + y^2;$$

(x_d, y_d) as coordenadas na imagem incluindo a distorção das lentes; (x, y) as coordenadas após a correção da distorção ou coordenadas teóricas projetadas conforme o modelo *pinhole*; k_i e ξ_i , respectivamente os coeficientes de distorção radial e tangencial. Esse modelo de distorções é largamente utilizado para a calibração de câmeras, como em (ZHENGYOU ZHANG, 1999) (HEIKKILA; SILVEN, [s.d.]). O número de parâmetros utilizados varia entre autores, (ZHENGYOU ZHANG, 1999) não considera a distorção tangencial e utiliza até a segunda ordem da distorção radial. A justificativa é que a grande maioria das distorções são radiais, uma vez que a descentralização geralmente é muito pequena devido à qualidade do processo de fabricação das lentes. Mais parâmetros, além de muitas vezes não melhorar de forma significativa a modelagem da distorção, podem causar instabilidade numérica (ZHENGYOU ZHANG, 1999). Um método de remoção de pontos espúrios, automatizando e otimizando a escolha dos parâmetros de distorção foi desenvolvido por (EL-MELEGY, 2003). A *toolbox* de calibração de câmeras para o Matlab (BOUGUET, 2013), muito difundida na comunidade científica, tem por padrão o modelo de distorções de (BROWN, 1971), onde considera as distorções³ radiais até ordem 6 e tangencias até ordem 2, sendo assim, a equação (6) fica:

³ Na *toolbox* (www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/) os coeficientes de distorção são armazenados em um vetor de nome *kc*. Sua relação com os parâmetros de distorção aqui descritos é: $kc(1) = k_1$; $kc(2) = k_2$; $kc(3) = \xi_2$; $kc(4) = \xi_1$ e $kc(5) = k_3$. Note que os dois coeficientes de distorção tangencial estão com índices trocados, tanto no código quanto na documentação da *toolbox*.

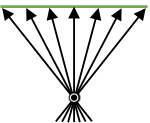
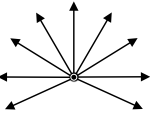
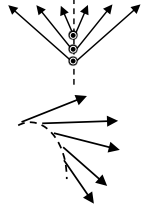
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{x}_d \\ \bar{y}_d \end{bmatrix} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ &+ \begin{bmatrix} \xi_1 (r^2 + 2\bar{x}_d^2) + \xi_2 \bar{x}_d \bar{y}_d \\ 2\xi_1 \bar{x}_d \bar{y}_d + \xi_2 (r^2 + 2\bar{y}_d^2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Além da correção de pontos individualmente, pode-se também criar um mapa de correção para todas as coordenadas da imagem, que pode ser utilizado para remover a distorção (*undistort*). Pode-se então trabalhar com a imagem somente com o modelo *pinhole*, o que facilita o processamento para o caso em que muito pontos são projetados.

2.3 OUTRAS MODELAGENS DE CÂMERAS

A modelagem SVP, onde todos os raios passam por um ponto, é adequada para a maioria das configurações de câmera. No entanto, existem casos em que essa modelagem pode ser insuficiente. A tabela 1 divide as modelagens de câmeras pelos tipos de distorção, conforme (SWAMINATHAN; GROSSBERG; NAYAR, 2003). Em câmeras axiais, as projeções dos feixes de luz passam todas por um mesmo eixo ao invés de um único ponto. Mais detalhes sobre a modelagem de câmeras axiais serão vistos no capítulo 3.4.

Tabela 1 – Taxonomia por distorção das modelagens de câmera. Adaptado de (SWAMINATHAN; GROSSBERG; NAYAR, 2003).

Esquemático	Modelo de imagem	Tipos de câmera	Tipo de distorção	Informação para remover distorção
	<i>Single-View Point (SVP)</i> Perspectiva	<i>Pinhole</i> (câmera ideal).	Nenhuma	N/A
	<i>Single-View Point (SVP)</i> Geral	Grande-angulares (<i>wide-angle</i>) ou olho de peixe; catadióptrica.	Radial, tangencial	Modelo de distorções
	<i>Non-Single-View Point (nSVP)</i>	Grande-angulares, olho de peixe, conjunto de câmeras, câmeras axiais (incluindo câmeras em meio subaquático).	Caustica “Distorção 3D” que depende da posição do objeto	Modelo de câmera e estrutura da cena

2.4 SISTEMAS DE VISÃO ESTÉREO

Seres humanos possuem a percepção 3D graças à visão da mesma cena por dois pontos de visão diferente (visão estéreo ou estereoscopia). Em visão computacional, o mesmo princípio é utilizado, onde duas câmeras com posição relativa fixa, capturam a imagem do objeto de interesse. A partir da triangulação de pontos correspondentes nas imagens é possível obter pontos 3D do objeto. Sistemas estereoscópicos podem ser passivos ou ativos. Os sistemas ativos utilizam um sistema de iluminação para auxiliar na identificação de pontos correspondentes entre as duas câmeras. Uma configuração típica de um sistema estereoscópico (ou de visão estéreo, do inglês *stereo vision*) ativo é constituída por duas câmeras laterais e um projetor no centro, conforme o equipamento comercial mostrado na figura 9.

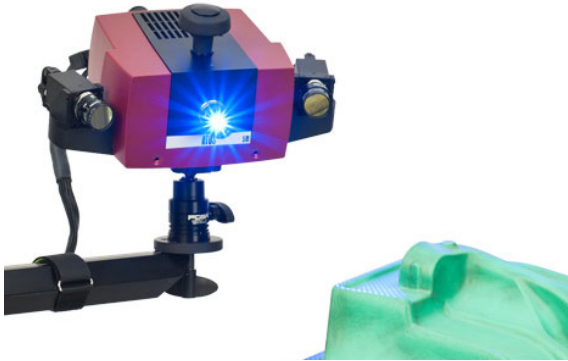


Figura 9 – Sistema estereoscópico comercial formado por duas câmeras e um projetor durante a medição de um objeto (GOM, 2015).

2.4.1 Triangulação direta (Clássica) e geometria epipolar

A procura direta por pontos correspondentes, e conseqüente triangulação para obtenção do ponto 3D, é normalmente realizada pelo método clássico de triangulação, e será aqui denominada de *Triangulação Direta*, *Triangulação Clássica* ou simplesmente triangulação.

Existe uma série de relações geométricas em um sistema estéreo, as quais fazem parte da geometria epipolar (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004). A figura 10 mostra um exemplo de geometria epipolar, onde é formado um plano a partir do ponto 3D do objeto \mathbf{M} e centro da câmera esquerda e direita ($\mathbf{C}_L, \mathbf{C}_R$). Esse plano é denominado de *Plano Epipolar* e sua intersecção com os planos imagem ($\tilde{\pi}_L, \tilde{\pi}_R$) resulta numa linha epipolar. Sendo assim, para um ponto qualquer na imagem esquerda \mathbf{m}_L , seu correspondente, \mathbf{m}_R , está restrito na linha epipolar da câmera direita e vice-versa. Dessa forma, a procura pelo ponto homólogo se restringe à busca ao longo de uma linha. Na figura 11 foram traçadas as linhas epipolares sobre as imagens adquiridas. É possível notar que a correspondência dos pontos respeita a geometria epipolar.

Uma técnica prévia à procura por pontos correspondentes que é comumente utilizada é a retificação das imagens, a qual consiste numa transformação das imagens de maneira que as linhas epipolares fiquem paralelas ao eixo X . Para o caso de um sistema com duas câmeras idênticas dispostas lado a lado e com seus eixos principais paralelos, a retificação simplifica muito a procura por pontos correspondentes devido à estrutura epipolar mais simples e à correspondência muito próxima das

duas imagens (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004). A distância em pixels entre pontos correspondentes é conhecida como disparidade (MUTTO et al., 2012).

Devido a não idealidades, como ruído e distorções, pontos correspondentes podem resultar em linhas que não se cruzam. Existem modelos lineares e não lineares para o cálculo do ponto 3D. Mais detalhes em (PINTO, 2010).

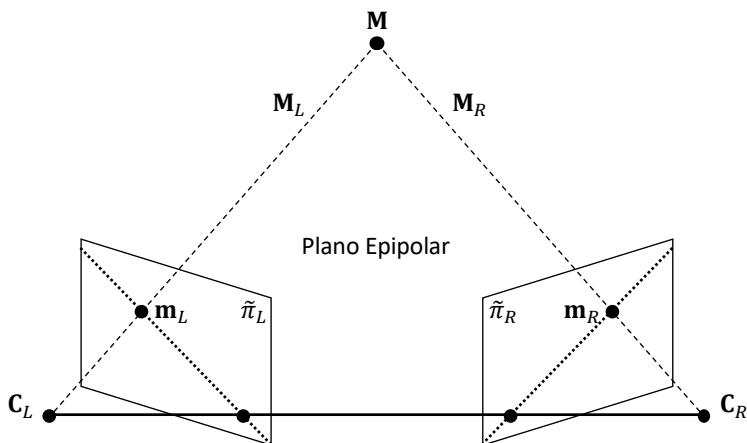


Figura 10 – Plano epipolar em um sistema estéreo. Fonte: adaptado de (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

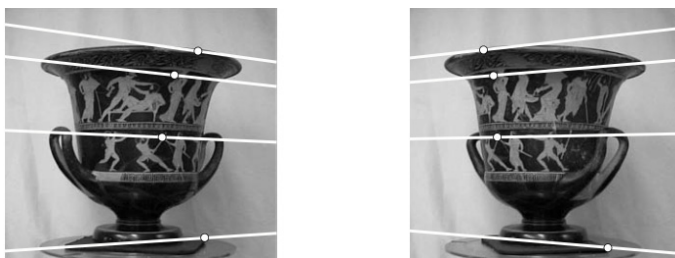


Figura 11 – Exemplo de linhas epipolares. Fonte: (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004).

2.4.2 Triangulação inversa

A triangulação inversa, descrita no mestrado de (HOFMANN, 2006), nos artigos (FANTIN; ALBERTAZZI; PINTO, 2007), (ALBERTAZZI G., JR. et al., 2008), (PINTO; KOHLER;

ALBERTAZZI, 2012) e na tese (PINTO, 2010), faz o processo inverso da triangulação direta⁴, ou seja, posições de pontos 3D a determinar são “testadas” se válidas ou não. O método consiste na procura por pontos 3D válidos contidos em um volume de medição com resolução e dimensão pré-definidos. Por isso, a técnica também é conhecida por “triangulação orientada ao objeto”, ou “algoritmo de medição orientado a malha” (*mesh orientated algorithm*) (FANTIN; ALBERTAZZI; PINTO, 2007). A avaliação dos pontos 3D é feita da seguinte maneira:

1. As coordenadas 3D de um ponto candidato dentro do volume de medição são definidas.
2. O ponto 3D é projetado nos planos das imagens das câmeras, conforme a equação (1).
3. O ponto na imagem tem sua coordenada corrigida conforme o modelo de distorção de lentes, descrito na equação (6). Outra opção é a correção da distorção na imagem antes da etapa 1, evitando que esse cálculo seja repetido para cada ponto projetado.
4. É feita a avaliação de correspondência entre os pontos nas imagens. Se a correspondência for suficiente, o ponto é considerado como válido e suas coordenadas 3D são salvas. Nessa etapa, outros parâmetros também podem ser armazenados, como o valor de correspondência. Mais detalhes sobre técnicas de identificação de pontos correspondentes serão apresentados na seção seguinte (2.5).

A varredura do volume de medição por pontos 3D válidos pode ser realizada fixando duas coordenadas e concentrando a busca na terceira. O processo é repetido até que todo o volume de medição tenha sido percorrido. Como exemplo, utilizando um sistema estéreo com sistema de coordenadas cartesianas, com o eixo *Z* próximo à direção normal do campo de visão do sistema, é coerente definir que para cada “nó” na “malha *XY*” diferentes valores de *Z* sejam testados, conforme ilustra a figura 12.

⁴ Conforme dito anteriormente (em 2.1), deve-se atentar que apesar do nome da técnica ser “triangulação *inversa*”, a projeção é *direta*, uma vez que o ponto 3D é projetado na imagem.

A técnica também pode ser utilizada em outros sistemas de coordenadas, como esféricas e cilíndricas. No mestrado (HOFMANN, 2006) e na tese (HAERTEL, 2015) utiliza-se a triangulação inversa com sistema de coordenadas cilíndricas para a medição de tubos, onde o valor do raio é varrido para cada ângulo e posição no eixo.

Qualquer técnica para detecção de pontos correspondentes (vide 2.5) pode ser utilizada. Por exemplo, em (PINTO; JR, 2013), utiliza-se a correlação temporal e na tese (HAERTEL, 2015) e em (HAERTEL; PINTO; ALBERTAZZI, 2015) correlação espacial. Todavia, nota-se que os pontos projetados devido a uma variação em Z em um mesmo nó formam em cada imagem uma linha de procura. A sensibilidade do sistema no eixo Z é representada pela direção dessa linha (no caso horizontal) e pela relação entre a variação em Z e a correspondente variação em pixels nos pontos projetados nas imagens. Como existe uma direção preferencial de sensibilidade nas imagens, pode-se utilizar uma codificação em uma única direção, como a projeção de franjas (mais detalhes a seguir em 2.5.2) somente na horizontal, conforme demonstrado em (PINTO, 2010).

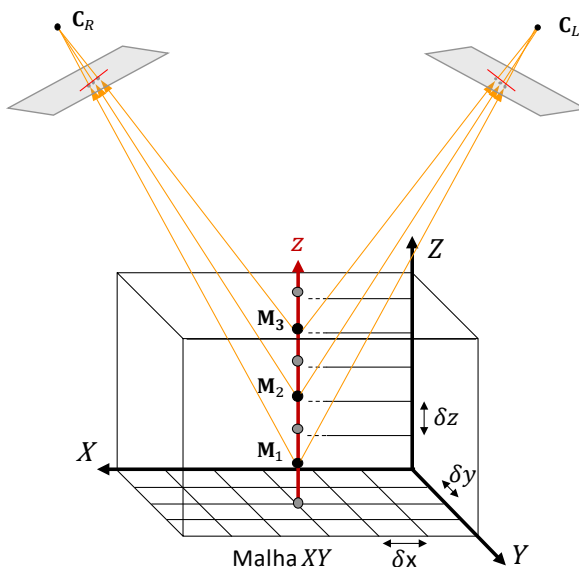


Figura 12 – Triangulação inversa. Três diferentes pontos 3D são testados para um determinado nó na malha XY . O cubo representa o volume de medição definido, com resolução nos eixos X , Y e Z respectivamente de δx , δy e δz .

Um exemplo da codificação obtida (valores de fase) na imagem com a projeção de franjas na horizontal pode ser visto na figura 13. Nota-se que a linha de procura em Z é projetada com um maior componente horizontal da imagem. O mesmo ocorre na imagem da outra câmara do par estéreo. O valor absoluto (módulo) da subtração dos valores de fase obtidos ($|\Delta\phi|$) para cada uma das cotas Z projetadas é exemplificado na figura 14. A cota Z que resulta no mínimo valor absoluto da diferença de fase ($|\Delta\phi|_{min}$) é selecionada.

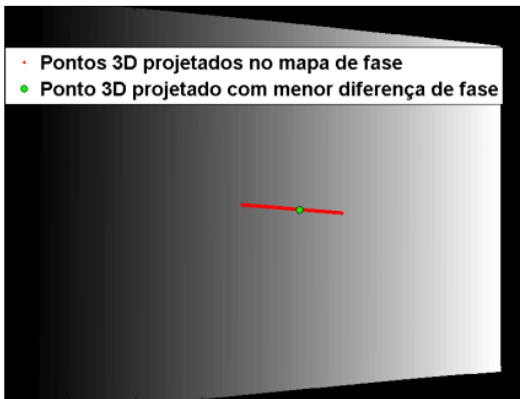


Figura 13 – Exemplo de mapa de fase de uma das câmeras, linha de varredura em Z projetada e ponto de mínimo valor absoluto da diferença de fase obtido (PINTO, 2010).

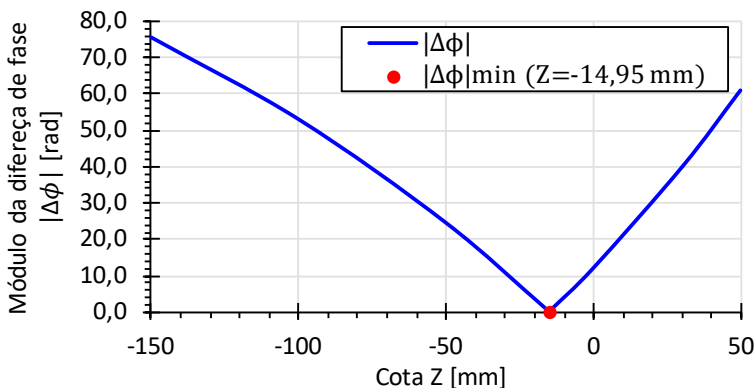


Figura 14 – Módulo da diferença entre os mapas de fase de duas câmeras para uma determinada linha de varredura em Z . Nota-se nitidamente o ponto de mínimo valor absoluto da diferença de fase. Adaptado de (PINTO, 2010).

Teoricamente, a diferença de fase entre dois pontos homólogos seria zero, todavia, um erro residual sempre estará presente. Sendo assim, define-se uma tolerância máxima do valor absoluto da diferença de fase ($|\Delta\phi|_{max}$) em que o ponto 3D é considerado válido (ex.: 0,02 rad). Esse valor depende da resolução em Z utilizada e da configuração do sistema.

Vantagens da triangulação inversa

Com essa técnica, rompe-se com o paradigma de estruturação da medição orientada aos sensores das câmeras para uma estruturação orientada ao objeto de interesse, o que traz uma série de vantagens, sendo a principais listadas a seguir:

- **Medição em regiões predefinidas:** A medição em regiões predefinidas e com o nível de detalhamento desejado pode ser de grande vantagem, por exemplo, no controle dimensional de regiões específicas de uma peça, acelerando o processo de medição e análise do resultado.
- **Concatenação de nuvem de pontos:** Conforme mostrado em (FANTIN et al., 2008) e na tese (PINTO, 2010), a técnica facilita a concatenação de pontos de diferentes medições, uma vez que as coordenadas XY estão todas numa mesma malha, definida pelo sistema de coordenadas global atrelado aos alvos colados na peça. Dessa forma, pode-se reduzir o esforço computacional, sendo necessário somente um ajuste entre as cotas Z das medições.
- **Comparação de nuvem de pontos:** Possibilita uma correspondência direta entre as nuvens de pontos e/ou a comparação e ajuste somente na cota Z .
- **Facilidade na adição de mais câmeras:** A adição de mais câmeras ao algoritmo é relativamente simples. No caso da projeção de franjas, procura-se pelo ponto 3D de menor variância de fase ao invés de menor valor absoluto da diferença de fase.
- **Correlação espacial com *kernel* de procura orientado ao objeto:** O uso da técnica com correlação espacial (detalhes em 2.5) pode trazer benefícios principalmente quando o sistema de coordenadas do objeto possui semelhança e está razoavelmente alinhado com a forma do mensurado. Por exemplo, na tese (HAERTEL, 2015) é realizada a medição

interna de tubos, onde o sistema de medição possui um bom alinhamento com o mensurando e projeta-se nas imagens um kernel de procura definido em coordenadas do objeto.

Limitações da triangulação inversa e possíveis soluções

A principal desvantagem da triangulação inversa é a necessidade de testar muitos pontos 3D até encontrar os que representam o mensurando. Por exemplo, para um volume de medição em coordenadas cartesianas definido por um cubo de 100 mm de lado, com resolução em todos os eixos de 0,1 mm, cada eixo terá mil divisões⁵, a malha XY será de um milhão de pontos, obtendo-se por fim, um total de um bilhão de pontos-candidatos (1.000^3). Em contraste, na triangulação direta, pontos 3D são gerados a partir da triangulação de pontos correspondentes obtidos nas imagens. Sendo assim, o número de operações geralmente é menor. Quando o tempo de processamento se torna um problema, deve-se utilizar técnicas mais inteligentes para reduzir o número total de pontos 3D testados, otimizando a varredura. Os métodos descritos por (FANTIN; ALBERTAZZI; PINTO, 2007) (PINTO, 2010) com esse fim são listados a seguir (exemplos em coordenadas cartesianas e com varredura em Z):

Varredura com incremento de resolução – Refino em Z (*ZScan*)

Primeiramente, define-se o valor máximo e mínimo de varredura e a resolução grosseira inicial. Em sequência, para cada nó da malha XY, deve-se realizar o seguinte procedimento:

1. É realizada a varredura por um ponto 3D válido incrementando o valor de Z entre o mínimo e máximo com a resolução definida. Caso obtido um ponto válido, continua.
2. Mínimo e máximo são redefinidos como o melhor valor obtido \pm a resolução anterior.
3. A resolução é reduzida e o processo é repetido até que se atinja a resolução desejada.

Os valores de resolução e volume dependem da aplicação, em (FANTIN; ALBERTAZZI; PINTO, 2007) a resolução grosseira inicial é

⁵ Na verdade, serão 1.001 valores. Valor arredondado para 1.000 por simplicidade da explicação.

de 10 mm, e é reduzida em dez vezes em três ciclos, até 0,01 mm. Na seção 4.2.4 explica-se o *ZScan* de forma detalhada.

Minimização 1D

É aplicável para técnicas de obtenção de correspondência que geram códigos de identificação na superfície do mensurado, por exemplo, a codificação por valor de fase com a projeção de franjas (detalhes em 2.5.2). Um requisito importante é que tanto a superfície do mensurado quanto a codificação gerada devem ser contínuos. A técnica se baseia no método de minimização de Newton-Raphson (YPMA, 1995), consiste na busca do mínimo da função (melhor correspondência) entre imagens conforme a equação (PINTO, 2010):

$$Z_{i+1} = Z_i - \frac{\Delta}{2} \frac{V(Z_i + \Delta) - V(Z_i - \Delta)}{V(Z_i + \Delta) - 2V(Z_i) + V(Z_i - \Delta)}, \quad (9)$$

sendo Z_i e Z_{i+1} os valores de Z atual e o próximo no processo iterativo. $V(Z)$ é a relação de correspondência entre as imagens (por exemplo, a diferença ou quadrado da diferença dos valores de fase); Δ representa o passo da derivada (por exemplo, 0,05 mm). O processo iterativo se encerra quando $V(Z)$ atinge seu valor mínimo ou um limiar pré-estabelecido.

2.5 IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CORRESPONDENTES

A identificação de pontos correspondentes é um problema clássico na visão computacional. Uma revisão de diversas técnicas de correlação de pares estéreo é feita em (SCHARSTEIN; SZELISKI, 2002). A figura 15 expõe duas fotos obtidas de ângulos diferentes, a cena é constituída de uma câmera antiga e de duas esferas, uma com superfície reflexiva e a outra branca fosca. Apesar de aparentar ser uma cena simples, existem uma série de questões que dificultam a identificação dos pontos correspondentes. A seguir são descritas as principais técnicas para lidar com esses problemas e como se aplicariam para o caso da figura 15.

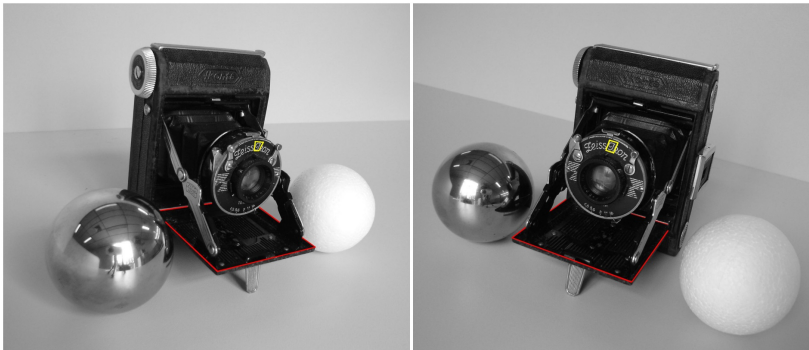


Figura 15 – Cena obtida por dois ângulos de visão diferentes. Câmera antiga e duas esferas, uma com superfície reflexiva e outra branca fosca. Base da câmera marcada por um retângulo vermelho. Letra na parte frontal da câmera marcada por um retângulo amarelo (HOFMANN, 2006).

2.5.1 Identificação sem projeção (passiva)

Para a identificação de pontos correspondentes sem o auxílio externo (ou passiva), como projetores ou lasers, a cena deve conter textura heterogênea, o que possibilita o uso de técnicas como detecção de bordas (HARRIS; STEPHENS, 1988) e a correlação (CHU; RANSON; SUTTON, 1985) (SCHREIER; ORTEU; SUTTON, 2009). Outra opção é a utilização de adesivos com por exemplo alvos circulares, prática muito comum na indústria (LUHMANN, 2010).

A correlação espacial de pontos em duas imagens, geralmente consiste na definição de uma janela de $m \times n$ pixels em uma região de uma das imagens e o cálculo da correlação em diferentes posições da janela na outra imagem. Define-se que os pontos são correspondentes se a correlação possuir um valor maior que um limiar pré-estabelecido (SCHREIER; ORTEU; SUTTON, 2009). Para melhorar a correlação e diminuir a região de procura, geralmente as imagens são retificadas e a região de procura é restringida pela geometria epipolar (HAMZAH; HAMID; SALIM, 2010) (SABATER; ALMANSA; MOREL, 2012). Além da identificação de pontos correspondentes em sistemas de visão estéreo, a correlação também é utilizada em técnicas como *Structure from Motion* (SfM) e *Optical Flow* (ZUCHELLI, 2002).

Dentre as diversas técnicas de correlação, as mais comuns são a soma da diferença absoluta (*Sum of Absolute Difference*) e diferença da soma dos quadrados (SZELISKI, 2011). Essas técnicas são susceptíveis a

variações de intensidade entre imagens, por exemplo, se uma região de uma imagem for mais clara, a correlação será maior naquela região. Por essa razão, normalmente utiliza-se a correlação cruzada normalizada (NCC, *Normalized Cross-Correlation*) (HANNAH, 1974) (SZELISKI, 2011) ou correlação de Pearson (LIRA, 2004). Como a equação consiste da multiplicação dos valores de intensidade das duas regiões em análise, a correlação também é conhecida por correlação cruzada (*cross-correlation*) (SZELISKI, 2011). O coeficiente de correlação NCC⁶ (ρ_{NCC}) é dado por:

$$\rho_{NCC}(u, v, i, j) = \frac{\sigma_{ab}(u, v, i, j)}{\sigma_a(u, v) \sigma_b(u + i, v + j)}, \quad (10)$$

sendo σ_{ab} a covariância; σ_a e σ_b desvios padrão. A máscara varre a segunda imagem variando os valores (i, j) . O valor resultante ρ_{NCC} está contido entre $[-1, 1]$, respectivamente para uma correlação máxima inversa e direta. Quando não existe correlação, o valor é 0. Em (HAERTEL; PINTO; ALBERTAZZI, 2015) utiliza-se um método baseado na NCC em um sistema trinocular.

O site Middlebury⁷ possui uma comparação entre diversas técnicas de correlação para identificação de pontos correspondentes em pares de imagens. No mesmo site está disponível um banco de dados com diversos pares de imagens em alta resolução com o valores verdadeiros de referência, o qual foi obtido em (SCHARSTEIN et al., 2014).

As principais limitações da correlação espacial são (HOFMANN, 2006):

- **Problema da parede branca:** uma superfície de cor monótona, como uma parede branca, torna a correlação espacial inviável, uma vez que todas as regiões da imagem terão um valor de correlação muito próximo.
- **Superfície reflexiva:** a reflexão especular é dependente do ângulo de visão, o que pode tornar o padrão de cores de uma

⁶ Na biblioteca OpenCV pode-se realizar a correção de duas imagens com NCC utilizando a *flag CV_TM_CCORR_NORMED* no método *matchTemplate*.

⁷ <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/2014/> (banco de dados de medições estereó com valor verdadeiro de referência).

região totalmente diferente entre imagens obtidas de posições diferentes.

- **Transformações geométricas:** a linearização da imagem não compensa deformações geométricas devido à própria geometria da cena. Essas deformações podem inviabilizar a correlação, dependendo da geometria da cena.
- **Oclusões:** algumas regiões da cena não são visíveis por ambas as câmeras.
- **Ruído:** o ruído eletrônico no sensor da câmera em cenas com pouca luz, oriundo principalmente do ganho da câmera, pode alterar a assinatura de pontos.

Analisando a figura 15, a detecção de bordas seria suficiente para a identificação de alguns pontos, como as quinas da tampa da câmera, marcada em vermelho⁸. Já utilizando a correlação espacial, regiões homogêneas como o corpo da câmera, que é todo preto e a esfera branca resultaria em muitos pontos incorretos. O mesmo ocorre para a esfera espelhada, uma vez que o reflexo diferente nas imagens inviabiliza a correlação.

2.5.2 Identificação com projeção (ativa)

Muitas das limitações da correlação espacial listadas anteriormente são superadas com técnicas que fazem uso de uma fonte de luz externa (projeção ativa), essas serão descritas a seguir.

Correlação espaçotemporal – Padrões aleatórios

A correlação espacial, descrita na seção anterior, pode ser beneficiada com a projeção de uma sequência de padrões aleatórios, criando uma textura heterogênea artificial, o que elimina o problema da “parede branca”. Além da correlação espacial, a projeção de padrões sequenciais possibilita realizar a correlação temporal e a combinação das duas, denominada de correlação espaçotemporal. Em (SALVI; PAGÈS; BATLLE, 2004) é feita uma revisão dessas técnicas.

⁸ No caso de impressão preto e branco, o retângulo vermelho se refere ao retângulo maior, paralelo a superfície em que a câmera está apoiada.

A correlação cruzada normalizada temporal (TNCC, *Temporal Normalized Cross-Correlation*) para N imagens pode ser obtida a partir da variação no tempo da equação (10). No caso, os vetores a serem correlacionados são formados por pixels numa determinada posição (u, v) em diferentes aquisições (ou tempos t).

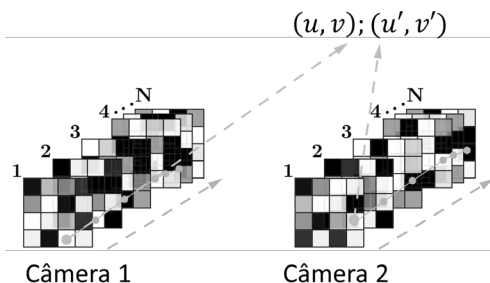


Figura 16 – Janela de 4 x 4 pixels obtida em N tempos diferentes para duas câmeras. Adaptado de (SCHAFFER et al., 2011).

Fontes de luz típicas de padrões aleatórios incluem projetores e lasers (SCHAFFER et al., 2011). O trabalho (SCHAFFER et al., 2014) descreve um sistema que utiliza um projetor comum e um espelho para deslocar lateralmente a imagem, possibilitando gerar diferentes imagens de forma muito rápida. Além dessas fontes típicas de luz, outras fontes de luz podem ser utilizadas. Em (SWIRSKI et al., 2011) é descrita a correlação temporal de um sistema estéreo subaquático com iluminação natural em águas rasas. O método se baseia no efeito cáustico (*caustic effect*) causado pela refração da luz do sol na ondulação da superfície da água, que resulta em um emaranhado de maior intensidade de luz (ver figura 17). Como o efeito se altera dinamicamente (*underwater flickering*) junto com as ondulações da superfície, é possível realizar a correlação temporal ou espaçotemporal.



Figura 17 – Padrão de luz formado devido à interação da luz do sol com a superfície ondulada da água em uma piscina (SWIRSKI et al., 2011).

Projeção de franjas (*phase shifting*)

Consiste na projeção de padrões senoidais de período constante com subsequente deslocamento de fase. O processamento das imagens obtidas possibilita codificar a cena com a fase projetada. Como a projeção possui um sentido, deve-se projetar padrões perpendiculares ou utilizar restrições da geometria epipolar (FANTIN, 1999). Nesse último, a direção de variação da franja deve ser a mais alinhada possível do vetor de sensibilidade do sistema estéreo. A figura 18 mostra um padrão de franjas e seu perfil de luminosidade e fase ao longo do eixo X .

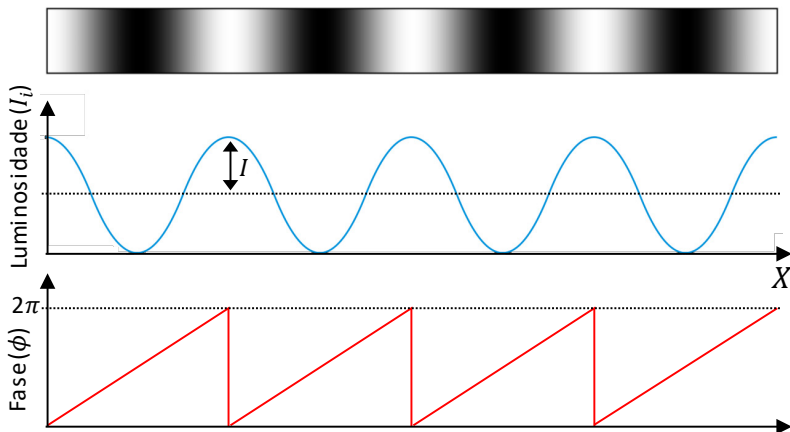


Figura 18 – Perfil luminoso projetado e gráficos da variação da intensidade de luz e fase para uma linha do perfil. Adaptado de (HOFMANN, 2006).

Para melhorar a aparência visual da cena projetada, projetores comerciais aplicam distorções gama na imagem, o que acarreta em distorções nas intensidades das franjas projetadas. Pode-se tentar compensar essas distorções de intensidade na câmera, mas muitas vezes essas correções são insuficientes (NGUYEN et al., 2015). Uma solução simples, porém eficiente, é compensar os erros na própria projeção (HOANG et al., 2010).

A projeção de múltiplas imagens ($N > 2$) visa reduzir a influência dessas não idealidades, assim como a remoção da intensidade de fundo. O padrão de projeção é dado por:

$$I_i(u, v) = I_f + I \text{sen}(\phi(u, v) + \delta\phi_i), \quad (11)$$

sendo $I_i(u, v)$ a intensidade obtida na imagem projetada de número i ; I_f a intensidade média de fundo; I a amplitude de modulação fornecida pelo sistema de iluminação; $\phi(u, v)$ a fase no ponto sobre a senoide projetada e $\delta\phi_i$ a defasagem. Uma vez obtidas as N imagens, pode-se calcular a fase em cada pixel pela equação (ZUO et al., 2012):

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left(\frac{-\sum_{i=1}^N I_i(u, v) \text{sen} \left(\frac{2\pi}{N} i \right)}{\sum_{i=1}^N I_i(u, v) \text{cos} \left(\frac{2\pi}{N} i \right)} \right). \quad (12)$$

Como as fases obtidas são periódicas, existem pontos com a mesma fase, o que gera ambiguidade. Em imagens obtidas da projeção em superfícies sem descontinuidades, é possível utilizar algoritmos de remoção de salto de fase por processamento da imagem, como em (ASUNDI; WENSEN, 1998) e em (DA SILVA MACIEL; ALBERTAZZI, 2014), onde é descrito um método não convencional de remoção do salto de fase utilizando inteligência de enxame. No entanto, geralmente essa condição não é respeitada. Para tal, deve-se projetar padrões que possibilitem realizar a remoção do salto de fase independente da forma da superfície e sem depender de pixels vizinhos. Um método muito utilizado é a codificação binária (conhecida como *gray-code* ou *gray coding*) (SANSONI; CAROCCI; RODELLA, 1999) (GENG, 2011) (PINTO, 2010), onde a projeção de padrões binários possibilita a remoção da ambiguidade. Outros métodos comuns são a projeção de padrões de franja de baixa frequência ou com $N + 1$ franjas (ZUMBRUNN, 1987), (HOFMANN, 2006) e (HAERTEL, 2009).

Apesar de projetores serem o equipamento mais usual para a projeção de franjas, existem exceções. Um sistema para a medição interna da junção de tubulações e seu alinhamento, descrito em (HOFMANN, 2006) (ALBERTAZZI G., JR. et al., 2009), utiliza uma transparência com franjas em hélice disposta em um cilindro de acrílico ao redor de uma lâmpada. A transparência é rotacionada com um motor de passo, possibilitando o deslocamento de fase. Em (HAERTEL, 2009) (HAERTEL et al., 2012), uma montagem similar foi adotada para projetar franjas para a medição do exterior de tubulações, mas no caso as franjas são dispostas paralelas ao eixo de rotação. Essas concepções foram desenvolvidas devido ao espaço restrito impossibilitar o uso de um projetor.

Codificação - Luz estruturada

A projeção de padrões não aleatórios é comumente denominada de projeção de luz estruturada (GENG, 2011). Possibilita criar um código único para cada ponto da imagem, melhorando muito o processo de identificação de pontos correspondentes. A projeção de franjas (ZHANG, 2010) (PINTO, 2010) descrita anteriormente é uma das técnicas mais difundidas de projeção de luz estruturada.

A projeção de luz estruturada pode ter as seguintes aplicações em visão computacional:

1. Detecção de pontos correspondentes em sistemas com duas ou mais câmeras.
2. Triangulação entre projetor e câmera através da calibração do projetor como uma câmera inversa.
3. Obtenção da posição 3D diretamente com apenas uma câmera e o processamento dos padrões projetados. Conhecido como imagem 3D (*3D imaging*) (GENG, 2011).

Um exemplo tanto para o caso 1 quanto o 2 é mostrado na figura 19, onde o projetor é utilizado para a projeção de franjas e *gray-code*. Além disso, foi calibrado como uma câmera inversa, possibilitando a medição em regiões oclusas para uma das câmeras.

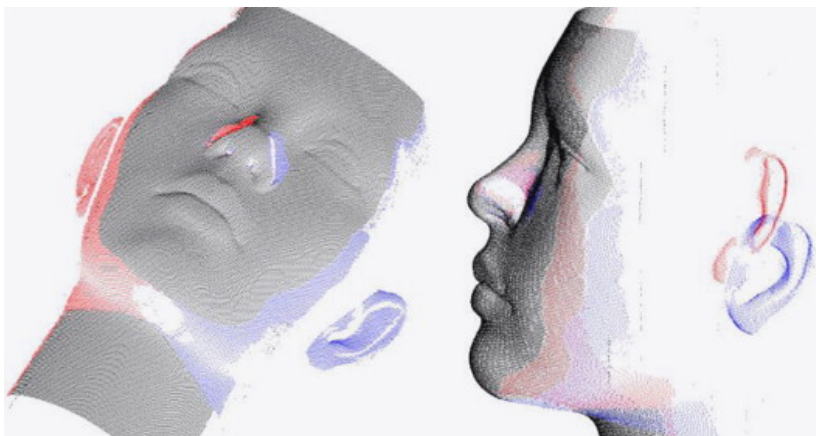


Figura 19 – Resultado de medição do rosto de um manequim. Pontos pretos calculados por triangulação de duas câmeras com projeção de franjas e *gray-code*. Pontos em vermelho e em azul obtidos através da triangulação entre uma câmera e o projetor, abrangem, respectivamente, a região lateral direita e esquerda do nariz e da face (incluindo orelha) (PINTO; KOHLER; ALBERTAZZI, 2012).

No caso 3, a projeção de luz estruturada é utilizada para a codificação direta da profundidade da cena, possibilitando medir a geometria 3D do objeto apenas com uma câmera e projetor. O erro obtido geralmente é menor do que a utilização do projetor como uma câmera inversa (WANG; ZHANG, 2011), (ZUO et al., 2012), (FENG et al., 2014), (EKSTRAND et al., 2013). Os métodos de projeção que

possibilitam a medição com poucas ou apenas uma imagem são ideias para medições dinâmicas, no entanto, geralmente resultam em maiores erros (GENG, 2011). (EKSTRAND et al., 2013) e (WANG; ZHANG, 2011) utilizam a técnica de projeção de franjas desenvolvida em (WANG; ZHANG, 2010) para o cálculo das franjas. Em (EKSTRAND et al., 2013), foi desenvolvido um sistema para medição 3D a partir da projeção de franjas (método de três passos mais dois de baixa frequência) em alta velocidade (60 medições por segundo), possibilitando por exemplo, medir o rosto de uma pessoa enquanto falava. O laboratório do prof. Chao Zuo⁹ desenvolve equipamentos como projetores especiais e técnicas para a medição com projeção de franjas em alta velocidade (ZUO et al., 2012) (ZUO et al., 2013) (FENG et al., 2014).

Compilação de técnicas de projeção de luz estruturada

Além das técnicas de projeção de luz estruturada aqui descritas, existem outras como a projeção de padrões de cores, padrões de tiras, grades codificadas, entre outras; mais detalhes em (GENG, 2011). A figura 20 classifica as principais técnicas de projeção de luz estruturada.

⁹ Chao Zuo - Smart Computational Imaging Lab - <http://www.zuochao.org>.

Projeção sequencial (Múltiplas imagens)

Código binário

Código em tons de cinza (Gray code)

Variação de fase (Phase shift)

Híbrido: Gray code + Phase shift



Padrões de variação contínua (Única imagem)

Câmera arco-íris 3D

Código de cores variado continuamente



Indexação por tira (Única imagem)

Tiras codificadas por cor

Tiras segmentadas

Tiras codificadas por tons de cinza

Sequencia De Bruijn



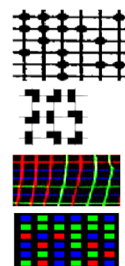
Indexação por grade (Única imagem)

Pontos binários pseudo-aleatório

Mini padrões como palavras codificadas

Grade codificada por cor

Vetor de pontos 2D codificado por cor



Métodos híbridos



Figura 20 - Técnicas de projeção de luz estruturada. Traduzido de (GENG, 2011).

3 MEDIÇÃO ÓPTICA DE FORMAS 3D EM MEIO SUBAQUÁTICO

O capítulo 2 descreveu a medição óptica de formas 3D no ar. Para a captura de imagens subaquáticas, com exceção de câmeras com estrutura própria para trabalhar embaixo da água, é necessário proteger a câmera em um invólucro. Pode-se citar caixas estanques, que servem como uma casca protetora removível; estruturas de equipamentos específicos, como no interior de submergíveis e até mesmo sacolas plásticas especiais. A região em que os feixes de luz passam para a formação da imagem pela câmera será aqui denominada de janela de visão (ou simplesmente, janela). Para o uso industrial, principalmente em grandes profundidades (mais de mil metros), devido à pressão, a espessura da janela de visão pode ter algumas dezenas de milímetros. O formato, espessura e posição da janela tem grande influência na formação da imagem devido à refração que ocorre nas interfaces água/janela e janela/ar. Além disso, a interação da luz com as moléculas da água, e em outras partículas suspensas, resulta na absorção e espalhamento (*scattering*). Esse fenômeno é dependente do comprimento de onda, o que gera efeitos como a cor azul esverdeada no fundo do mar.

No presente capítulo serão descritos os fenômenos que degradam a qualidade da imagem em meio subaquático, assim como técnicas para recuperá-la. Em sequência, os principais tipos de janelas e equipamentos para a medição subaquática são descritos. Por fim, é exposto o estado da arte em modelagem da refração para a calibração de câmeras.

3.1 PROPAGAÇÃO DA LUZ EM MEIO SUBAQUÁTICO

Existem diversos fatores que influenciam a propagação da luz em meio subaquático, sendo os principais: temperatura, salinidade, pressão, turbulência e turbidez. Os primeiros quatro fatores têm maior influência no índice de refração, já a turbidez, é responsável pela degradação do sinal. Esses efeitos são descritos a seguir.

3.1.1 Degradação do sinal

A degradação do sinal de luz se deve a três principais fatores, absorção, retroespalhamento (*backscattering*) e frontoespalhamento

(*forward scattering*). Conforme descrito em (WALDRON; MULLEN, 2009) a atenuação ocorre quando os fótons são absorvidos ao interagirem com diferentes partículas em suspensão na água. Quando não se pode mais obter o sinal devido à perda por absorção, é dito que foi atingido o *limite de fóton*. Fazendo uma analogia, ao aumentar a potência do farol de um automóvel em uma noite com pouca ou nenhuma neblina, é possível enxergar objetos a uma distância maior. Ou seja, o aumento da potência do sinal possibilita obter um maior alcance quando esse tipo de efeito é predominante. O gráfico da figura 21 mostra curvas de absorção da luz para diferentes oceanos, pode-se notar que a menor absorção fica em torno da faixa do azul-verde (450 a 550 nm) (WOZNIAK; DERA, 2007). Não por coincidência, essa é a “cor dos oceanos”.

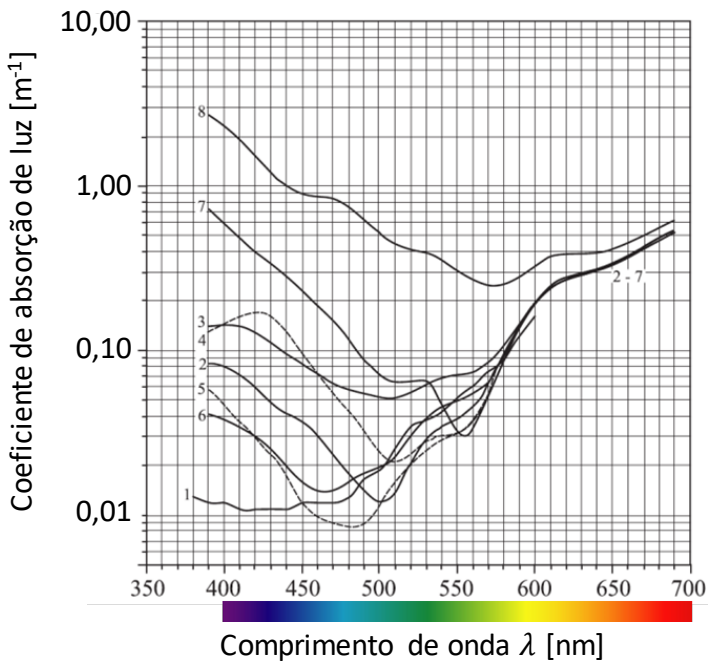


Figura 21 – Absorção da luz em diferentes oceanos e regiões: 1-5) Pacífico em diferentes regiões; 6) Atlântico; 7) Báltico - águas profundas e 8) Báltico - superfície. Adaptado de (WOZNIAK; DERA, 2007).

Outro fator de degradação do sinal na água é o retroespalhamento ou “véu de luz” (*veiling light*). Quanto mais turva a água, maior será a sua

influência. Segundo (SCHECHNER; KARPEL, 2005) o retroespalhamento é o fator de maior influência na degradação da qualidade da imagem, sendo seu principal efeito a perda de contraste. O que ocorre é que os fótons são desviados ao colidirem com algumas partículas suspensas na água, causando primeiramente uma atenuação do sinal. No entanto, o maior problema ocorre quando o ângulo de reflexão é tal que o sinal retorna em direção ao receptor antes de ter atingido o objeto de interesse. Quando o sinal de retorno se torna menor do que o retroespalhamento, é dito que foi atingido o limite de retroespalhamento. Voltando à analogia do automóvel, seria o mesmo do que um local com neblina intensa; ao aumentar a potência do farol, o motorista pode enxergar mais longe, mas chega um ponto em que ele fica ofuscado pela luz que retorna da própria neblina, pois o retroespalhamento é maior do que a luz que volta da estrada. Sendo assim, o aumento da potência do sinal irá, na verdade, piorar a relação sinal/ruído. Esse efeito é menor em comprimentos de ondas maiores, ou seja, próximos ao vermelho. É importante notar que esse é justamente o comprimento de onda de maior atenuação na água, gerando assim uma relação de compromisso entre os dois efeitos de degradação aqui descritos. Novamente conforme à analogia do automóvel, é por isso que os faróis de neblina são “alaranjados”, ou seja, possuem comprimento de onda maior, penetrando melhor na neblina.

Quando o feixe de luz proveniente do objeto é levemente desviado, mas ainda atinge o observador, ocorre um terceiro fator de degradação do sinal denominado de frontoespalhamento (*forward scattering*). O principal efeito resultante é a perda de nitidez (SCHECHNER; KARPEL, 2005).

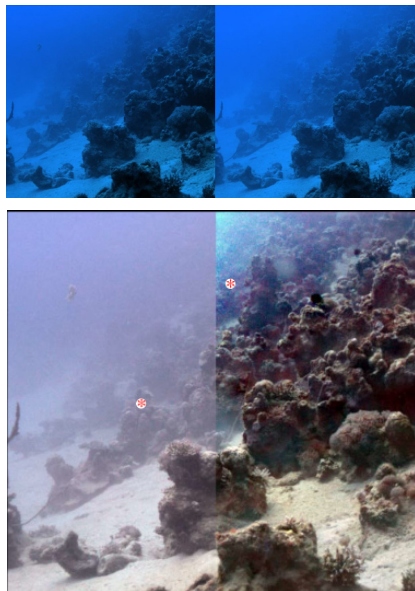
3.1.2 Melhoria do sinal de luz

Existem diversos trabalhos que buscam a melhoria da qualidade de imagens subaquáticas. A possibilidade de “enxergar mais longe”, obtendo imagens mais nítidas, com menor degradação de cores é de grande interesse em muitas áreas, desde o estudo da biologia marinha até a inspeção de estruturas industriais.

O método desenvolvido por (SCHECHNER; KARPEL, 2005) inverte o modelo físico de propagação da luz em meio subaquático com iluminação natural. Ele é baseado no fato de que a luz proveniente da

superfície, quando espalhada (*scattered*) por partículas suspensas na água, sofre polarização. Sua influência é diretamente proporcional à distância ao objeto. O método é específico para iluminação natural e a foto deve ser obtida na horizontal, uma vez que o equacionamento assume iluminação uniforme ao longo do campo de visão (LOS, *line of sight*).

Para possibilitar a recuperação da imagem, são utilizadas duas fotos obtidas através de um polarizador o qual é configurado em posições angulares (rotação) que resultem na obtenção de imagens com a maior e menor transmissão de luz possível. A figura 22 mostra fotos obtidas com as duas polarizações diferentes e o resultado do processamento. É possível notar o grande ganho de qualidade. A estimativa de aumento da distância máxima de visualização é de aproximadamente 1,8 vezes. É possível obter um mapa de distância aproximada baseado na atenuação da luz em cada pixel (SCHECHNER; KARPEL, 2005). No entanto, é necessário conhecer a posição absoluta de pelo menos um ponto da imagem.



Melhor estado de polarização Imagem recuperada

Figura 22 –Imagens originais obtidas com a polarização na posição de máxima e mínima transmissão (parte superior). Imagem da melhor polarização após correção de cores simples (baseada no fato da cor da areia ser branca) e imagem resultante após o processamento (parte inferior). Os pontos são referentes à regiões com o mesmo contraste. Traduzido de (SCHECHNER; KARPEL, 2005).

Ao contrário de (SCHECHNER; KARPEL, 2005), que visa a melhoria de imagens em iluminação natural, (TREIBITZ; SCHECHNER, 2012) descreve um método para melhoria da imagem utilizando iluminação artificial. O efeito do retroespalhamento não é removido, no entanto a imagem resultante é formada pelas regiões de melhor visibilidade de cada imagem. O retroespalhamento é diretamente proporcional à região entre a passagem do feixe de luz e o objeto, conforme ilustra a figura 23.

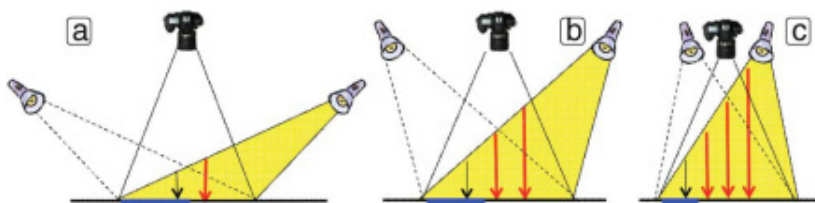


Figura 23 – Variação da intensidade do retroespalhamento (*backscattering*) em relação a posição da fonte de luz (TREIBITZ; SCHECHNER, 2012).

O processamento utiliza a técnica de Pirâmide Laplaciana para a fusão das imagens, o critério de fusão é o melhor contraste (menor retroespalhamento) e a iluminação é balanceada. O resultado de processamento utilizando duas imagens pode ser visto na figura 24. O trabalho sobre calibração de câmeras em meio subaquático (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012) utiliza o modelo desenvolvido por (SCHECHNER; KARPEL, 2005) para melhorar a qualidade das imagens.

Outra técnica de melhoria da visibilidade é capturar somente o sinal de luz proveniente do objeto de interesse. Para tal, um pulso de laser é utilizado para iluminar o objeto de interesse. Como sua distância é conhecida, é possível calcular o instante em que a luz refletida no objeto irá retornar e somente nesse momento o sensor irá iniciar a aquisição. Como resultado, grande parte do retroespalhamento é eliminada. Esse tipo de sistema é denominado de *Range Gated*, ou seja, janela/período de abertura (*gate*) dependente da distância (*range*). O ganho de visibilidade foi de ~40% em (TAN et al., 2007) e de seis vezes em (CHEN; HE; AO, 2007). A desvantagem é a necessidade de conhecer a distância ao objeto, além da necessidade de um sensor com tempo de exposição extremamente curto.

O grupo de Alley (ALLEY; MULLEN; LAUX, 2011) (ALLEY; MULLEN; LAUX, 2012) desenvolveu um sistema em que a fonte de luz fica muito próxima ao objeto de interesse, sendo assim, o retroespalhamento é praticamente nula. Além disso, utiliza-se uma fonte de luz laser modulada onde são transmitidas informações que auxiliam na reconstrução do objeto, como a frequência da varredura e ângulo, permitindo que a fonte de luz e o sensor sejam independentes.

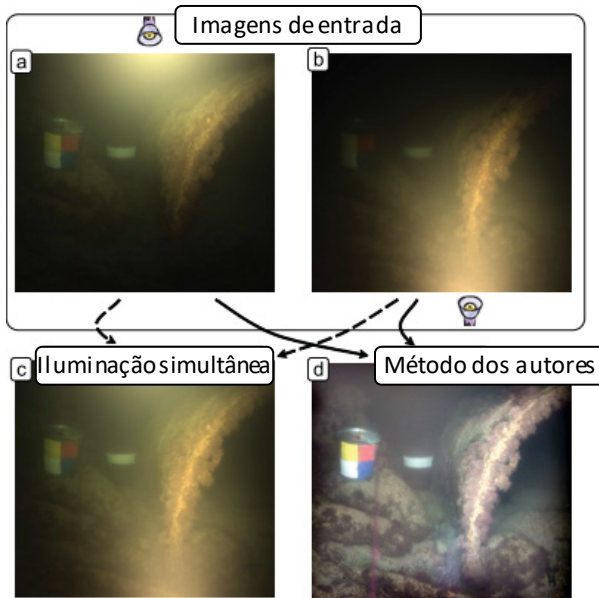


Figura 24 – Resultado de experimento utilizando iluminação multidirecional. a) Iluminação com ângulo “a”. b) Iluminação com ângulo “b”. c) Iluminação simultânea com ângulo “a” e “b”. d) Resultado obtido com a técnica desenvolvida pelos autores, combinando as imagens a) e b). Traduzido de (TREIBITZ; SCHECHNER, 2012).

3.1.3 Refração e lei de Snell

A figura 25 ilustra o caminho óptico de um feixe de luz ao passar por uma interface de refração, formada pelo meio 0 (ar) e 1 (água), com respectivos índices de refração μ_0 e μ_1 . A relação dos ângulos formados entre o caminho óptico e a normal em cada meio (θ_0 e θ_1) é regida pela primeira parte da *Lei da Refração*, também conhecida por Lei de Snell (HECHT, 2001) (dedução no **Apêndice A**):

$$\text{sen}(\theta_0)\mu_0 = \text{sen}(\theta_1)\mu_1. \quad (13)$$

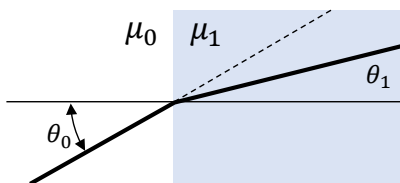


Figura 25 – Refração da luz na transição entre dois meios.

Os principais fatores que influenciam o índice de refração da água são a temperatura, salinidade, comprimento de onda e pressão (BASHKATOV; GENINA, 2003)(MILLARD, R. C. AND SEAVE, 1990)(ABBATE; BERNINI, 1978)(QUAN; FRY, 1995). No trabalho descrito em (QUAN; FRY, 1995) obteve-se empiricamente uma equação para o cálculo do índice de refração em função desses parâmetros. Em relação à pressão, sua influência pode ser aproximada para os primeiros 100 m de profundidade somando $1,37 \times 10^{-6}D$ ao índice de refração, sendo D a profundidade em metros. Dessa forma, a 100 metros de profundidade, a alteração do índice de refração devido à pressão seria de $1,37 \times 10^{-4}$. A tabela 2 lista o índice de refração do ar, acrílico e vidro. Já a tabela 3 expõe a variação do índice de refração referente a variação de temperatura (1, 10, 20 e 30) °C e (0 a 35)% de salinidade, sendo % partes por mil. Nota-se que o índice de refração diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o aumento da salinidade. Os extremos são 1,33497 e 1,34397, respectivamente para uma temperatura e salinidade de (30°C; 0‰) e (1°C; 35‰), e representa uma variação total de 0,009.

Tabela 2 – Índice de refração do ar, vidro e acrílico sob pressão atmosférica (HECHT, 2001) (BASS et al., 1995).

Meio	λ [nm]	Índice de refração (μ)
Ar	589,29	1,000293
Vidro óptico (<i>crown glass</i>)	589	1,52
Vidro sílex (<i>flint glass</i>)	589	1,58
Acrílico	546	1,497

Tabela 3 – Compilação do índice de refração da água para variações extremas de temperatura, salinidade e pressão ($\lambda = 508,5 \text{ nm}$) (QUAN; FRY, 1995).

Salinidade \ Temperatura	1°C	10°C	20°C	30°C	Variação total
Água doce ($S = 0 \text{ ‰}$)	1,33701	1,33674	1,33603	1,33497	-0,0026
Água do mar ($S = 35 \text{ ‰}$)	1,34397	1,34344	1,34253	1,34138	-0,0021
Variação	0,00696	0,00670	0,00650	0,00641	-
Pressão: $1,37 \times 10^{-4}$ ($\sim 0,00014$) a cada 100 m de profundidade					

3.2 TIPOS DE JANELA DE VISÃO (INTERFACE AR/ÁGUA)

As janelas de visão (em inglês conhecidas por *ports*) fazem a separação (interface) entre o meio ar/água. As janelas mais comuns são as planas (*flat port*) e domo (*dome port*), conforme ilustra a figura 26. No meio da fotografia subaquática no Brasil, são comumente conhecidas¹⁰ como “porta plana” e “domo” ou “cúpula”. A figura 27 mostra uma comparação das imagens obtidas por uma janela plana e domo. A distorção na porta plana é maior. Sendo assim, sempre que possível, opta-se pelo uso da janela domo. No entanto, existem casos onde seu uso é proibitivo. Um exemplo no meio cinematográfico é dado em (GUIMARÃES, 2012), onde o uso da janela domo não é adequado para filmagem estéreo subaquática (para o cinema 3D) devido à necessidade de aumentar a distância entre as câmeras (*interaxial* ou *stereo-base*), o que resultaria numa experiência 3D desconfortável. Em aplicações industriais, principalmente em grandes profundidades, onde a espessura da janela deve ser de dezenas de milímetros, a disponibilidade de janelas planas é maior devido a sua simplicidade. A seguir, os principais tipos de janelas são descritos em mais detalhes.

¹⁰ Nomenclatura conforme a Equipe de Suporte do site www.brasilmergulho.com.br.



Figura 26 –Janela plana da Nauticam Austrália modelo “Compact port 15 #18303” (esquerda) e janela domo em acrílico com 171 mm de diâmetro. Modelo “6” Acrylic Dome Port #18801” Nauticam Austrália (direita) (AUSTRALIA, 2009).

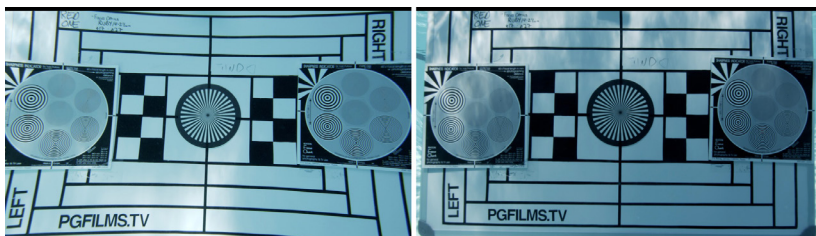


Figura 27 – Exemplo de imagem subaquática obtida por câmera com janela plana (esquerda) e domo (direita) (GUIMARÃES, 2012). Comprimento focal de 14 mm.

3.2.1 Janela plana (flat port)

A interface plana é a mais simples de ser fabricada, sendo que existe grande disponibilidade de placas de vidro ou poliméricas planas de diferentes espessuras. Por esse motivo, esse é um tipo de janela muito comum. Como o índice de refração da água é maior do que o do ar, o ângulo do feixe de luz na água em relação à reta normal à superfície é menor. Sendo assim, o efeito mais perceptível do uso de uma janela plana é a diminuição do ângulo de visão (e conseqüente magnificação da imagem ou zoom aparente), conforme ilustra a figura 28 (esquerda). Já a figura 28 (direita) mostra uma janela domo (*dome port*), onde os feixes principais incidem de forma perpendicular, compensando a perda angular. As janelas domo serão descritas em mais detalhes na seção seguinte.

O ângulo de visão (AOV, *Angle Of View*) máximo teórico na janela plana é menor do que $97,5^\circ$ (obtido para um AOV no ar de $180,0^\circ$ na lente atrás da janela). No entanto, na prática esse ângulo é muito menor e é formada uma imagem virtual em torno de 25% mais próxima. Outro efeito é que componentes da luz branca são separados, podendo gerar aberrações cromáticas consideráveis.

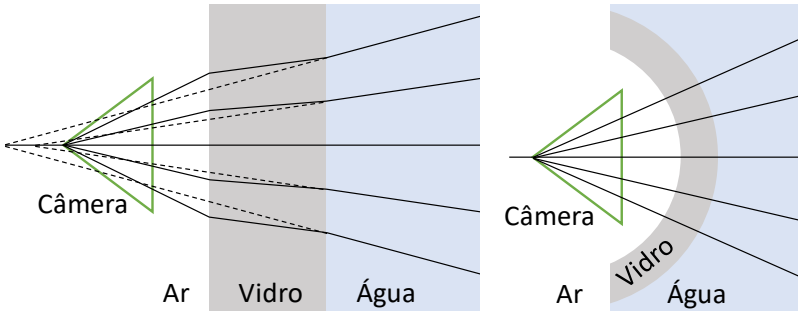


Figura 28 – Refração em uma janela (ou interface) plana (esquerda) e numa janela domo (direita). Adaptado de (SEDLAZECK; KOCH, 2012).

Na figura 29 é exposto o diagrama de raios para a formação de imagem no ar (índice de refração μ_0) e na água (índice de refração μ_1) através de uma janela plana. No ar, o objeto de altura y_w , posicionado a uma distância x_w da lente forma uma imagem com altura y_m a uma distância x_m da lente. Considerando uma janela plana fina a uma distância d_0 da lente, a imagem obtida é mais distante (x'_m) e também maior (y'_m).

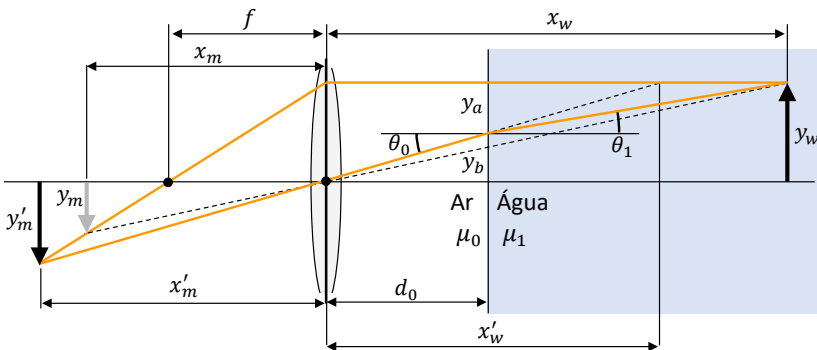


Figura 29 – Formação de imagem através de uma janela plana fina. Adaptado de (KNIGHT, 2012).

Conforme (KNIGHT, 2012), a partir da análise da figura 29 pode-se chegar a equação de magnificação devido à refração. Primeiramente, tem-se que a magnificação transversa de lentes finas é dada por (HECHT, 2001):

$$\Delta_{lens} = \frac{f}{x_w - f} \text{ e } \Delta'_{lens} = \frac{f}{x'_w - f}.$$

A magnificação devido à refração é dada pela relação das duas magnificações:

$$\Delta_{mf} = \frac{\Delta'_{lens}}{\Delta_{lens}} = \frac{x_w - f}{x'_w - f}$$

$$\text{Como } \tan(\theta_0) = \frac{y_w}{x'_w} \therefore x'_w = \frac{y_w}{\tan(\theta_0)}.$$

A altura do objeto é $y_w = y_a + y_b$. Como: $y_a = (x_w - d_0) \tan(\theta_1)$ e $y_b = d_0 \tan(\theta_0)$, chega-se a:

$$x'_w = \frac{[(x_w - d_0) \tan(\theta_1) + d_0 \tan(\theta_0)]}{\tan(\theta_0)}$$

$$\therefore x'_w = (x_w - d_0) \frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_0)} + d_0.$$

Substituindo u' , chega-se na equação final da magnificação devido à refração (14):

$$\Delta_{mf} = \frac{x_w - f}{(x_w - d_0) \frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_0)} + d_0 - f}. \quad (14)$$

Pode-se notar na equação (14) que a magnificação depende do ângulo, isso implica que o sistema terá distorção radial. Para ângulos de abertura (θ) pequeno, é possível considerar que $\tan(\theta) \sim \text{sen}(\theta)$, assim, conforme a lei de Snell, a equação (14) pode ser simplificada para (15):

$$\Delta_{mf} = \frac{x_w - f}{(x_w - d_0) \frac{\mu_0}{\mu_1} + d_0 - f}. \quad (15)$$

Como geralmente o centro de projeção está perto da janela (d_0 pequeno) e a distância da lente ao objeto é bem maior do que o comprimento focal ($x_w \gg f$), a equação pode novamente ser simplificada:

$$\Delta_{mf} = \frac{\mu_1}{\mu_0}. \quad (16)$$

A equação (16) simplificada mostra que uma estimativa inicial da magnificação pode ser calculada pela simples relação entre o índice de refração do ar e da água. O valor obtido é de aproximadamente 1,3333 (ou seja, 33,33% de aumento) considerando os índices no ar e água respectivamente de 1 e 4/3.

3.2.2 *Janela domo (dome port)*

As janelas domo reduzem os efeitos da refração na mudança de meio. Suas principais vantagens são a menor distorção e possibilidade da utilização de lentes grandes angulares, uma vez que o caminho óptico dos feixes principais incidem perpendicularmente à superfície, conforme ilustra a figura 28 (direita). Para seu correto funcionamento, o centro do domo deve ser o mais coincidente possível com o centro de projeção.

Nesse tipo de janela a interface ar/vidro funciona como uma fraca lente positiva e a interface vidro/água como uma forte lente negativa (NEWTON; BALDWIN; FRYER, 1989). Sendo assim, apesar da melhoria no ângulo de visão, a combinação dessas lentes gera uma imagem virtual curvada e mais próxima da câmera do que o objeto. Quanto maior o diâmetro da janela, mais longe e menos curvada será a imagem virtual. Devido a essa curvatura, as regiões mais afastadas do centro da imagem podem ficar fora de foco. Como nem todos os feixes de luz irão incidir de forma perpendicular à superfície, aberrações cromáticas ainda podem ocorrer. Uma forma de reduzir esse efeito é aumentar o raio do domo e reduzir a abertura da íris. As figuras 26 e 30 mostram exemplos comerciais de janelas domo.



Figura 30 – Janela domo e caixa estanque Nexus para lentes Nikon 14-24 e câmera D700. (“New Nexus Glass Dome Ports|Underwater Photography Guide”, 2010).

A figura 31 mostra o diagrama de raios da refração em uma janela domo fina (espessura do vidro desprezível). A câmera foi posicionada de forma que seu centro de projeção fique coincidente com o centro da janela domo, de raio r . Com exceção dos feixes que incidem de forma normal ao domo, todos os outros são refratados por um ângulo φ_w . Sendo assim, raios vindos do infinito aparentam vir do ponto F (foco secundário). Para focar a imagem virtual formada em F , a câmera deve focar a uma distância mínima de $d + f$.

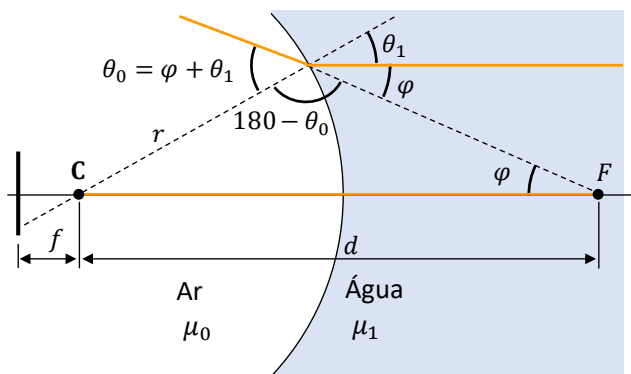


Figura 31 – Diagrama de raios da refração em uma janela domo fina. O centro de projeção está coincidente com o centro do domo, de raio r . Adaptado de (KNIGHT, 2012).

Utilizando a lei dos senos: $d/\text{sen}(180 - \theta_0) = r/\text{sen}(\varphi)$, como $\text{sen}(180 - \theta_0) = \text{sen}(\theta_0)$ e para ângulos pequenos, $\text{sen}(\theta) \sim \theta$, $d = r \theta_0/\varphi$. Como $\varphi_w = \theta_0 - \theta_1$, então $d = r \theta_0/(\theta_0 - \theta_1)$ ou:

$$d = \frac{r}{\left(1 - \frac{\theta_1}{\theta_0}\right)}. \quad (17)$$

Analisando a refração, segundo a lei de Snell, para pequenos ângulos tem-se que: $\theta_1/\theta_0 = \mu_0/\mu_1$. Substituindo em (17), chega-se a:

$$d = \frac{r}{1 - \frac{\mu_0}{\mu_1}}. \quad (18)$$

Considerando o caso em que o índice de refração do ar e da água são respectivamente de 1 e 4/3, obtém-se que $d = 4r$. Sendo assim, utilizando uma janela domo fina, um objeto no infinito irá formar uma imagem virtual à uma distância do centro de curvatura de quatro vezes o raio da janela. Muitas vezes, a espessura da janela domo precisa ser considerada. Neste caso, a relação é um pouco mais complexa, como descrito em (KNIGHT, 2012).

3.2.3 *Janela totalmente corretiva (fully corrective port)*

A janela totalmente corretiva (JTC) tem como objetivo corrigir por completo o efeito da refração na água. A janela remove a distorção e aberrações cromáticas; mantém o ângulo de visão e uma imagem virtual plana. Como resultado, a água se torna “invisível”. O caminho óptico pode ser visto na figura 32.

Segundo (NEWTON; BALDWIN; FRYER, 1989), uma excelente JTC foi desenvolvida por Ivanoff. Essa janela é descrita numa patente de 1952 (IVANOFF; LE GRAND; CUVIER, 1952) e um esquemático pode ser visto na figura 33. Segundo (NEWTON; BALDWIN; FRYER, 1989) a tolerância de posicionamento da janela em relação à lente é de vários milímetros; em contrapartida, (TREIBITZ et al., 2012) afirma que esse tipo de janela, incluindo as domo, é de difícil alinhamento.

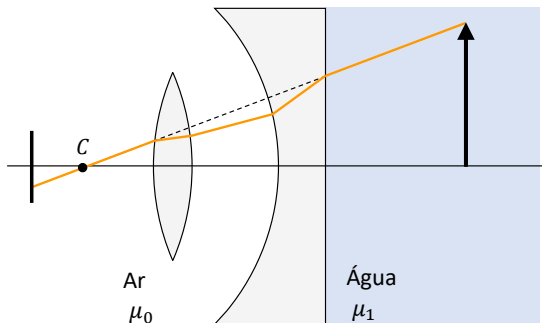


Figura 32 – Janela totalmente corretiva. Adaptado de (NEWTON; BALDWIN; FRYER, 1989).

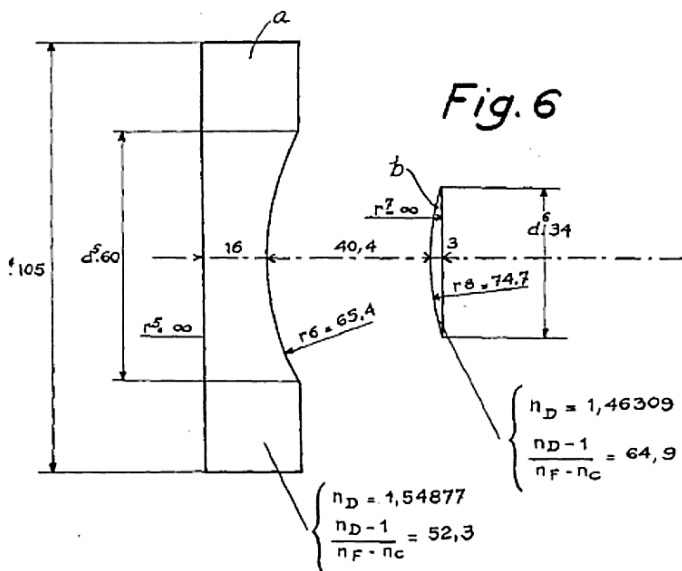


Figura 33 – Desenho técnico da janela totalmente corretiva desenvolvida por Ivanoff em 1952 (IVANOFF; LE GRAND; CUVIER, 1952). Sendo η o índice de refração, padronizado na presente tese como μ .

Um exemplo de JTC comercial é a lente Unterwasservorsatz II (figura 34), fabricada nos anos 60 pela Carl Zeiss Alemã especificamente para a lente da linha Biogon (lentes grande-angulares) com comprimento focal de 38 mm utilizada por uma câmera da Hasselblad. O autor da presente tese desconhece referências recentes de artigos e modelos

comerciais de JTCs. A própria Carl Zeiss não fabrica mais janelas e lentes para uso específico subaquático. No entanto, essas lentes são fabricadas sob encomenda por alguns fabricantes. Pode-se supor que as razões para as JTCs não serem comuns e pouco comercializadas sejam:

- Dificuldade de fabricação (consequente alto custo);
- Alta especificidade;
- O mercado de fotogrametria subaquática é pequeno;
- As lentes e janelas atuais já fornecem uma correção aceitável para fotografia e filmagem.



Figura 34 – janela totalmente corretiva “Unterwasservorsatz II” da Carl Zeiss (EBAY, 2013).

O mesmo princípio de correção aplicado para lentes pode ser utilizado para o desenvolvimento de máscaras de mergulho. A patente publicada em 2003 de número US 6612693 B2 intitulada “*Panoramic reverse Galilean telescope optics for an underwater diving mask*” (KRANHOUSE; ROGERS, 2003) documenta justamente uma máscara de mergulho que compensa os efeitos da refração, tornando a água “invisível”. A patente cita a janela correctiva de Ivanoff. A empresa HydroOptix é a fabricante exclusiva dessas máscara e conforme descrito em seu website (“HydroOptix”, [s.d.]), devido ao alto custo de produção, o modelo totalmente corretivo (MAX™ Optics) deverá inicialmente ser comercializado apenas para mergulhadores comerciais e militares. A figura 35 (esquerda) mostra um dos desenhos contidos na patente, ilustrando a máscara e sua óptica corretiva; à direita uma foto do protótipo da máscara. Apesar da máscara totalmente corretiva não ser comercializada, uma versão mais simplificada, que somente aumenta o ângulo de visão, foi comercializada (MEGA 4.5 DD). Essa é uma máscara

com duas janelas domo, sendo necessário (para a maioria das pessoas) o uso de uma lente de contato para possibilitar focar a imagem virtual, que se encontra muito próxima aos olhos. Atualmente, a empresa aparenta estar com dificuldades em encontrar um fabricante adequado para suas lentes e a compra da versão simplificada também está indisponível.

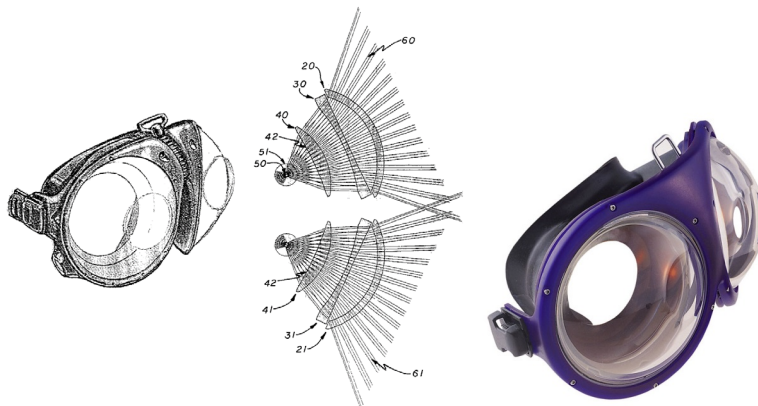


Figura 35 – Desenho da máscara e caminho óptico exposto na patente US 6612693 B2 (esquerda). Protótipo de máscara de mergulho MAX™ Optics da HydroOptix (direita) (KRANHOUSE; ROGERS, 2003), (“HydroOptix”, [s.d.]).

3.2.4 Lentes para uso subaquático (lentes “molhadas”)

As lentes molhadas (*wet lenses*) são fabricadas para uso direto na água, podendo até mesmo ser montada/desmontada dentro da água. Geralmente não é possível obter foco quando essa lente é utilizada fora da água. Também estão sujeitas às distorções provenientes da refração.

3.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM MEIO SUBAQUÁTICO (ÓPTICOS E ACÚSTICOS)

Existe uma variedade de sistemas comerciais e trabalhos de pesquisa de sistemas ópticos e acústicos para a medição subaquática. Alguns trabalhos recentes visam realizar a união dessas técnicas, resultando em sistemas denominados opto-acústicos. O mapa taxonômico da figura 36 ilustra os diferentes princípios de medição utilizados. As principais tecnologias para esse tipo de inspeção são descritas a seguir, assim como exemplos de sistemas comerciais.

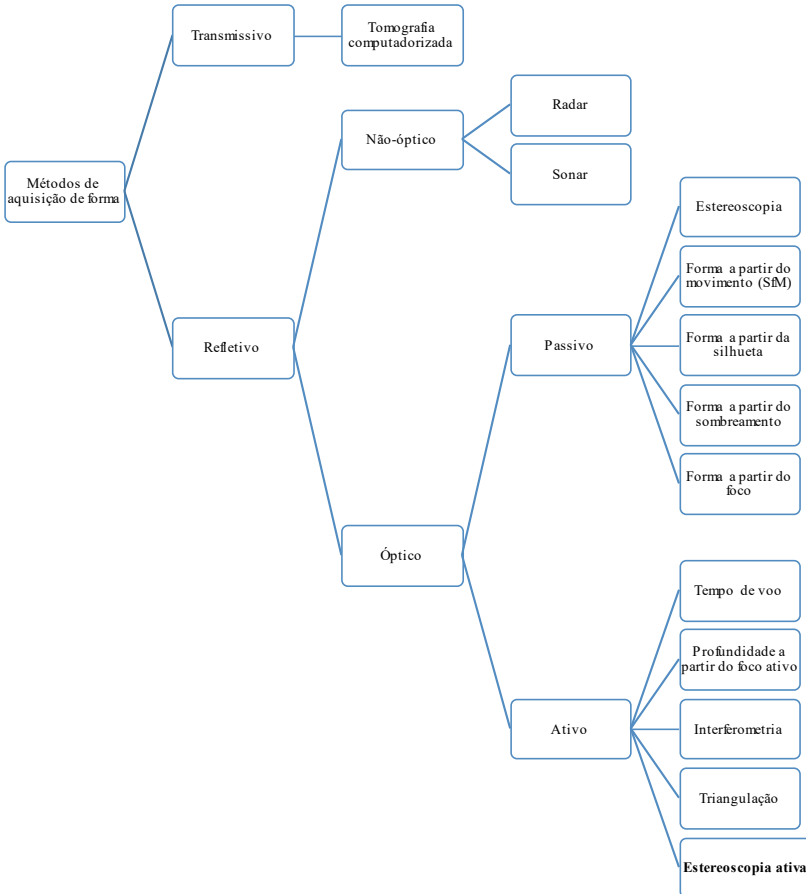


Figura 36 – Taxonomia de métodos de medição de formas. Adaptado de (LEONE; DIRACO; DISTANTE, 2008).

3.3.1 Triangulação laser

Um dos sistemas mais difundidos para medição 3D subaquática são os que utilizam o princípio da triangulação a laser com folha de luz. Apresentam menor incerteza e são utilizados para curtas distâncias (até aproximadamente 10 m) principalmente devido à degradação do sinal da luz.

O trabalho (MIRALLÈS et al., 2010) descreve o desenvolvimento de um sistema de triangulação a laser (STL) para a inspeção de grandes estruturas de hidroelétricas embaixo da água. O trabalho está inserido no

contexto de um projeto que teve início em 2006 e conta com uma grande equipe. O sistema projeta duas folhas de luz e utiliza como referência entre medições dois ou mais cabos que são dispostos paralelos à superfície e colineares com a direção da inspeção (ver figura 37). As câmeras são calibradas utilizando o modelo *pinhole*. Nos experimentos descritos, a incerteza da reconstrução foi da ordem de 0,1 mm. A velocidade de inspeção é de 2,5 mm/s, sendo que uma secção é capturada a cada 0,125 mm.

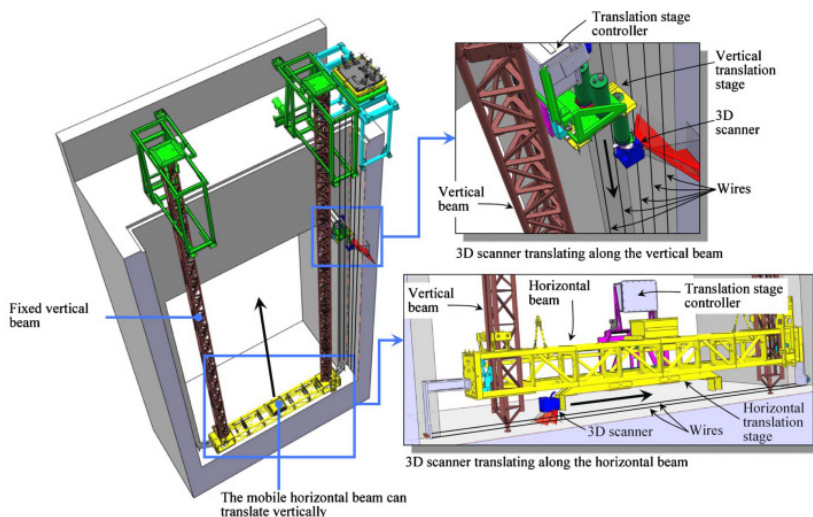


Figura 37 – Esquemático do módulo de transporte e cabos de referenciamento do STL para inspeção de hidroelétricas (MIRALLÈS et al., 2010).

Um sistema que utiliza a triangulação por folha de luz com dois lasers de 532 nm com ângulo de abertura de 60° (no ar) para medir a distância a objetos é descrito em (CAIN; LEONESSA, 2012). É um protótipo de baixo custo e tem o objetivo de auxiliar a navegação de ROVs (*Remotely Operated underwater Vehicle*), medindo a distância e evitando a colisão em pequenos objetos. A incerteza de medição é elevada, da ordem de 10-20% da distância medida.

Recentemente, (EMBRY et al., 2012) (RICHARDSON et al., 2013) desenvolveram um STL por ponto de luz para inspeção subaquática que pode ser utilizado em até 3 km de profundidade. O sistema varre uma região de $\pm 15^\circ$ (azimute e elevação). A faixa de operação varia de 2 a

20 m, com resolução de 0,36 a 3,6 mm (0,018% da distância). A figura 38 ilustra o sistema durante uma medição e a nuvem de pontos resultante.

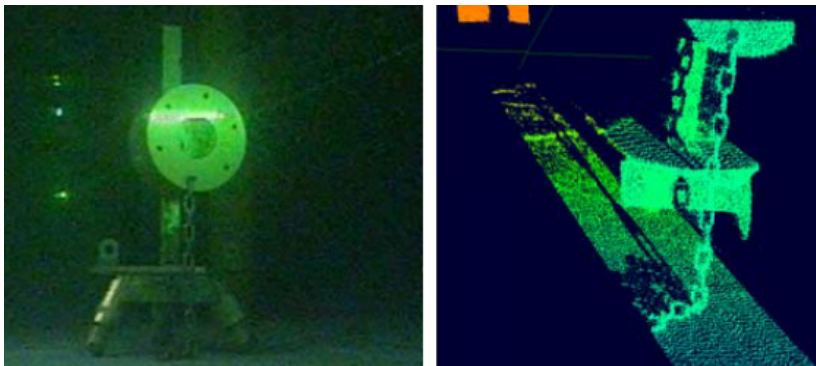


Figura 38 – Foto (esquerda) de flange de 254 mm (10”) e resultado de medição (direita) (EMBRY et al., 2012).

O ROV Lumeneye (figura 39) desenvolvido pela empresa Savante (“Savante”, 2015) possui um STL acoplado. Segundo o site da empresa, o equipamento pode ser utilizado até 6 km de profundidade. O erro é de menos de 1 mm para uma faixa de medição de 5 m, ou seja $< 0,02\%$ da distância. No entanto, nenhum relatório de avaliação é fornecido.

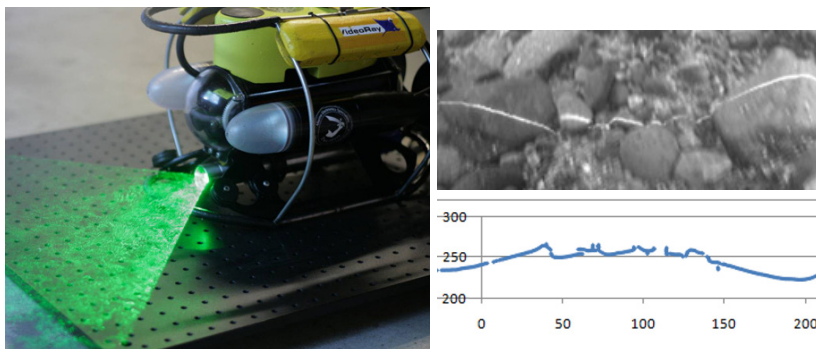


Figura 39 – Lumeneye da Savante (esquerda). Imagem subaquática da linha de laser sobre pedras (direita superior) e o respectivo resultado de medição (direita inferior) (“Savante”, 2015).

A empresa 2G Robotics (“2G Robotics”, 2015) é especializada em sistemas a laser de inspeção subaquática. Possuem três sensores (ULS-100, ULS-200, ULS-500) que juntos cobrem uma faixa de medição de 0,1-10 m (ver figura 40). Nenhuma informação sobre o nível de incerteza do sistema na medição de distância é fornecida. Resultados de medição podem ser vistos na figura 41.



Figura 40 – Fotos dos três sistemas de medição a laser da 2G Robotics (“2G Robotics”, 2015).

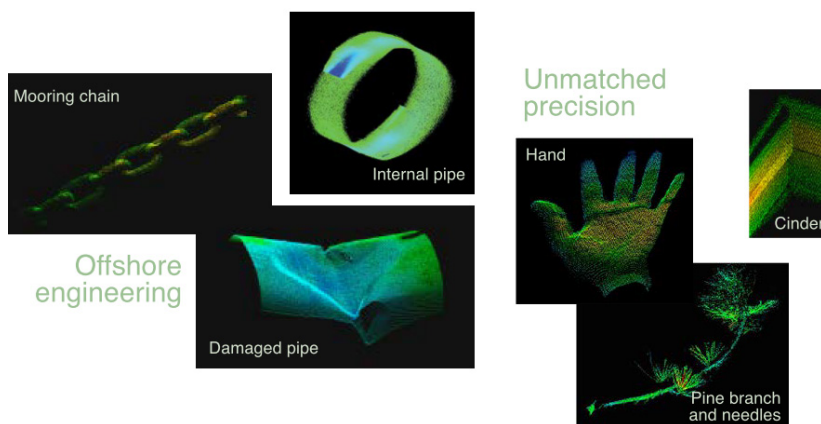


Figura 41 – Exemplos de resultados de medições realizadas com o sistema ULS-100 da 2G Robotics (“2G Robotics”, 2015).

3.3.2 LiDAR - Light Detection and Ranging

LiDAR (*Light Detection And Ranging* ou *Laser Imaging, Detection and Ranging*) é uma técnica que mede a distância a partir da

análise da luz refletida sobre o mensurando. Um tipo específico de LiDAR são sistemas de tempo de voo (ToF *time of flight*) que utilizam o mesmo princípio básico de radares e sonares, onde a distância é calculada a partir do tempo que leva para a luz atingir o objeto, ser refletida e capturada pelo sensor. Apesar de recentes avanços na tecnologia ToF, as medições ainda são limitadas, e apresentam bastante ruído. A sua principal vantagem é que a medição é feita em tempo real. O único sistema de medição subaquático por ToF de conhecimento do autor do presente estudo é o Investigator da Scopos (SCOPOS, 2013). Na figura 42 pode-se ver uma foto do sistema e de um resultado típico de medição. A empresa não fornece detalhes sobre a faixa de medição e incertezas. Outro tipo de LiDAR é baseado na diferença de fase entre o sinal enviado e o recebido. Segundo (TAN et al., 2007), a luz perde coerência na água, podendo limitar o uso desse tipo de sistema em meio subaquático. Existem empresas que comercializam sensores LiDAR para uso no ar, como exemplo, o sistema Leica ScanStation P20 (LEICA, 2013), que possui uma incerteza de ± 3 mm a 50 m e ± 6 mm a 100 m (0,006% da distância).

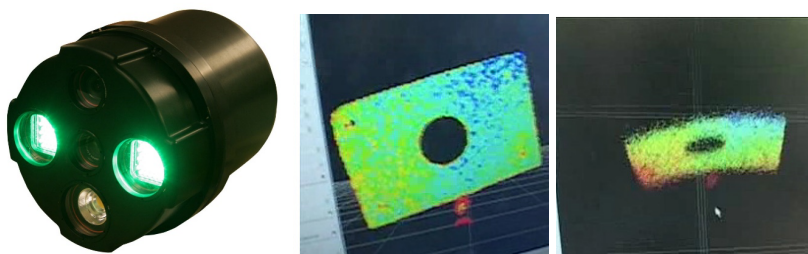


Figura 42 – Sistema de medição ToF Investigator da Scopos (esquerda). Vista frontal (centro) e lateral (direita) do resultado de medição em tempo real de uma chapa com furo a aproximadamente 2 m de distância. Nota-se o grande ruído na medição (SCOPOS, 2013).

No artigo de revisão (JAFFE et al., 2001), são descritos alguns sistemas LiDAR. O primeiro deles é o STIL (*Streak Tube Imaging Lidar*) desenvolvido pela empresa Areté Associates (ARETE, [s.d.]). O STIL emite um pulso de laser e analisa a reflexão no mensurando utilizando um tubo de raios (*streak tube*). Por fim uma imagem representando a intensidade de luz retornada no tempo é gerada, conforme pode ser visto na figura 43. Pode-se notar na imagem, de cima para baixo: o retrospalhamento, o fundo do oceano e o objeto de interesse. O sistema

é capaz de medir distâncias de 6 metros com incertezas de ordem de 20 mm (0,33% da distância máxima de trabalho). Outro sistema descrito em (JAFTE et al., 2001) é o *Laser Line Scan*, onde um ponto de laser é projetado por um espelho rotativo e um conjunto de sensores detecta o sinal de luz refletido.

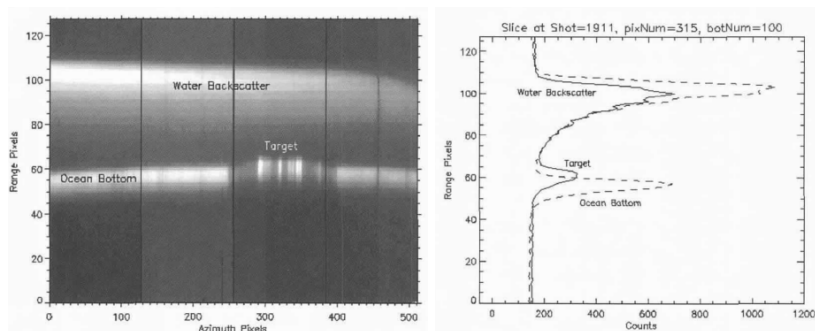


Figura 43 – Imagem (esquerda) e gráfico (direita) resultante do sistema STIL (JAFTE et al., 2001).

Em (WALDRON; MULLEN, 2009) é descrito um sistema híbrido LiDAR-RADAR, onde a amplitude do laser é modulada com um sinal de alta frequência (60 - 70 MHz). Foram utilizados lasers com diferentes comprimentos de onda. A máxima distância de funcionamento (sem ambiguidade na fase) foi de 1,71 m em águas claras. O erro é da ordem de 30 mm. Em águas turvas, a partir de 150 mm de distância, o erro aumenta consideravelmente.

3.3.3 Fotogrametria

No trabalho descrito em (DRAP et al., 2015) realizou-se o mapeamento de um sítio arqueológico referente ao naufrágio do navio Romano *Cap B' enat 4*. Utilizou-se um ROV para a aquisição das imagens a uma frequência de 10 Hz (Figura 44). O artigo limita-se a dizer que a capacidade de medição do sistema é da ordem de milímetros. O resultado de medição pode ser visto na figura 45.



Figura 44 – ROV durante aquisição de fotos para a medição de objetos em sítio arqueológico.



Figura 45 – Modelo 3D obtido a partir de fotos de vasos de sítio arqueológico a 328 m de profundidade após duas horas de aquisição (DRAP et al., 2015).

3.3.4 Structure from Motion (SfM)

A equipe de robótica ViCOROB¹¹ da universidade de Girona, Espanha, trabalha no desenvolvimento de um veículo autônomo submersível (AUV, *Autonomous Underwater Vehicles*) para realizar a

¹¹ Site da equipe ViCOROB: <http://vicorob.udg.edu>.

medição do fundo do oceano denominado de AREM (*Autonomous Robot for Environmental Monitoring*) (CAMPOS, [s.d.]). No último trabalho publicado pela equipe de Nicosevici (NICOSEVICI et al., 2009) o princípio de medição utilizado foi o SfM (*Structure from Motion*) com apenas uma câmera portátil. Os mapas 2D e 3D resultantes de uma medição com esse primeiro sistema podem ser vistos na figura 46. Outra versão do sistema é dotada de três câmeras (trinocular) e é descrito em (CAMPOS et al., 2009). Nesse caso a reconstrução 3D é realizada através de uma variação do método de propagação de correspondência (*Match Propagation*), este método propaga a correspondência de “sementes” iniciais em um par de imagens estéreo. Para recuperar a posição do sistema de câmeras na sequência de imagens realizadas durante seu percurso utiliza-se um algoritmo de rastreamento estéreo (*stereo tracking*) com adição do método *Sparse Bundle Adjustment*. A função de custo desse último método minimiza o erro de reprojeção dos pontos rastreados. O resultado de medição de pedras (com dimensões em torno de 50 mm) pode ser visto na figura 47.

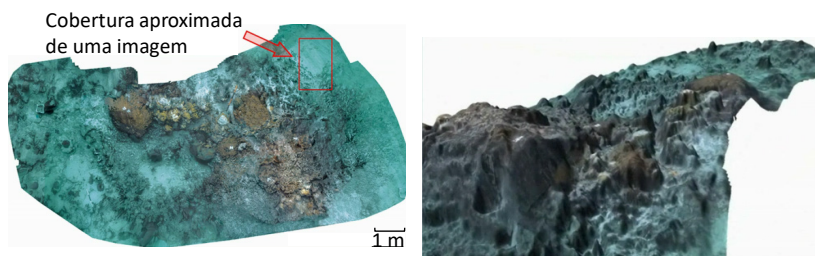


Figura 46 – Mapa 2D com a cobertura aproximada de uma imagem destacada no retângulo vermelho (esquerda) e reconstrução 3D (direita) (NICOSEVICI et al., 2009).



Figura 47 – Resultado de medição de cascalhos embaixo da água obtidos com o sistema AREM trinocular em diversas posições diferentes (CAMPOS et al., 2009).

3.3.5 *Estereoscopia ativa e passiva*

A equipe de Swirski (SWIRSKI et al., 2011) (SWIRSKI; SCHECHNER, 2012)¹² desenvolveu uma maneira alternativa de detecção de pontos correspondentes a partir da correlação temporal de um efeito natural que ocorre em águas rasas. O método, denominado pelos autores de *CauStereo*, realiza correlação temporal da variação da intensidade de luz devido ao efeito cáustico causado pela interação da luz com a ondulação da superfície da água, conforme ilustra a figura 48. Esse é um sistema estereoscópico ativo, mas a fonte de projeção é natural. Foram realizados experimentos numa piscina e no oceano, os parâmetros (número de imagens; profundidade em metros; distância em metros) foram respectivamente de: (35; 1; 1) e (66; 3-5; 5). O método depende de iluminação natural e a cena deve estar estática durante a aquisição. Para superar essas limitações, conforme descrito no artigo, pode-se utilizar correlação espaçotemporal e fontes de luz artificiais. Nos artigos não é feita a calibração das câmeras, sendo obtido apenas mapas de disparidade.

¹² Outros artigos do mesmo autor sobre o tema podem ser visto em: (SWIRSKI et al., 2009) e (SWIRSKI et al., 2010).

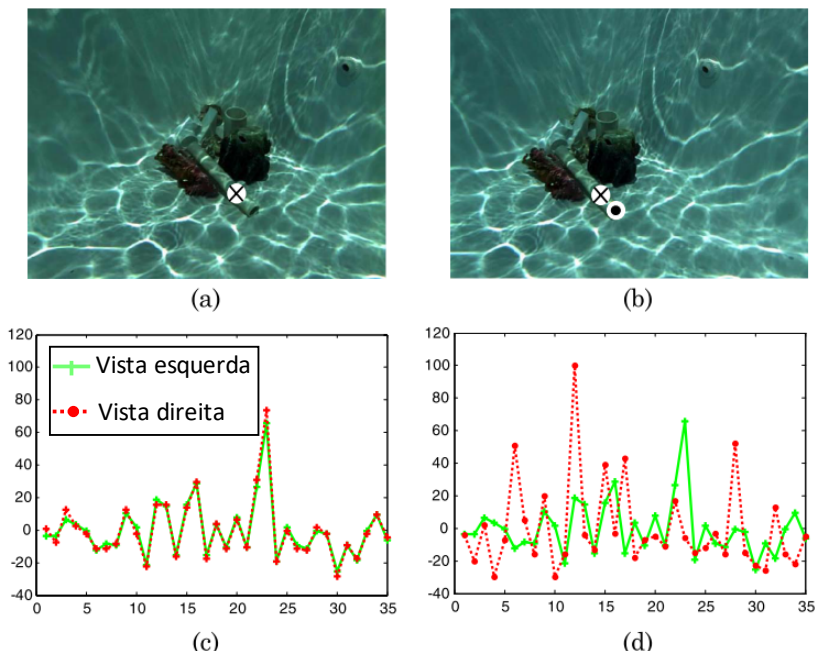


Figura 48 – Gráfico da variação da intensidade de luz menos a média total ao longo de 35 imagens para dois pontos correspondentes nas imagens (a) e (b) marcados com “ \otimes ” e não correspondentes, marcado com “ \odot ” na imagem (b) (SWIRSKI et al., 2011).

Em um trabalho recente da mesma equipe (SWIRSKI; SCHECHNER, 2013) propõe-se o uso do mapa de disparidade obtido com a correlação temporal para ser utilizado como base na estimativa do deslocamento da câmera. O objetivo é eliminar o erro causado pela rápida variação da iluminação devido ao efeito cáustico, que torna difícil a correlação de imagens utilizando o método SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) (LOWE, 2004), impossibilitando o método SfM (atualmente existe um método mais rápido, denominado SURF (BAY; TUYTELAARS; VAN GOOL, 2006), já disponível em OpenCV). A calibração foi realizada utilizando o modelo SVP (sem considerar a refração), o erro devido a isso foi considerado desprezível. Note que (SWIRSKI; SCHECHNER, 2013) foi escrito pela mesma equipe que desenvolveu o modelo físico de calibração da refração (TREIBITZ et al., 2012).

O trabalho (BIANCO et al., 2013) calibra as câmeras utilizando o modelo SVP, sendo que a interface é com janela domo. O erro de medição é da ordem de décimos de milímetros para águas claras, chegando a quase 3 mm quando a turbidez é elevada. A técnica ativa resultou em medições mais estáveis em relação à turbidez, mas o espalhamento da luz do projetor causa erros que resultam num maior número de pontos espúrios. A densidade de pontos obtida com a técnica passiva foi maior em superfícies não monótonas.

Em (LEONE; DIRACO; DISTANTE, 2008) é descrito um sistema estereoscópico para a concatenação (mosaico) de medições 3D, o foco é a medição do fundo do mar. É proposta uma maneira de lidar com aquisições estéreo assíncronas.

Sistemas estéreo também podem ser utilizados para auxiliar na navegação, onde erros maiores são tolerados. O trabalho (NEGAHDARIPOUR; FIROOZFAM, 2006) mostra o desenvolvimento de um sistema estéreo para auxiliar na navegação de um ROV e na criação de um mosaico de imagens para a inspeção de cascos de navio. Em um experimento controlado numa piscina, o erro de posicionamento foi em torno de 2% para uma distância de 22,86 m.

Outros sistemas de visão estéreo para uso em maio subaquático e suas diferentes formas de calibração são apresentados e discutidos na seção 3.4.

3.3.6 Sonar

Sonares, ou sistemas de ultrassom, são comumente utilizados em embarcações para auxílio na navegação, medindo a profundidade e relevo do fundo do mar, podendo até detectar peixes. Sonares são comumente relacionados com medições grosseiras (incertezas da ordem de muitas dezenas ou centenas de milímetros) e muitas vezes de difícil interpretação por pessoas não habituadas. No entanto, alguns sistemas de ultrassom modernos podem realizar medições detalhadas com incerteza de dezenas de milímetro ou menos. Alguns sistemas de ultrassom recentemente desenvolvidos surgiram com o nome de “câmeras acústicas” (VILARNAU, 2009). Um dos mais famosos comercialmente é o sistema DIDSON (*Dual-Frequency identification Sonar*) descrito em (BELCHER; HANOT; BURCH, 2002) e comercializado pela Sound Metrics (METRIC, [s.d.]) (foto da versão para 300 m na figura 49).

DIDSON utiliza lentes acústicas e é capaz de realizar medições com resolução na ordem de dezenas de milímetros. Segundo o site do fabricante (METRIC, [s.d.]) futuramente esses dados terão informação de profundidade, resultando em dados 3D. Um resultado de medição desse sistema pode ser visto na figura 51 (a).

O trabalho (YU et al., 2006) propõe uma modelagem da câmera acústica e um sistema de reconhecimento de objetos. A figura 52 mostra dois cilindros de diferentes materiais e suas respectivas imagens acústicas resultantes.

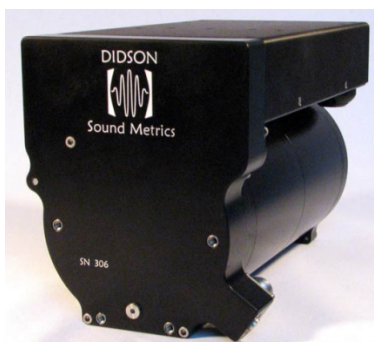


Figura 49 – DIDSON 300 m (METRIC, [s.d.]).

Especificações do DIDSON (modo de identificação) (METRIC, [s.d.]):

- Fabricante: Sound Metrics Corp.
- Frequência de operação: 1,8 MHz
- Máximo Frame Rate (depende da distância): 4-21 imagens/segundo
- Abertura angular de feixe (*two-way*): $0,3^\circ$ H por 14° V
- Número de feixes: 96
- Espaçamento de feixe: $0,3^\circ$
- Início da janela (estendida): 0,42 m a 26,1 m a passos de 0,42 m
- Comprimento da janela (estendida): 1,25 m; 2,5 m; 5 m; 10 m
- Tamanho do feixe (relativo ao comprimento da janela): 2,5 mm; 5 mm; 10 mm; 20 mm

- Comprimento de pulso (relativo ao comprimento da janela):
4,5 μ s; 9 μ s; 18 μ s; 36 μ s

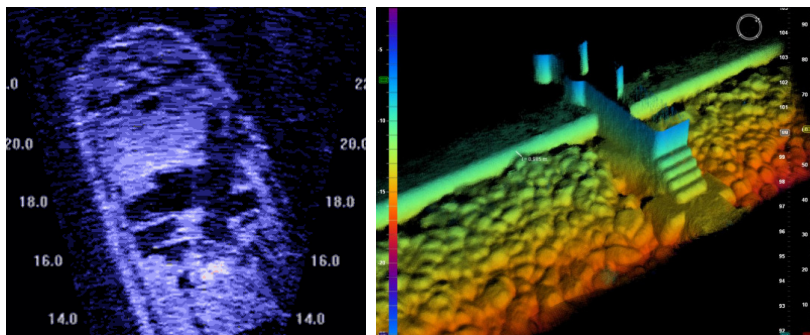
Outro sistema de câmara acústica muito conhecido e um dos mais modernos disponíveis no mercado para inspeção ultrassom é o Echoscope (figura 50) comercializado pela empresa Coda Octopus (CODAOCOTOPUS, 2013). Seu grande diferencial é a capacidade de fornecer resultados em 3D, conforme pode ser visto na figura 51 (b).



Figura 50 – Echoscope (CODAOCOTOPUS, 2013).

Especificações do Echoscope (CODAOCOTOPUS, 2013):

- Fabricante: Coda Octopus
- Frequência: 375 kHz
- Número de feixes: 128x128 (16.384)
- Alcance máximo: 120 m
- Alcance mínimo: 1 m
- Resolução: 30 mm
- Taxa de *ping* (frequência entre envio de sinais de eco): até 12 Hz
- Cobertura angular: 50° x 50°
- Espaçamento de feixe: 0,39°



a) Deck de um barco.

b) Porto na Holanda.

Figura 51– Imagens de medições com os sistemas DIDSON US300 e Echoscope (CODA/OCTOPUS, 2013).



Cilindro de concreto

Diam. 150 mm × altura: 306 mm



Cilindro de metal

Diam. 127 mm × altura: 341 mm

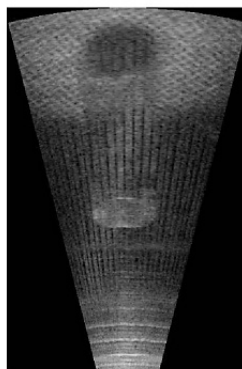
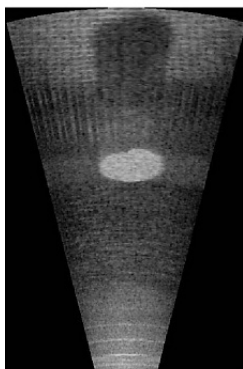


Figura 52 – Fotos (superior) de um cilindro de concreto (esquerda) e de aço (direita) com suas respectivas imagens acústicas (inferior) obtidas com o sistema DIDSON. Traduzido de (YU et al., 2006).

O sonar da série BV5000 fabricado pela BlueView (“TELEDYNE BlueView”, [s.d.]) também é capaz de realizar medições em 3D. O

software possibilita a união de dados do sonar com dados de sistemas de triangulação laser. Uma foto do sistema e resultados de medição podem ser vistos respectivamente nas figuras 53 e 54.



Figura 53 – Sonar 3D BV5000 da BlueView (“TELEDYNE BlueView”, [s.d.]).

BlueView (BV5000-2250) (“TELEDYNE BlueView”, [s.d.]):

- Área de varredura setorial/esférica (°): 45 - 360
- Campo de visão do Sonar (°): 45 x 1
- Taxa de atualização (Hz): até 40
- Frequência (MHz): 2,25
- Alcance máximo: 10 m
- Alcance ideal: 0,5 – 7 m
- Número de feixes: 256
- Largura do feixe (°): 1x1
- Espaçamento entre feixes (°): 0,18
- Resolução: 10 mm
- Tempo de varredura de 360°: 6 minutos

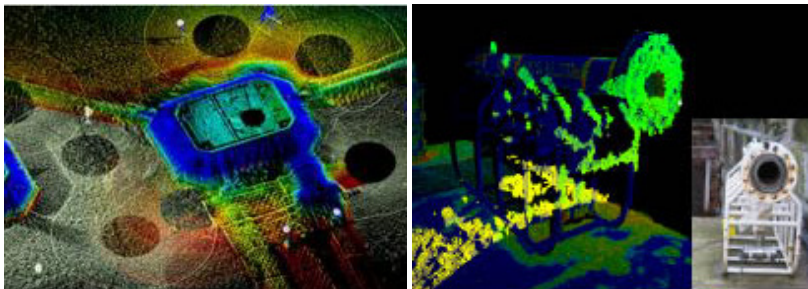


Figura 54 – Resultados de medições utilizando o BV5000: conjunto de várias medições (esquerda), note que as regiões circulares sem dado são onde o sistema foi posicionado. Medição de flange (direita) (“TELEDYNE BlueView”, [s.d.]).

3.3.7 *Sistemas híbridos (sonar + óptico)*

A união de sonares com sistemas de inspeção ópticos ou simples câmeras podem trazer vantagens como a aquisição da textura do objeto medido, melhoria na incerteza de medição e informações do material e sua refletividade acústica. O trabalho de mestrado (VILARNAU, 2009) descreve um primeiro modelo teórico do sistema híbrido que faz a união acústica (sonar de múltiplos feixes) mais imagem e uma calibração simulada em Matlab é realizada. Mais recentemente (HURTOS; CUFI; SALVI, 2010) faz também uma calibração prática. O modelo é baseado na calibração de uma câmera e conjunto com o sistema de triangulação laser. A figura 55 mostra o esquemático do sistema câmera + sonar acoplados em um AUV.

O trabalho (NEGAHDARIPOUR, 2007) descreve a geometria epipolar de um sistema opto-acústico. Diferente de (VILARNAU, 2009)(HURTOS; CUFI; SALVI, 2010), uma câmera acústica é utilizada no lugar do sonar de múltiplos feixes. Nenhum dos trabalhos expõe uma avaliação da performance do sistema, como o erro obtido na medição.

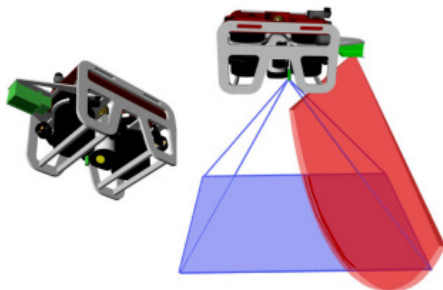


Figura 55 – Esquemático do sistema câmera + sonar em um AUV (HURTOS; CUFÍ; SALVI, 2010).

3.4 CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS PARA USO SUBAQUÁTICO

A calibração da câmera em meio subaquático visa compensar o efeito da refração que ocorre devido às mudanças de meio ar/vidro/água. Conforme será descrito na seção a seguir, quando utilizada uma janela plana, o principal efeito é que a câmera deixa de se comportar como SVP ou “câmera central” e sim como uma “câmera axial” (AGRAWAL et al., 2012). Sendo assim, o uso do modelo SVP “sozinho” pode resultar em erros significativos. Anne Jordt-Sedlazeck faz uma revisão sobre modelagens de refração na calibração de câmeras e dos erros envolvidos em (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012). Com base no mesmo trabalho, pode-se dizer que existem basicamente três opções para a calibração de câmeras através de interfaces de refração: 1) modelo de câmera genérico, onde a trajetória de cada pixel é mapeada (GROSSBERG; NAYAR, 2005); 2) modelo genérico de câmera axial (RAMALINGAM; STURM; LODHA, 2006) e 3) modelo menos genérico de câmera axial, onde as interfaces de refração são parametrizadas (AGRAWAL et al., 2012). No caso de janelas domos, dependendo da configuração do sistema, é possível corrigir o efeito da refração considerando seu efeito como uma distorção radial (BIANCO et al., 2013).

A seguir, primeiramente são dados conceitos básicos de modelagem da refração através de interfaces planas de refração, em sequência os principais métodos de calibração são expostos.

3.4.1 Modelo para uma interface plana de refração

A geometria plana de refração estuda o caso específico em que a separação da interface é feita por uma ou mais interfaces planas. O grupo de Treibitz (TREIBITZ et al., 2012) descreve um modelo físico de refração para o caso da interface ar/vidro/água (janela plana). O eixo óptico da câmera é considerado normal à interface.

A imagem à esquerda da figura 56 mostra que a distorção causada pela refração na água depende tanto do ângulo de saída da lente como da distância do objeto. Já a imagem à direita mostra um simples experimento utilizando um aquário que ilustra esse efeito. Nas fotos pode-se notar que o desenho de um tubarão e a cerca somente ficam visíveis quando o aquário é preenchido com água. No entanto, quando isso ocorre, as regiões próximas a esses objetos (parte interna), ficam oclusas. Essas imagens deixam claro que uma correção de distorção na imagem não é capaz de recuperar a cena que seria obtida no ar, pois a informação completa não está disponível, além da dependência da distância. Conforme (TREIBITZ et al., 2012), a refração causa uma distorção dependente da distância ao objeto, ou seja, não é apenas uma distorção 2D e sim 3D. Sendo assim, a câmera não pode mais ser modelada como SVP.

A figura 57 mostra que a visualização através de uma superfície plana gera diferentes perspectivas para cada ângulo de visão. A região onde todos os feixes são tangentes é denominada de superfície cáustica. Se o sistema é SVP, a superfície cáustica é um ponto, diferente do resultado de simulação mostrado na figura 58.

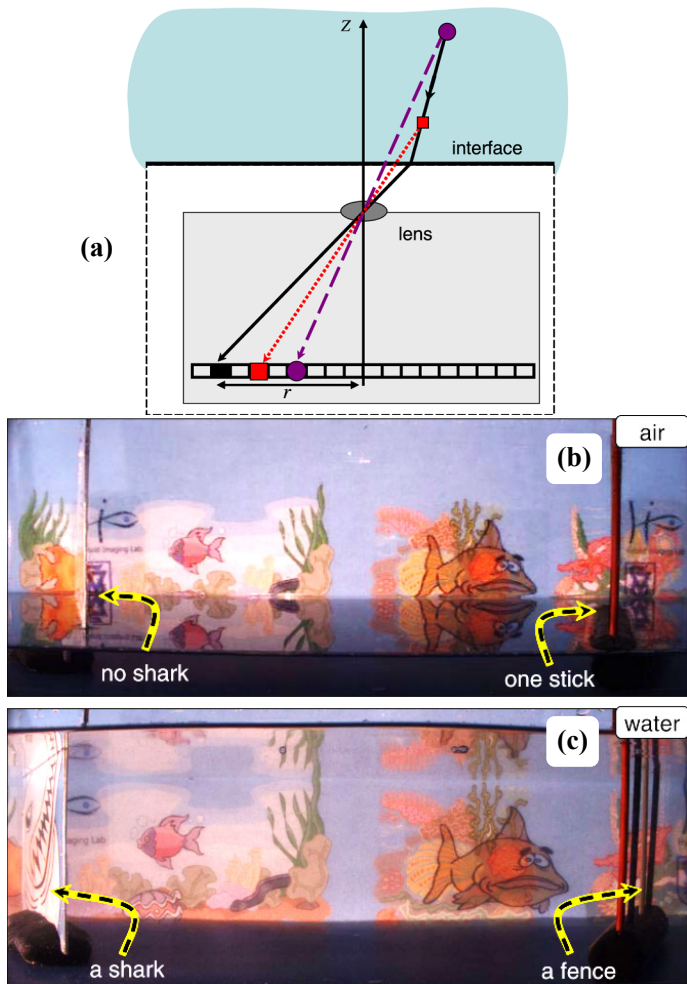


Figura 56 – a) Quando submerso, os dois objetos (círculo e quadrado) são projetado na mesma posição, já no ar (projeção sem distorção) os objetos são projetados em posições diferentes. b) Foto obtida através de um aquário vazio e c) preenchido com água. Pode-se notar nas regiões indicadas pelas setas que objetos oclusos no ar aparecem quando o aquário é preenchido e vice-versa (TREIBITZ et al., 2012).

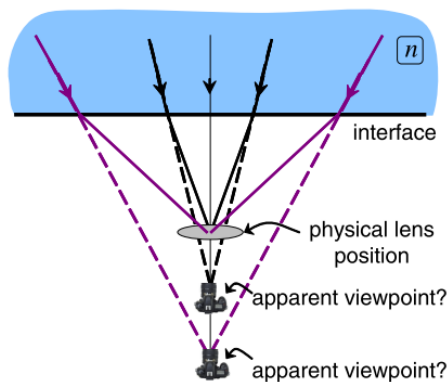


Figura 57 – Visualizar através de uma interface plana resulta num sistema não central de projeção (nSVP) (TREIBITZ et al., 2012).

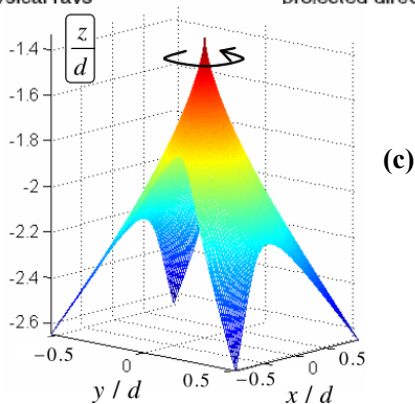
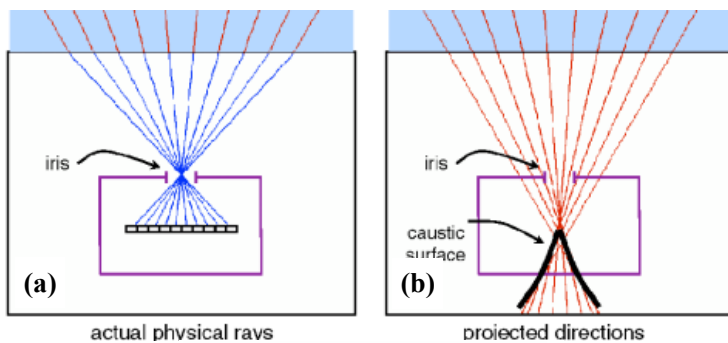


Figura 58 – Formação da superfície cáustica. Caminho óptico real (a); Caminho óptico aparente (b). Gráfico 3D de uma superfície cáustica (c) (TREIBITZ et al., 2012).

A calibração proposta por (TREIBITZ et al., 2012) é baseada no modelo físico do caminho óptico ao passar por uma superfície plana de refração normal ao eixo óptico da câmera (Z no SCC). Para realizar a calibração (figura 59 a), é necessário obter pelo menos duas dimensões conhecidas a uma distância (interface - objeto) também conhecida ou uma dimensão em duas distâncias conhecidas. Sendo assim, é possível calibrar o sistema com uma única imagem de um tabuleiro de xadrez (figura 59 b) a uma distância conhecida, uma vez que a dimensão das grades é conhecida. De posse desses dados a distância da pupila de entrada à superfície de refração e o comprimento focal aparente são obtidos e a calibração está completa. Dessa forma, ao obter a imagem de um objeto (figura 59 c), é possível calcular sua dimensão real. A calibração necessita de um sistema de medição auxiliar para obter a distância da interface ao mensurando. Nos experimentos realizados por (TREIBITZ et al., 2012), foi utilizada uma fita métrica, o que pode ser uma fonte de incerteza considerável. Ao invés da fita métrica, poderia ter sido utilizado um sistema de triangulação a laser, por exemplo. No experimento realizado por (TREIBITZ et al., 2012), é realizada a medição do comprimento de alguns objetos, variando de 115 a 280 mm. Os valores em milímetros do erro médio e o do desvio padrão obtidos com a modelagem de refração e considerando SVP foram respectivamente de (-0,9; 5,9) e (-21,2; 10,8).

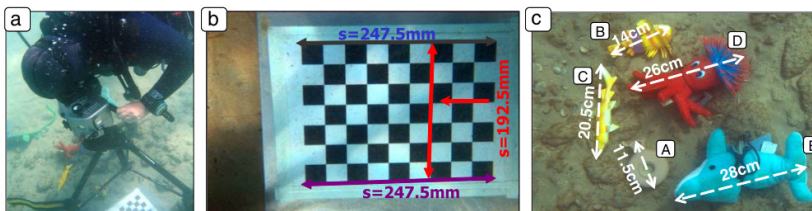


Figura 59 – a) Calibração do sistema. b) Tabuleiro e dimensões conhecidas utilizadas. c) Objetos medidos com o sistema para validação da calibração (TREIBITZ et al., 2012).

3.4.2 Modelo para múltiplas interfaces planas de refração

Um modelo físico de calibração mais completo é descrito no trabalho do grupo de Agrawal (AGRAWAL et al., 2012), onde é mostrado que o sistema formado por uma câmera e camadas planas de

refração é axial. O modelo desenvolvido¹³ é mais genérico do que o descrito em (TREIBITZ et al., 2012), pois: a) não assume que as interfaces são normais ao eixo óptico da câmera, b) considera múltiplas interfaces com distâncias desconhecidas; c) considera índices de refração conhecidos e desconhecidos; d) não assume conhecer a posição do objeto de calibração e assume que os parâmetros intrínsecos (modelo *pinhole*) da câmera foram previamente determinados por calibração no ar. Os autores mostram que é possível aproximar sistemas com múltiplas camadas para sistemas mais simples com menos camadas. A calibração pode ser realizada utilizando um padrão plano, ex.: padrão tipo tabuleiro de xadrez (*checkerboard*).

A figura 60 ilustra os conceitos fundamentais definidos por (AGRAWAL et al., 2012) assim como a nomenclatura dos parâmetro de refração, a qual também foi adotada na presente tese. Na imagem, um ponto qualquer \mathbf{M} é projetado através de $n - 1$ interfaces plano-paralelas de refração, ou seja, n meios. A câmera tem seu eixo Z (no SCC) não necessariamente normal a essas interfaces. A ordem numérica das interfaces é dada no sentido da projeção inversa (imagem \rightarrow objeto) e vai de 0 a n . O ponto inicial de projeção é o próprio centro de projeção da câmera ($\mathbf{q}_0 = \mathbf{C}$). A direção do feixe em cada meio é dado por \mathbf{v}_i e seu ponto de interseção com o próximo meio é \mathbf{q}_{i+1} . Cada meio possui espessura d_i , sendo $i < n$.

¹³ Código Matlab para o caso ar/água/ar e material extra disponível em: <http://www.umiacs.umd.edu/~aagrawal/index.html>.

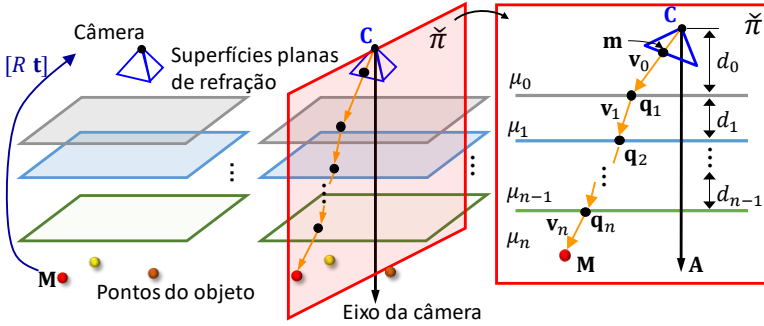


Figura 60 – Visão geral da projeção através de n camadas plano-paralelas de refração (esquerda). Caminho óptico completo para cada pixel fica num plano e todos os planos coincidem em um mesmo eixo que passa pelo centro da câmera (centro). Após o cálculo do eixo, análises podem ser realizadas no plano de refração para estimar a espessura da camada e os índices de refração (direita). Adaptado de (AGRAWAL et al., 2012).

O modelo matemático proposto por (AGRAWAL et al., 2012) se baseia em restrições geométricas que ocorrem nesse tipo de configuração. Tem-se que a direção do último vetor do caminho óptico \mathbf{v}_n deve ser paralelo ao vetor formado pelo ponto no objeto (\mathbf{M}) transformado em coordenadas da câmera ($R\mathbf{M} + \mathbf{t}$) e o último ponto de refração (\mathbf{q}_n). Ou seja, seu produto vetorial (\times) é igual a zero. Essa é a restrição de refração plana (FRC, *flat refraction constrain*), descrita matematicamente como:

$$\text{FRC: } (R\mathbf{M} + \mathbf{t} - \mathbf{q}_n) \times \mathbf{v}_n = 0. \quad (19)$$

Todo desenvolvimento matemático de (AGRAWAL et al., 2012) é vetorial, por isso, é necessário descrever a lei de Snell em sua forma vetorial. A direção do vetor unitário incidente \mathbf{v}_1 é alterada para a direção \mathbf{v}_2 , sendo que o vetor normal a superfície $\hat{\mathbf{n}}$ é contrário a \mathbf{v}_1 , sendo assim, conforme (GLASSNER, 1989):

$$\mathbf{v}_2 = \alpha \mathbf{v}_1 + \beta \hat{\mathbf{n}}. \quad (20)$$

Sendo “ \cdot ” o produto escalar e:

$$\alpha = \mu_r, \quad \beta = \mu_r c_1 - \sqrt{a^2(c_1^2 - 1) + 1},$$

$$\mu_r = \mu_2/\mu_1 \text{ e } c_1 = \cos(\theta_1) = -\hat{\mathbf{v}}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}},$$

expandindo:

$$\mathbf{v}_2 = \mu_r \mathbf{v}_1 - \left(\mu_r \mathbf{v}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}} + \sqrt{\mu_r^2 [(-\mathbf{v}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}})^2 - 1] + 1} \right) \hat{\mathbf{n}}. \quad (21)$$

O eixo da câmara é definido por um vetor unitário normal a superfície e com ponto inicial no centro de projeção. Considerando $\tilde{\pi}$ o plano de refração (POR, *Plane Of Refraction*) contendo o eixo \mathbf{A} e um dado raio de luz. Como $\hat{\mathbf{n}}$ está no plano, pela lei de Snell, os outros raios também devem estar contidos no mesmo plano. Sendo assim, conclui-se que todo o caminho óptico está em $\tilde{\pi}$ e o último raio deve interseccionar o eixo, já que ambos são coplanares. Por fim, todos os raios respeitam essas condições e interseccionam o eixo, ou seja, a câmara é axial. O ponto 3D em coordenadas da câmara ($\mathbf{RM} + \mathbf{t}$) deve estar no POR, como $\mathbf{A} \times \mathbf{v}_0$ é um vetor perpendicular ao POR, o seu produto escalar com $(\mathbf{RM} + \mathbf{t})$ deve ser zero. A equação resultante representa a restrição de coplanaridade para cada ponto 3D:

$$\text{Coplanaridade: } (\mathbf{RM} + \mathbf{t}) \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{v}_0) = 0. \quad (22)$$

Para obter o eixo da câmara (\mathbf{A}) são propostos dois algoritmos, sendo que o que apresenta melhores resultados é denominado de algoritmo de oito pontos, que estima o eixo da câmara de forma similar à obtenção da matriz essencial (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004) que relaciona duas câmeras perspectivas (NISTER, 2004). A espessura das camadas de refração é obtida através de um sistema linear, por fim, é feito um refinamento não linear, onde os pontos 3D são projetados no plano imagem e os parâmetros são ajustados de forma a reduzir o erro.

A figura 61 mostra o *setup* e a reprojeção dos pontos em um experimento com um aquário posicionado entre a câmara e o padrão xadrez. O erro de reprojeção obtido por (AGRAWAL et al., 2012) utilizando o modelo proposto e considerando SVP foi respectivamente de 0,33 e 10,10 pixels. A espessura do aquário foi estimada em 255,7 mm, um erro de -4,3 mm.

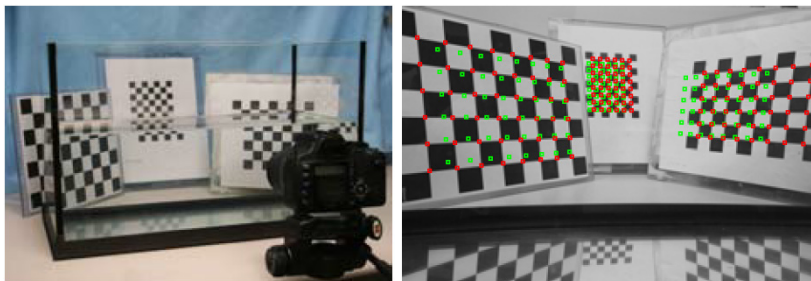


Figura 61 – Foto da montagem do experimento (esquerda) e foto tirada através do aquário com os pontos reprojetaados (direita) com a aproximação central (verde) e com o método proposto (vermelho) (AGRAWAL et al., 2012).

O trabalho (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012) descreve uma otimização (análise por síntese) utilizando o modelo CMA-ES (*Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*)¹⁴ para o método de calibração de (AGRAWAL et al., 2012) onde a imagem reprojetaada do tabuleiro de xadrez é comparada com a real e a diferença é minimizada. O processo foi paralelizado utilizando OpenMP¹⁵. A figura 62 mostra a comparação do erro de medição de um plano a quatro metros de distância por um par de câmeras calibradas utilizando o modelo SVP e o proposto por (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012). Fica evidente que a calibração de câmera axial considerando a refração resulta num erro muito menor. Todavia, nenhuma informação numérica é informada, como o desvio padrão e erro médio, além disso, não é feita uma comparação entre uma calibração realizada sem e com a minimização proposta.

¹⁴ *The CMA Evolution Strategy*: <https://www.lri.fr/~hansen/cmaesintro.html>

¹⁵ OpenMP: <http://openmp.org/wp/>

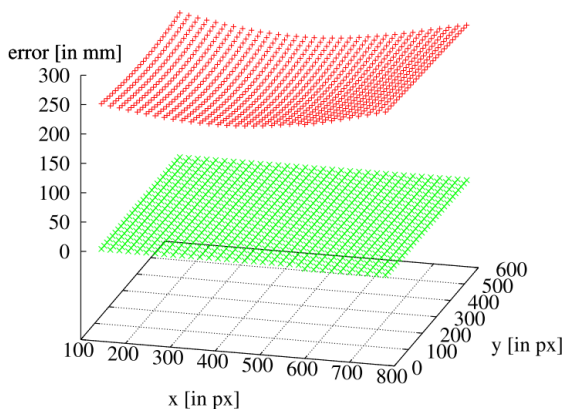


Figura 62 – Erro na medição de um plano triangulando câmeras calibradas utilizando o modelo SVP (vermelho) e o modelo de câmera axial considerando a refração (verde) (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012).

Uma forma alternativa de calibração, utilizando a triangulação de dois diferentes comprimentos de ondas é descrita em (YAU; GONG; YANG, 2013). Para tal, é utilizado um padrão com leds de duas cores diferentes dispostos regularmente em um plano. A figura 63 ilustra o caminho óptico de dois pontos no espaço projetados numa câmera através de n interfaces planas de refração. Nota-se que o caminho óptico e consequente ponto projetado na imagem muda para diferentes comprimentos de ondas.

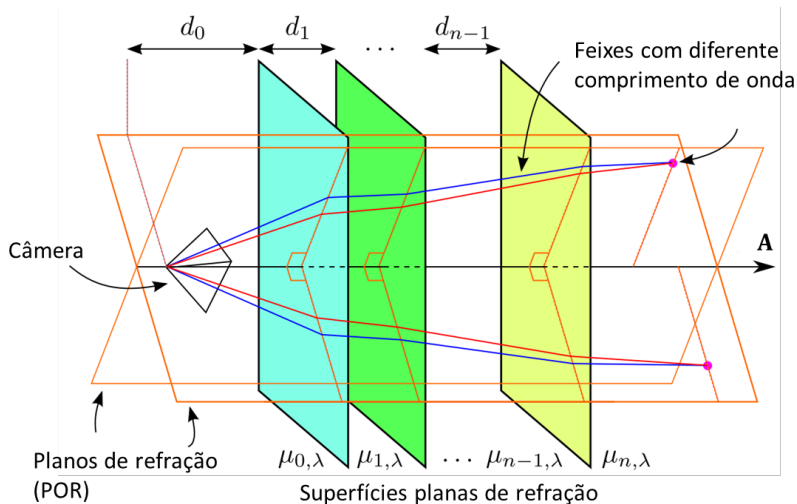


Figura 63 – Calibração por dois diferentes comprimentos de onda. Traduzido de (YAU; GONG; YANG, 2013).

O trabalho (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b) descreve a calibração e avaliação de um sistema de visão estéreo com projeção de franjas portátil para uso subaquático. A modelagem considera que as interfaces de refração são paralelas e perpendiculares às câmeras. Como na prática é difícil garantir que o eixo do sistema de coordenadas da câmera esteja suficientemente normal à interface de refração, os autores utilizam como compensação uma matriz de distorções. Os passos utilizados nos artigos para a calibração e medição são:

- Estimativa inicial de parâmetros fixos como os índices de refração, espessura do vidro distância da interface;
- Calibração SVP (*pinhole*) no ar;
- Estimativa dos parâmetros de calibração na água;
- Aquisição de imagens de objetos calibrados, como um plano e duas esferas em uma haste;
- Com os dados obtidos, é feita uma otimização para obter a distância à interface nas duas câmeras;
- Refinamento dos parâmetros de calibração na água.

O sistema utiliza a projeção de franjas e foi avaliado conforme o padrão VDI/VDE(VDI/VDE-2634, 2008). Suas principais especificações

estão listadas na tabela 4. O erro relativo (%) da variação no comprimento l_d e na planeza f_d é exposto na tabela 5. Nota-se que a modelagem utilizada é capaz de reduzir significativamente o erro obtido na água somente com o modelo SVP. Por fim, a medição na água em relação a no ar possui um erro e ruído, respectivamente em torno de três e duas vezes maiores.

Tabela 4 – Principais especificações do sistema descrito em (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b).

Parâmetro	Valor	Unidade
Volume de medição (VM)	$250 \times 200 \times 120 = 6 \times 10^6$	mm ³
Distância de trabalho	500	mm
Resolução da câmera	1600×1200	pixels
Resolução lateral no VM	0,15	mm
Ruído do ponto 3D (σ)	0,03	mm
Tempo de medição	350	ms
Profundidade máxima	40	m



Figura 64 – Sistema estereoscópico portátil com projeção de franjas para medição subaquática (BRÄUER-BURCHARDT; KÜHMSTEDT; NOTNI, 2015) (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b).

Tabela 5 – Comparação de erros em % de medição da distância dos centros de um padrão de par de esferas (E_{esf}) e de planeza (E_{plano}) (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b).

Meio	Modelo	l_d (%)	f_d (%)	Ruído σ
Ar	SVP	0,1	0,15	0,02
Água	SVP	1,0	1,7	0,05
Água	SVP + proposto	0,4	0,65	0,04
Água	SVP + proposto + matriz de distorções	0,35	0,4	0,03

3.4.3 Modelo para Interface domo

Conforme descrito anteriormente, quando possível, a utilização de janelas domo pode possibilitar o uso da modelagem SVP. O efeito da refração pode ser reduzida com o modelo de distorção radial (BRUNO et al., 2011) e também com um ajuste do comprimento focal (KANG; WU; YANG, 2012). Todavia, são de difícil alinhamento (TREIBITZ; SCHECHNER; SINGH, 2008) (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b), maior complexidade e custo.

3.4.4 Aproximação utilizando SVP

Alguns estudos visam verificar quando a aproximação por SVP em janelas planas pode ser válida. Em (TREIBITZ et al., 2012) é feita uma análise do erro resultante da utilização de um modelo SVP em um capítulo inteiro. As principais conclusões são de que: a) a medição deve ser feita na mesma distância da calibração, caso contrário, o erro cresce rapidamente com a variação da distância, conforme mostra o gráfico na figura 65. b) a calibração SVP não deve ser utilizada em ângulos de visão no ar maiores do que 30°, uma vez que o erro aumenta rapidamente para ângulos maiores. Esse efeito é ilustrado na figura 66. c) o alinhamento (perpendicular) do eixo da câmera com a interface é importante. Os valores foram normalizados em relação ao tamanho do pixel (ρ),

sendo $\tilde{d} = \frac{d}{1000\rho}$, $\tilde{f} = \frac{f}{1000\rho}$ e $\tilde{z} = \frac{z}{10^5\rho}$.

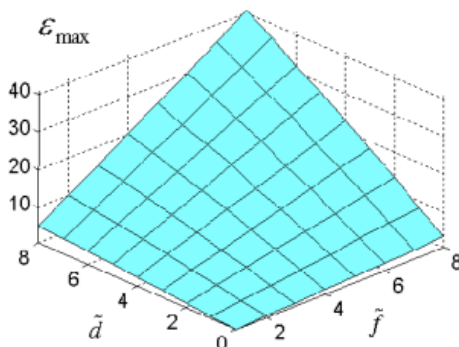


Figura 65 – Erro máximo (ε_{max}) de reprojeção em pixels para objetos em distâncias diferentes da calibrada. Distância da calibração e da medição foram respectivamente de 1,3 e 6,5 (AOV no ar de 40°). \tilde{d} = distância do centro de projeção à interface \tilde{f} = comprimento focal. Valores normalizados em relação ao tamanho do pixel (TREIBITZ et al., 2012).

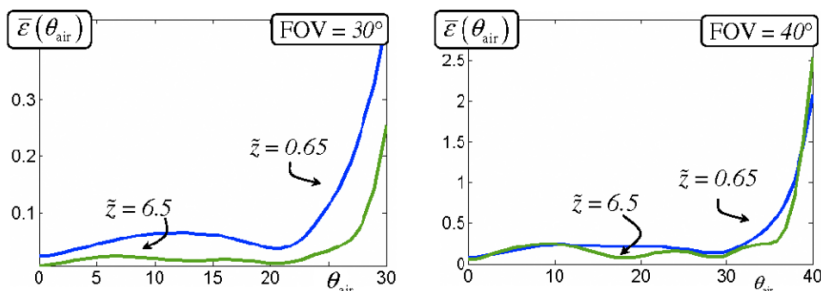


Figura 66 – Gráfico do erro máximo $\bar{\varepsilon}(\theta_{air})$ simulado da reprojeção para calibração e medição realizada em distâncias similares. O aumenta com o ângulo de visão no ar (θ_{air}). Valores normalizados em relação ao tamanho do pixel (TREIBITZ et al., 2012). Gráficos em escalas diferentes.

Kang *et al.* (KANG; WU; YANG, 2012) faz em uma análise da influência da refração na reconstrução 3D utilizando o modelo SVP. Em seu trabalho, para compensar o efeito da refração, é realizada a correção da distorção radial 2D e um ajuste do comprimento focal. Os parâmetros são ajustados utilizando *bundle adjustment*, que é uma técnica onde é feito simultaneamente o refinamento das coordenadas 3D, dos parâmetro de deslocamento relativo e das características ópticas das câmeras, de acordo com um critério ótimo envolvendo a projeção de todos os pontos correspondentes das imagens (TRIGGS et al., 2010). Como o modelo

SVP se comporta melhor para pequenos ângulos de visão e/ou se o objeto está longe da câmera, os experimentos realizados em (KANG; WU; YANG, 2012) fogem desse tipo de configuração, com o intuito de manter uma influência considerável da refração. Os resultados mostram que a redução do erro é significativa utilizando o modelo SVP em conjunto de correção radial e de comprimento focal para compensar a refração. No entanto, não é feita uma comparação com a correção obtida utilizando os modelos de câmera axial descritos em (TREIBITZ et al., 2012) ou (AGRAWAL et al., 2012).

O artigo (BIANCO et al., 2013) tem como objetivo principal avaliar e comparar a medição subaquática estereó ativa e passiva. Faz uma comparação entre o erro de reprojeção dentro e fora da água (calibrando as câmeras em ambos os meios). As câmeras foram calibradas seguindo o modelo SVP com o auxílio de uma *Toolbox* do Matlab (BOUGUET, 2013) já consolidada. Conforme pode ser visto nos gráficos da figura 67, o erro de reprojeção pouco difere no caso em que as câmeras estão submersas (b). A tabela 6 faz a comparação do erro de medição de um plano e um cilindro em meio subaquático com a técnica de estereoscopia ativa e passiva. Os erros são de poucos décimos de milímetros. Nota-se que o erro é maior com a medição ativa, o que a princípio não era esperado. Os autores esclarecem que isso ocorreu devido ao espalhamento (*scattering*) da luz projetada. Esse efeito foi reduzido realizando a projeção apenas com o canal verde.

É importante notar que (BIANCO et al., 2013) não invalida os trabalhos previamente descritos, como (TREIBITZ et al., 2012) e (AGRAWAL et al., 2012), pois em (BIANCO et al., 2013) foram utilizadas caixas estanque com janelas domo. Conforme visto anteriormente, esse tipo de janela tem um comportamento diferente das planas, uma vez que reduz distorções do ângulo de visão. As câmeras são do modelo Nikon D200, com sensor de 23,6 x 15,8 mm (3.872 x 2.592 pixels) e a lente uma AF-Nikkor 35 mm. Os ângulos de visão resultantes no ar, apesar de não especificados no artigo¹⁶, são de 37° x 25°, ângulos que podem ser considerados pequenos, outro fator que contribui na redução dos efeitos da refração. O volume de medição calibrado para o

¹⁶ Os ângulos de visão foram calculados em: <http://www.howardedin.com/articles/fov.html>.

par estéreo foi de $400 \times 300 \times 200$ mm a uma distância de 1 m. Fotos do sistema sendo calibrado e durante uma medição podem ser vistas na figura 68.

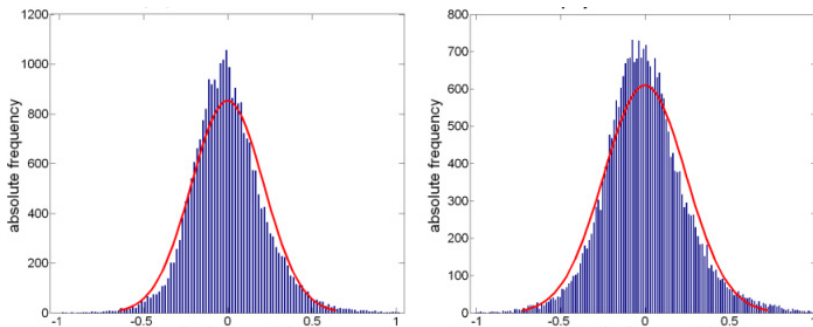


Figura 67 – Distribuição de erros (em pixels) de reprojeção no ar e na água (direita) (BIANCO et al., 2013).

Tabela 6 – Comparação do erro de medição de um plano e um cilindro em meio subaquático com a técnica de estereoscopia ativa e passiva (μ = média, σ = desvio padrão) (BIANCO et al., 2013). Valores em milímetros.

Parâmetro	Plano		Cilindro	
	Passiva	Ativa	Passiva	Ativa
Erro \ Técnica				
Médio ($\bar{\epsilon}$)	0,11	0,09	0,20	0,29
Desvio Padrão (σ)	0,08	0,07	0,13	0,25

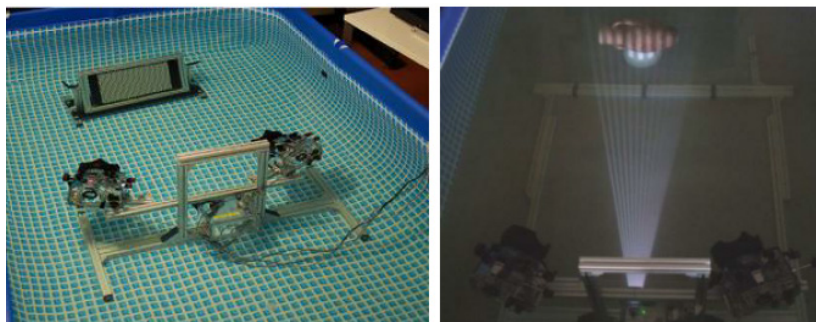


Figura 68 – Fotos do sistema sendo calibrado (esquerda) e durante uma medição (direita) com projeção de um padrão de luz (BIANCO et al., 2013).

3.4.5 Comparação das técnicas de calibração

As principais técnicas de calibração de câmeras em meio subaquático com interface plana estão listadas na tabela 7. Em (SEDLAZECK; KOCH, 2012) encontra-se uma tabela similar, listando outros alguns modelos de calibração.

Tabela 7 – Comparação entre as principais técnicas de calibração em meio subaquático para janela plana.

Descrição	Resultados obtidos	Aspectos positivos	Limitações	Ref.
Modelo físico Calibração individual	Foram fornecidos resultados limitados da medição de apenas uma dimensão (comprimento) de objetos perpendiculares à câmara. Erro estimado de 1-2%.	Calibração com apenas uma imagem	Assume que a interface está frontoparalela. Desconsidera o efeito da refração no vidro. O que gera erros quando utilizados vidros espessos. O índice de refração é considerado conhecido. Necessita conhecer a distância ao padrão de calibração	(TREIBITZ et al., 2012)
Modelo físico Calibração individual Múltiplas camadas de refração	Pequenos erros de reprojeção Erro de 1,66% na detecção da espessura de um aquário Erro de reprojeção de 0,33 pixels.	Considera múltiplas interfaces com distâncias desconhecidas; Considera índices de refração conhecidos e desconhecidos; Necessita apenas um tabuleiro de xadrez para calibração.	Complexidade, ainda não é uma “solução mínima” para o problema. Poucos resultados práticos. Nenhuma medição estéreo realizada.	(AGRAWAL et al., 2012)

Modelo físico Calibração estéreo Duas camadas de refração	Calibração conforme modelo físico simplificado. Erro de ruído, respectivamente da ordem de três e duas vezes maiores do que no ar.	Modelagem física simplificada. Resultados práticos com sistema estéreo apresentados e com bons resultados.	Não modela a inclinação em relação a janela, compensa isso utilizando uma matriz de distorções.	(BRÄUER-BURCHARDT; KÜHMSTEDT; NOTNI, 2015)
Modelo físico. Calibração estéreo. Capaz de encontrar as espessuras das interfaces e eixo das câmeras.	Resultado similar ao do Agrawal mas para o caso em que a normal e a espessura do vidro são desconhecidos (AGRAWAL et al., 2012) tem um resultado melhor.	Calibração utilizando somente a correspondência entre pontos na imagem. Não precisa conhecer o objeto.	Poucos resultados práticos.	(CHEN; YANG, 2014)
Modelo genérico de câmera axial	Calibração de sistema estereoscópico e catadióptricos. Poucas avaliações. Erro de 0,29% da distância	Modelagem genérica, pode ser utilizada para qualquer caso de câmera axial.	Necessidade de três tabuleiros de xadrez para calibração. Poucas avaliações e alta complexidade.	(RAMALINGAM; STURM; LODHA, 2006)
Mapeamento por pixel, modelo Raxel (<i>ray pixel</i>)	Calibra uma câmera SVP e nSVP (conjunto câmera espelho esférico), plota a superfície caustica dos dois casos.	Modelagem genérica, pode ser utilizada para qualquer caso de câmera.	Alta complexidade. Nenhum resultado prático encontrado. Número de imagens necessárias para calibração é elevado.	(GROSSBERG; NAYAR, 2005)

3.5 DISCUSSÃO

Foram descritas diversas técnicas que visam corrigir e atenuar as limitações causadas pelo espalhamento e absorção durante a propagação da luz na água, melhorando a relação sinal-ruído e recuperando as “cores originais” da cena.

Pode-se afirmar que sistemas ópticos de medição se mostram excelentes ferramentas na obtenção de medições subaquáticas detalhadas, rápidas e com pequena incerteza, como o sistema estereoscópico ativo portátil descrito em (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b). A triangulação com lasers verdes é uma solução típica e já comercializada para esse tipo de inspeção. Além de medições detalhadas, sistemas ópticos também são utilizados no auxílio da navegação de ROVs e AUVs. Nesse caso, erros de medição maiores (dezenas de milímetros) geralmente são tolerados.

No caso de medições de grandes distâncias (mais de 10 metros) ou quando a visibilidade impede a inspeção óptica, sistemas de ultrassom são a solução ideal. Sonares modernos são capazes de fornecer ótimos resultados em 2D (câmeras acústicas) e até mesmo em 3D, com densidade de pontos semelhante aos sensores a laser. Seu uso é indicado para regiões não confinadas (devido à problemas com múltiplas reflexões) e sua incerteza de medição é da ordem de dezenas de milímetros. Por fim, sistemas híbridos opto-acústicos visam unir as qualidades dos dois princípios, possibilitando, por exemplo, adicionar textura à uma medição por ultrassom, diminuir a incerteza e formar pares estéreo “câmera óptica” + “câmera acústica” ou de triangulação câmera + sonar. Alguns trabalhos já realizaram esse tipo de união (VILARNAU, 2009) (NEGAHDARIPOUR, 2007), mas poucos resultados ainda foram obtidos, sendo necessário mais estudos para o avanço desse tipo de concepção híbrida.

Quanto ao efeito da refração, estudos mostram que uma câmera observando uma cena através de interfaces planas de refração (portas planas) não se comporta como uma câmera central (SVP), mas como uma câmera axial. A distorção resultante da refração depende da distância, ou seja, não é meramente uma distorção 2D mas sim 3D (TREIBITZ et al., 2012). Diferentes técnicas de calibração foram desenvolvidas com o intuito de modelar corretamente a câmera considerando a refração. Alguns desses modelos são recentes, sendo o de (AGRAWAL et al., 2012) o mais completo e utilizado em diversos trabalhos recentes (DOLEREIT; KUIJPER, 2014), (GUI et al., 2014), (HANER; ASTR, 2015), (HANER et al., 2015), (JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012) e (KAWAHARA; NOBUHARA; MATSUYAMA, 2014). Em contrapartida, (KANG; WU; YANG, 2012) mostra que para alguns casos a aproximação por SVP e um modelo de distorção de lente 2D em

conjunto com ajuste do comprimento focal pode ser suficiente na compensação da refração, no entanto, não compara sua técnica com a modelagem de refração descrita em (AGRAWAL et al., 2012). Fica claro que quanto menor o ângulo de visão e quanto maior a distância do objeto, mais o sistema se comporta como SVP, chegando a um ponto em que esse tipo de modelagem é suficiente para a calibração da câmera. Além disso, com o uso de janela domo, a correção por distorção pode ser suficiente. Todavia, nenhum trabalho encontrado faz uma comparação detalhada do erro obtido com um sistema de visão estéreo com janela plana, domo e no ar (referência).

Além da correção da refração por modelagem matemática, é possível corrigi-la com a utilização de uma óptica corretiva (portas totalmente corretivas), que tornam a água “invisível”. No entanto, esse tipo de janela é muito específico à lente. Somando a isso, aparentemente existe baixa demanda por esse tipo de óptica. Como resultado, janelas desse tipo são raras, somente fabricadas sob encomenda e com alto custo.

No caso de superfícies de refração não planas, mais especificamente janelas domo, aparentemente a aproximação por SVP e correção de distorção 2D pode ser suficiente, uma vez que o erro em sistemas estereoscópicos calibrados dessa maneira dentro da água foi próximo ao no ar (BIANCO et al., 2013) (SWIRSKI; SCHECHNER, 2013).

Com base na revisão do estado da arte em medição óptica subaquática realizada, a triangulação inversa é um tema não abordado ainda nessa área pela comunidade científica. Conforme descrito anteriormente (tópico 2.4.2), a triangulação inversa possui uma série de vantagens, como a medição com nuvem de pontos regular e com volume e resolução pré-definidos. Em um sistema óptico com visão através de superfícies de refração, a projeção direta (necessária para cada ponto 3D testado na triangulação inversa) não é trivial devido às refrações e possui um custo computacional bem mais alto do que no ar. Essas questões serão apresentadas e discutidas no capítulo seguinte, onde as técnicas desenvolvidas durante a tese são expostas.

4 TRIANGULAÇÃO INVERSA ATRAVÉS DE INTERFACES PLANAS DE REFRAÇÃO

Os capítulos 2 e 3 fizeram o levantamento do estado da arte dos conceitos e técnicas que serão base para a presente tese, a qual consiste na realização de medição 3D com um sistema de visão estéreo através de interfaces planas e paralelas de refração utilizando a medição orientada ao objeto, ou, triangulação inversa (InvT). O nome dado a técnica é “triangulação inversa através de interfaces planas e paralelas¹⁷ de refração”, ou “*Inverse Triangulation Through Flat Refractive Surfaces*” (ITTFRS).

Os algoritmos descritos no presente capítulo foram validados em uma série de experimentos controlados, onde realiza-se a avaliação metrológica e calibração de um sistema óptico estéreo com projeção de franjas, simulando em laboratório a realização de medição subaquática. Esse tipo de configuração apresenta três meios de refração: ar, vidro (ou outro material transparente) e água. A metodologia dos ensaios e os resultados obtidos são expostos respectivamente nos capítulos 5 e 6.

A seguir descreve-se a técnica desenvolvida e suas etapas de processamento, assim como a calibração utilizada para obtenção dos parâmetros necessários para a realização do cálculo do caminho óptico através de interfaces planas de refração.

4.1 MODELAGEM GERAL

A figura 69 ilustra a triangulação inversa através de múltiplas interfaces planas de refração. O volume de medição é definido pelo paralelepípedo na imagem. As resoluções em \mathbb{R}^3 são dadas por δ_x , δ_y e δ_z . As câmeras “L” e “R” são representadas pelas pirâmides na imagem. Conforme o modelo de Agrawal (AGRAWAL et al., 2012), cada câmera possui um eixo (**A**) normal às interfaces de refração e com ponto inicial em seus respectivos centros de projeção. Na imagem, três dos N_z pontos

¹⁷ Por simplicidade, o termo “interfaces planas”, quando não especificado o contrário, refere-se a “interfaces planas e paralelas” de refração.

discretizados são projetados através dos n meios com índices de refração $\mu_{0,\dots,n}$.

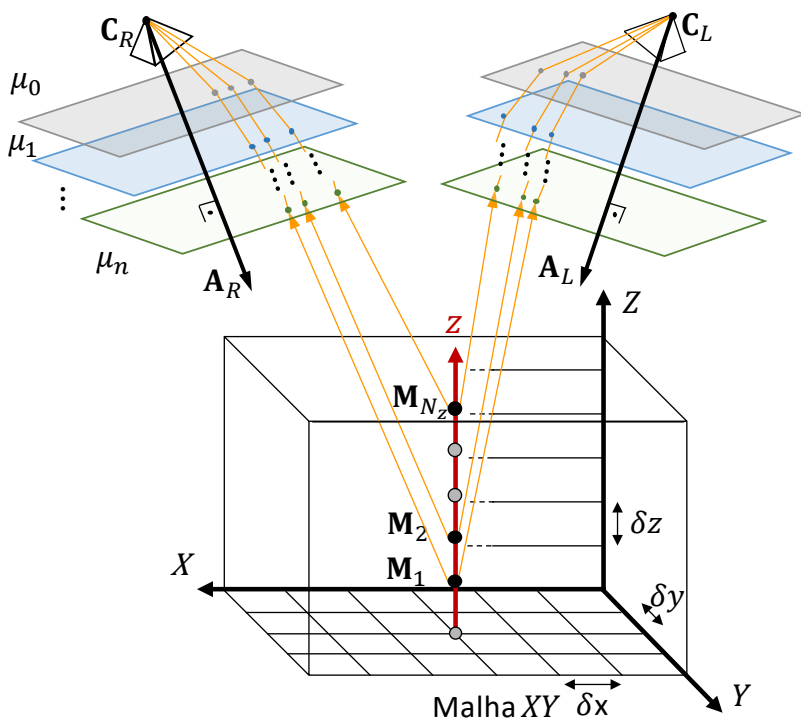


Figura 69 – Triangulação inversa através de $n - 1$ interfaces planas de refração (n meios). Três pontos de procura por um z válido em um nó da malha XY sendo projetados nas câmeras “ L ” e “ R ”. O paralelepípedo representa o volume de medição, com resoluções espaciais δ_x, δ_y e δ_z .

A figura 70 ilustra os parâmetros de refração (Tabela 8) e parâmetros do caminho óptico (Tabela 9) expostos na seção 3.4.2. Conforme descrito anteriormente os vetores \mathbf{A} (eixo da câmera) e \mathbf{v}_0 (direção da projeção do ponto na imagem) formam um plano de refração (POR) $\tilde{\pi}$, onde todo o caminho óptico estará contido e conseqüentemente o ponto \mathbf{M} . Já em um sistema estéreo, um ponto \mathbf{M} irá pertencer simultaneamente aos planos de refração de ambas as câmeras, conforme a ilustração da figura 71. Nota-se que os planos possuem uma linha de interseção, que não necessariamente é paralela ao eixo Z , uma vez que tal

condição depende da inclinação dos eixos das câmeras, os quais são normais às superfícies de refração.

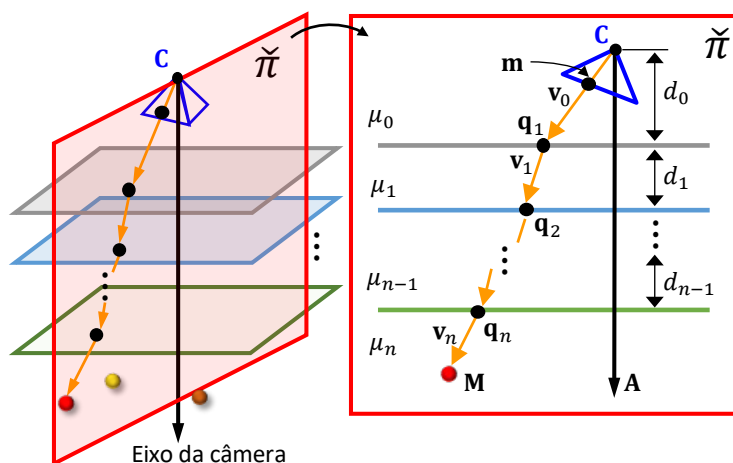


Figura 70 – Projeção inversa de ponto na imagem m em sistema estéreo através de múltiplas interfaces planas de refração. Adaptado de (AGRAWAL et al., 2012).

Tabela 8 – Parâmetros de refração.

Símbolo	Descrição
A	Eixo da câmera
d_0, \dots, d_{n-1}	Distâncias das interfaces
μ_0, \dots, μ_n	Índices de refração

Tabela 9 – Parâmetros resultantes da refração.

Símbolo	Descrição
$\mathbf{q}_0 \equiv \mathbf{C}$	Ponto inicial, coincide com o centro da câmera
$\mathbf{q}_{1,\dots,n}$	Pontos de interseção nas interfaces planas de refração
$\mathbf{v}_{0,\dots,n}$	Vetores direção

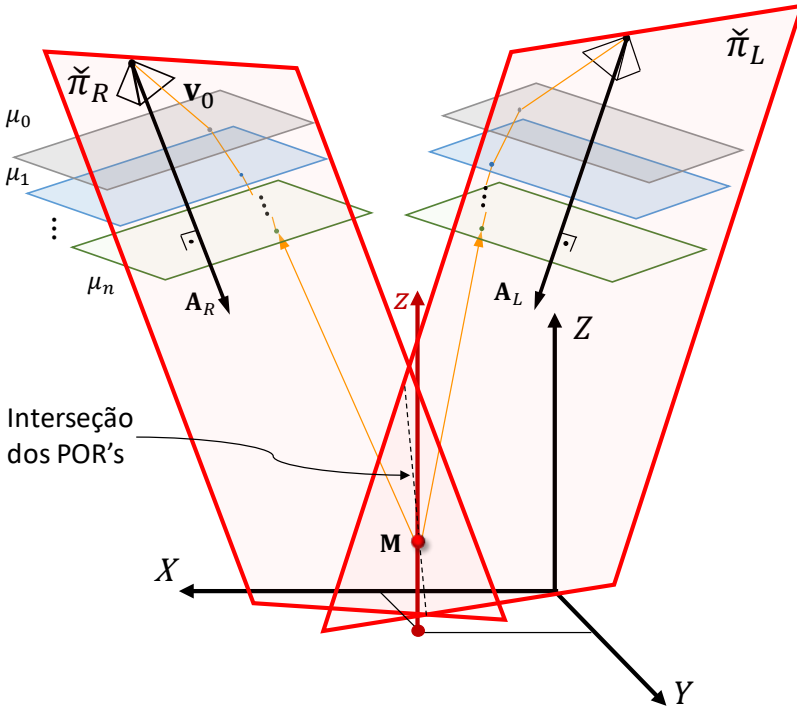


Figura 71 – Triangulação inversa de ponto 3D \mathbf{M} em sistema estéreo através de múltiplas interfaces planas de refração. Planos de refração (POR) $\tilde{\pi}_L$ e $\tilde{\pi}_R$ formados pelos respectivos vetores \mathbf{A} e \mathbf{v}_0 . O ponto 3D \mathbf{M} está contido em ambos os planos de refração.

No ar, o caminho óptico entre \mathbf{M} e o centro de projeção da câmera é uma reta, conforme o modelo *pinhole* (seção 2.1). Já quando o caminho óptico passa através de diferentes meios, o cálculo da projeção não é trivial pois, devido às refrações nas interfaces dos meios, seu percurso não é mais uma única reta, mas sim um caminho óptico cujo comprimento (*optical path length* - OPL) será o de menor tempo, respeitando o princípio de Fermat (descrito no **Apêndice A**). Deve-se notar também que os pontos projetados na imagem para um determinado vetor de procura Z , não estão sempre contidos em uma reta, como no caso da projeção no ar e sim numa curva.

Existem diferentes formas de realizar a projeção de \mathbf{M} nas câmeras, por exemplo, no caso de três meios com diferentes índices de refração

distintos, pode-se resolver uma equação de ordem 12 (AGRAWAL et al., 2012). Deve-se notar que a complexidade do equacionamento aumenta com o número de interfaces de diferentes índices de refração. Como solução alternativa, durante a tese, desenvolveu-se um método iterativo para a projeção através das interfaces planas de refração. O método obtém o caminho óptico da projeção direta através da minimização do erro da projeção inversa de forma iterativa (mais detalhes em 4.3.2).

4.2 TRIANGULAÇÃO INVERSA

4.2.1 *Compilação dos parâmetros utilizados*

Nessa seção é feita a descrição de todos os parâmetros utilizados no cálculo da triangulação inversa através de interfaces planas de refração. A partir de agora será considerado que o método de identificação de pontos homólogos é o valor absoluto da diferença de fase resultante do método de projeção de franjas.

Com o intuito de facilitar o entendimento dos métodos, tomou-se aqui uma abordagem no formato “entrada/saída”, o que deixa mais claro quais são os parâmetros necessários para cada etapa de cálculo. A descrição completa e o símbolo de todos os parâmetros que serão utilizados são listados na tabela 10. Além disso, para cada um dos métodos descritos nas seções subsequentes, os parâmetros utilizados são listados de forma resumida em uma tabela. Deve-se lembrar que existe para cada uma das câmeras (L e R) os respectivos dados de medição para identificação de pontos homólogos, parâmetros da câmera e de refração.

Tabela 10 – Compilação dos parâmetros de entrada e de saída dos algoritmos utilizados. Parâmetros necessários para o cálculo através de interfaces planas de refração são indicados com “*”. As setas indicam → Entrada e ← Saída. São necessários para cada uma das câmeras os dados de medição, parâmetros da câmera e de refração.

Nome	Descrição	Símbolo
Dados de medição →	Mapa de fase	Φ
	Mapa de modulação	Γ
Parâmetros da câmera (Intrínseco) →	Matriz de projeção	K
Parâmetros da câmera (Extrínseco) →	Matriz de rotação e translação	$Rt = [R \ t]$
Parâmetros de refração * →	Eixo da câmera	\mathbf{A}
	Distâncias das interfaces	d_0, \dots, d_{n-1}
	Índices de refração	μ_0, \dots, μ_n
Resultados de refração (InvProjRefra) * ←	Pontos de interseção nas interfaces planas de refração	$\mathbf{q}_{1,\dots,n}$
	Vetor direção	$\mathbf{v}_{0,\dots,n}$
Configuração do algoritmo iterativo (IteraProjRefra) * →	Tolerância	τ_{tol}
	Número máximo de iterações	$\tau_{iter_{max}}$
	Constante de multiplicação	τ_K
	Estimativa inicial do ponto 2D na imagem. Se não fornecida utiliza-se por padrão o ponto obtido com a projeção direta no ar (sem refração)	-

Informações do algoritmo iterativo (<i>IteraProjRefra</i>) * ←	Número de iterações realizadas	-
	Erro obtido	-
Ponto (nó) para varredura →	Ponto na malha XY	(x, y)
Resultado de medição ←	Pontos 3D, valor absoluto da diferença de fase e modulação mínima (pior modulação no ponto)	$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \Delta\phi_1 & \Gamma_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & \Delta\phi_n & \Gamma_n \end{bmatrix}$

4.2.2 Volume de medição - Cálculos relacionados

O número de valores discretizados numa região na coordenada x delimitada por $[x_{min} \ x_{max}]$ é dado por:

$$N_x = 1 + \left\lfloor \frac{x_{max} - x_{min}}{\delta_x} \right\rfloor, \quad (23)$$

sendo $\lfloor x \rfloor$ a função *floor* de x (arredonda x para o menor inteiro) e δ_x a resolução. O vetor de valores discretizados é obtido como:

$$V_X = x_{min} : \delta_x : x_{max} = [x_{min} \ (x_{min} + 1\delta_x)(x_{min} + 2\delta_x) \ \dots \ (x_{min} + (N_x - 1)\delta_x)], \quad (24)$$

Como exemplo, uma região definida por 0:0,1:200 resulta em 2.001 valores. A área de procura no plano XY possui então $N_{xy} = N_x N_y$ nós, onde é realizada a varredura em Z. Por fim, o número total de pontos para uma determinada resolução Z é $N_{xyz} = N_x N_y N_z$. A tabela 11 expõe o total de pontos para um dado volume e resolução para o caso de busca exaustiva (ou força bruta), ou seja, sem nenhuma técnica de redução no número de pontos a serem testados.

Tabela 11 – Número de pontos para um determinado volume de medição e resolução no caso de busca exaustiva ou força bruta.

Eixo	Mínimo	Máximo	Faixa (máximo - mínimo)	Resolução	Pontos
X	0	200	200	0,10	2.001
Y	0	200	200	0,10	2.001
Z	0	200	200	0,01	20.001
Nós na malha XY (N_{XY})					4.004.001
Total de pontos (N_{XYZ})					80.084.024.001

O número total de pontos passa os 80 bilhões. Sendo assim, a projeção de todos os pontos acarreta numa enorme demanda computacional. Deve-se lembrar que, para testar cada ponto, é necessário realizar a projeção para as duas câmeras e verificação se são ou não pontos homólogos (por exemplo pelo valor absoluto da diferença de fase). Para realizar o processamento de todos esses pontos em um minuto, seria necessário verificar cada ponto 3D em 0,7 ns, ou uma frequência de 1,3 GHz. Essa frequência é da mesma ordem de grandeza da frequência de operação de um processador atual, lembrando que a verificação de um ponto requer centenas de instruções. Sendo assim, fica evidente a necessidade da redução de pontos a serem testados assim como a otimização do código de programação. A seguir, descreve-se o procedimento adotado para a realização da triangulação inversa e, em sequência, as técnicas adotadas para a redução do número de pontos testados.

4.2.3 Triangulação inversa

A triangulação inversa descrita de forma geral anteriormente é aqui detalhada conforme a implementação adotada no presente trabalho de tese. Seus parâmetros de entrada e saída são listados na tabela 12, sendo indicados com “*” os parâmetros necessários para a realização do processamento considerando a refração através de interfaces planas de refração. Esses parâmetros serão utilizados na etapa de projeção dos pontos 3D a serem testados.

Tabela 12 – Parâmetro de entrada e saída da triangulação inversa. Parâmetros adicionais devido à refração indicados por “*”.

Entrada	Saída
<ul style="list-style-type: none"> • Dados de medição • Volume e resolução de medição • Parâmetros da câmera • Parâmetro de refração* • Configuração do algoritmo iterativo de refração* 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuvem de pontos e respectivos valores de fase e modulação • Informações do algoritmo iterativo*

Conforme ilustra o diagrama de blocos da figura 72, o processamento é realizado da seguinte forma: inicialmente os mapas de fase são filtrados conforme o valor de modulação mínimo permitido. Todo valor de fase fora desse limite é definido como inválido (*NaN*, não é número). Considera-se aqui que os mapas de fase e modulação já tiveram a distorção da imagem devido à lente compensada (ver seção 2.2.2). Para cada combinação dos valores discretizados em X e Y (V_X, V_Y) tem-se um nó XY onde é feita a busca por um z válido. Para essa busca são necessários os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras obtidos na calibração no ar e adicionalmente, para o processamento considerando a refração, os parâmetros de refração. A busca retorna o z encontrado ou um valor inválido (*NaN*) caso o valor mínimo do módulo da diferença de fase obtido seja maior do que o máximo tolerado. Mais detalhes sobre o processo de busca por um z válido são dados nas seções seguintes. Após o processamento de todos os nós XY , o método remove os pontos com z inválido e retorna os pontos 3D obtidos e suas respectivas diferenças de fase e modulação.

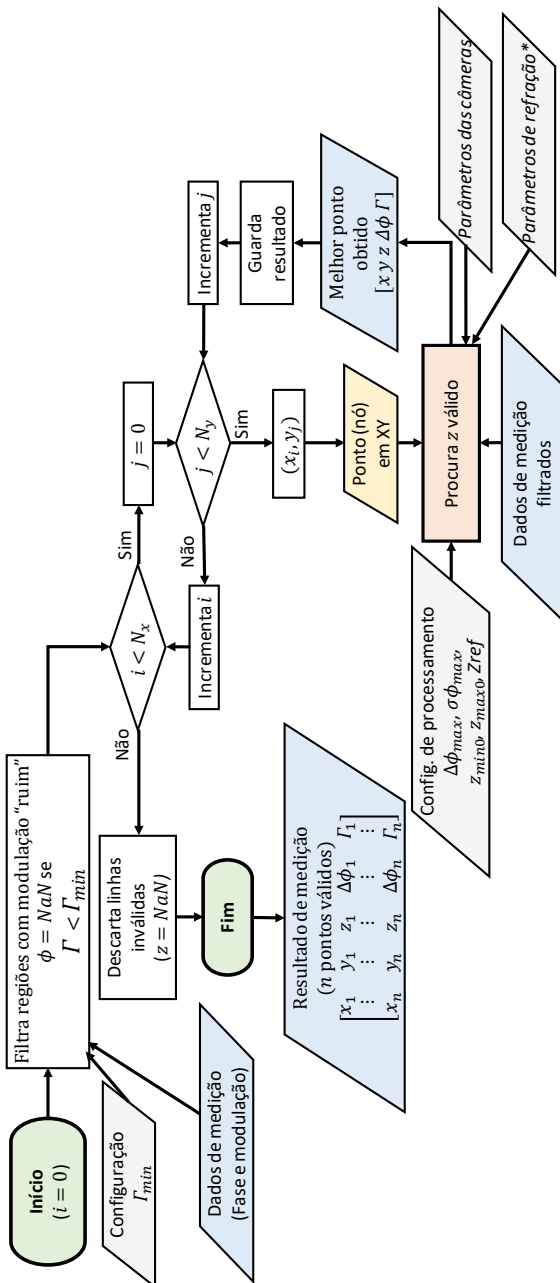


Figura 72 – Diagrama de blocos da triangulação inversa.

4.2.4 Refino em Z (ZScan)

Conforme descrito em (FANTIN; ALBERTAZZI; PINTO, 2007) e na tese (PINTO, 2010), o refino em Z (ZScan) consiste na varredura com melhoria da resolução em Z de forma gradativa. Esse processo pode reduzir drasticamente o número de pontos a serem testados. A figura 73 ilustra o gráfico do módulo da de diferença de fase ($|\Delta\phi|$) para uma determinada linha de varredura em Z. O diamante “◊” indica o mínimo global do valor absoluto da diferença de fase (se infinitos pontos fossem discretizados). Os círculos indicam, para a primeira grau de refino do método (Iteração #1) o módulo da diferença de fase obtida para cada um dos pontos discretizados e projetados nas câmeras. O valor mínimo obtido na primeira iteração define a região central da próxima iteração, com limites dados pelos valores em Z “vizinhos” ou “z obtido” \pm “resolução utilizada”. Abaixo do eixo Z na imagem, pode-se ver um esquemático da evolução do z obtido (triângulos) durante cada iteração. Nota-se que, no final do processo, um valor muito próximo à $|\Delta\phi|_{min}$ global é obtido.

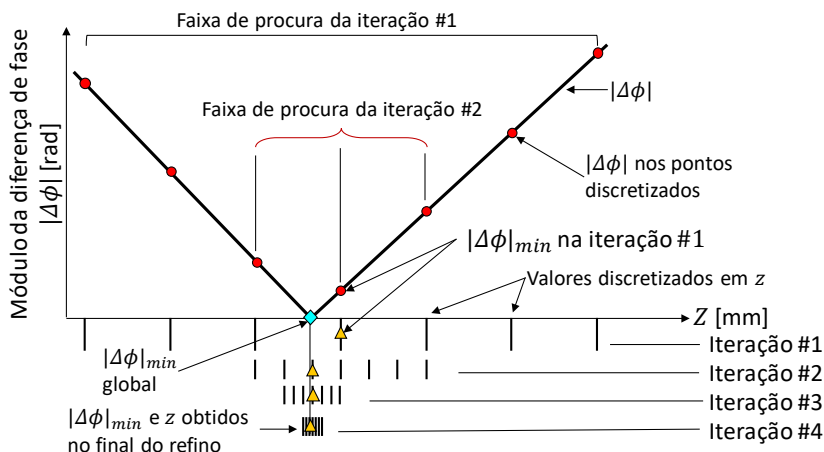


Figura 73 – Refino em Z (ZScan) para o módulo da diferença de fase ($|\Delta\phi|$) com quatro graus/iterações de refino. Esquemático dos refinamentos em cada iteração exposto abaixo do eixo Z. O número de divisões em cada iteração é apenas ilustrativo.

O cálculo do número de valores discretizados pode ser obtido pela soma:

$$N_{zt} = 1 + \left\lfloor \frac{R_{z0}}{\delta_{z0}} \right\rfloor + 1 + \left\lfloor \frac{R_{z1}}{\delta_{z1}} \right\rfloor + \dots + 1 + \left\lfloor \frac{R_{zn}}{\delta_{zn}} \right\rfloor,$$

$$N_{zt} = n + \sum_{i=0}^{n-1} \left\lfloor \frac{R_{zi}}{\delta_{zi}} \right\rfloor, \quad (25)$$

sendo n o número de graus de refino (iterações) e R_{zi} a faixa de varredura em Z para cada iteração i . Note que $R_{z,0}$ é dada pela faixa definida pelos limites iniciais (no caso do exemplo, 200). Já $R_{z,i>0}$, como dito anteriormente, é a faixa definida pelo “z obtido” \pm “resolução”:

$$\begin{aligned} z_{\max,i} &= z_{i-1} + \delta_{z,i-1} \\ z_{\min,i} &= z_{i-1} - \delta_{z,i-1} \end{aligned} \quad (26)$$

$$R_{zi} = z_{i,\max} - z_{i,\min}, \quad (27)$$

Como exemplo numérico, considerando quatro graus de refino com fator de redução de dez e para uma resolução final em z de 0,01, tem-se os seguintes valores gradativos de resolução: $\delta_{z0,\dots,3} = [10 \ 1 \ 0,1 \ 0,01]$. Aplicando esse refino gradativo para uma faixa de varredura em z de -100 a 100 mm ($z_{\min,0} = -100$ e $z_{\max,0} = 100$), pode-se calcular o total de pontos discretizados utilizando a equação (25):

$$N_{zt} = 1 + \left\lfloor \frac{100 - (-100)}{10} \right\rfloor + 1 + \left\lfloor \frac{2 \times 10}{1} \right\rfloor + 1 + \left\lfloor \frac{2 \times 1}{0,1} \right\rfloor + 1 + \left\lfloor \frac{2 \times 0,1}{0,01} \right\rfloor = 4 + 4 \times 20 = 84.$$

Sendo assim, são discretizados apenas 84 valores ao invés de 20.001, uma redução de 238 vezes.

Os parâmetros relacionados a esse processo são listados na tabela 13. O diagramas de blocos da figura 74 ilustra o procedimento de refino em Z e também a lógica de seleção de um ponto 3D válido.

Tabela 13 – Dados de entrada e saída do refino em Z incluindo a validação do ponto ou não.

Entrada	Saída
<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros da câmera • Parâmetro de refração • Dados de medição • Configuração do algoritmo iterativo de projeção • Ponto/nó (x, y) a ser varrido em Z 	<ul style="list-style-type: none"> • Ponto com o z obtido $[x \ y \ z \ \Delta\phi \ mod]$

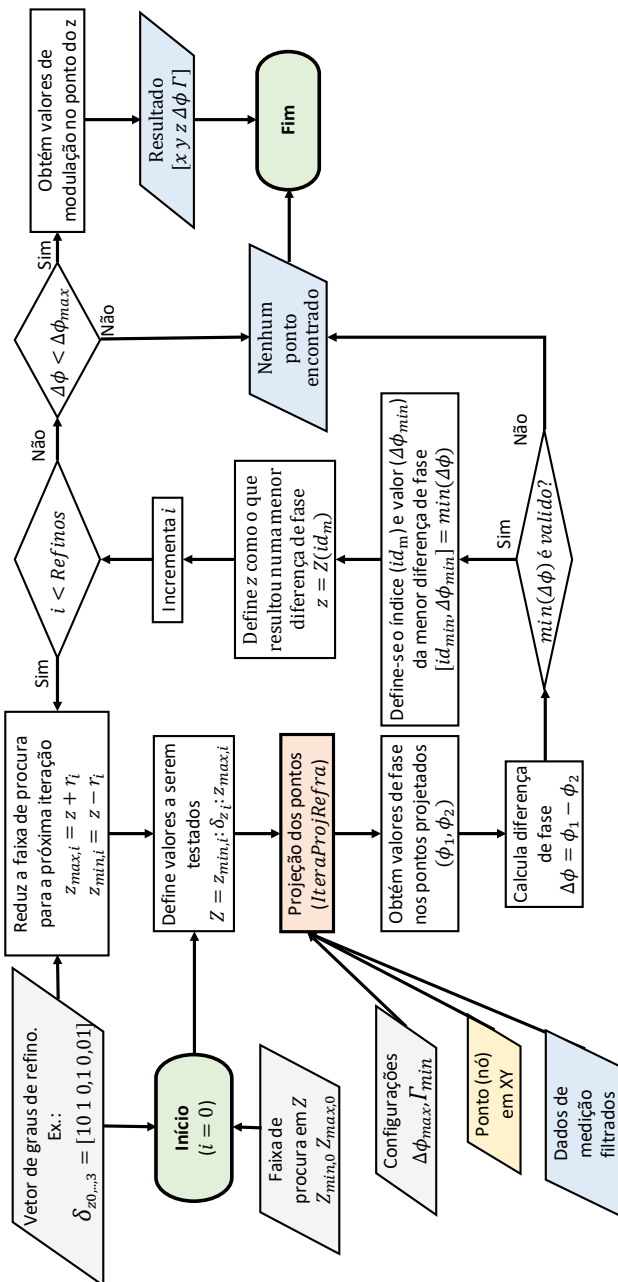


Figura 74 – Diagrama de blocos do refino em Z (ZScan).

4.2.5 Refino em Z com maior tolerância a descontinuidades (ZScan2)

Uma limitação do refino gradativo em Z (ZScan) é que, devido a descontinuidades no mapa de fase, o algoritmo pode se perder, refinando a busca em um ponto com diferença de fase de um mínimo local. A descontinuidade no mapa de fase pode ser causada tanto por descontinuidade física da peça ou descontinuidade devido à cor da superfície, como partes escuras em que a modulação obtida é muito baixa. Conforme ilustra a figura 75, durante o refino em Z, os pontos amostrados cujo módulo da diferença de fase ($|\Delta\phi|$) mais próxima ao mínimo global ($|\Delta\phi|_{min}$ “verdadeiras”) podem cair numa região de descontinuidade, resultando em diferença de fase inválida. Sendo assim, o mínimo do refino atual é na verdade um mínimo local, tendo o valor de z provavelmente removido na última etapa de refino devido a diferença de fase não ser menor do que a máxima tolerada para um ponto válido. Por fim, a nuvem de pontos ficará com regiões de “falha”.

Com o intuito de tornar o método mais tolerante a descontinuidades, desenvolveu-se na presente tese um algoritmo de correção, que pode aumentar a região de procura da próxima iteração baseado na avaliação da diferença de fase dos pontos vizinhos ao mínimo encontrado.

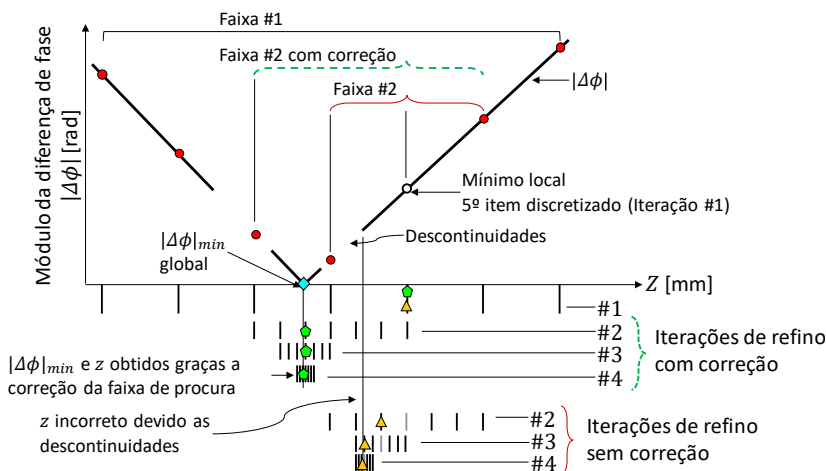


Figura 75 – Gráfico do módulo da diferença de fase ($|\Delta\phi|$) com pontos de amostragem durante refino em Z . Devido a descontinuidades no $|\Delta\phi|$, um falso mínimo é obtido, acarretando em uma faixa de procura na próxima iteração de refino fora da região do mínimo global. Com a correção da faixa de procura, o mínimo global pode ser encontrado. Esquemático dos refinamentos em cada iteração exposto abaixo do eixo Z . O número de divisões em cada iteração é apenas ilustrativo.

O algoritmo funciona da seguinte maneira: Antes de definir os limites de procura em Z ($Z_{max,i}$ e $Z_{min,i}$) para o próximo grau de refino, é feita uma varredura nos valores de módulo da diferença de fase anteriores e posteriores ao ponto de mínima. Caso a diferença de fase subsequente seja válida, nada muda para o limite superior. Caso contrário, o limite superior é dado pela soma da resolução mais o z de índice anterior à próxima diferença de fase válida (z_{Lmax}). Considerando o exemplo da figura 75, pode-se notar que na primeira iteração, obteve-se o menor $|\Delta\phi|$ no quinto ponto discretizado. Todavia, o terceiro e o quarto ponto estão sobre uma região de descontinuidade, sendo assim, ao invés do limite de procura da próxima iteração ser dado pelo valor obtido em $Z \pm$ a resolução (ver equação (28)), o limite inferior será menor.

Tem-se então que os limites são dados por:

$$\begin{aligned} Z_{max,i} &= z_{Lmax} + \delta_{zi-1}, \\ Z_{min,i} &= z_{Lmin} - \delta_{zi-1}. \end{aligned} \tag{28}$$

Podem ocorrer casos em que existem muitos pontos vizinhos inválidos ao de mínima fase, o que pode aumentar muito a regiões de procura do próximo refino. Sendo assim, define-se uma constante que define o valor máximo de busca por uma diferença de fase válida, nomeada de $\tau_{Cor,max}$. Durante testes com descontinuidades no mapa de fase que ocorreram devido à cor escura de alvos circulares colados na peça (ver foto na figura 76), notou-se que uma tolerância de quatro ou cinco saltos já é adequada. Sendo que valores maiores não fizeram diferença significativa no resultado.

A figura 76 ilustra o resultado de medição no ar sem refino em Z de uma face de manequim a qual possui alvos colados em sua superfície. Como os alvos são círculos de cor preta vazados e com um círculo central brancos, a medição resultante possui “falhas” circulares. Verifica-se e eficácia do ZScan2 na figura 77, sendo possível corrigir todos os artefatos e obter 99,97% dos pontos que seriam obtidos sem o refino em Z .

Deve-se atentar que algumas regiões com artefatos utilizando o ZScan, como o ponto central do alvo, aparentam ser “duplicadas”. Pode-se atenuar tal efeito reduzindo o valor do máximo do módulo da diferença de fase tolerado, o que resultará na remoção de pontos, mas não na correção das regiões de falha.

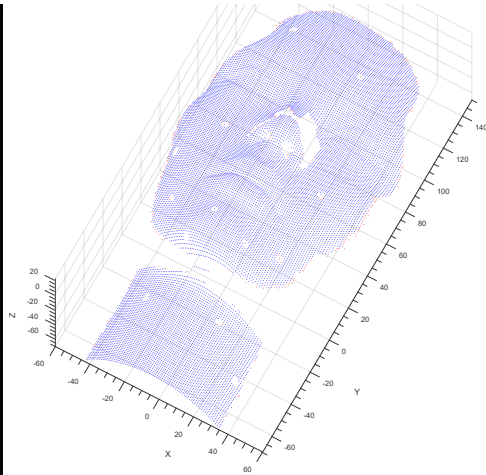
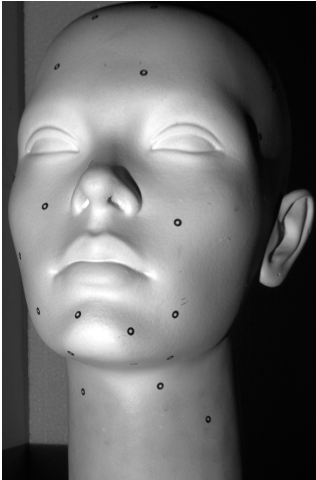


Figura 76 – Foto e resultado de medição sem refino em Z no ar de face do manequim. Nota-se regiões com falhas circulares devido aos alvos de cor escura colados no objeto.

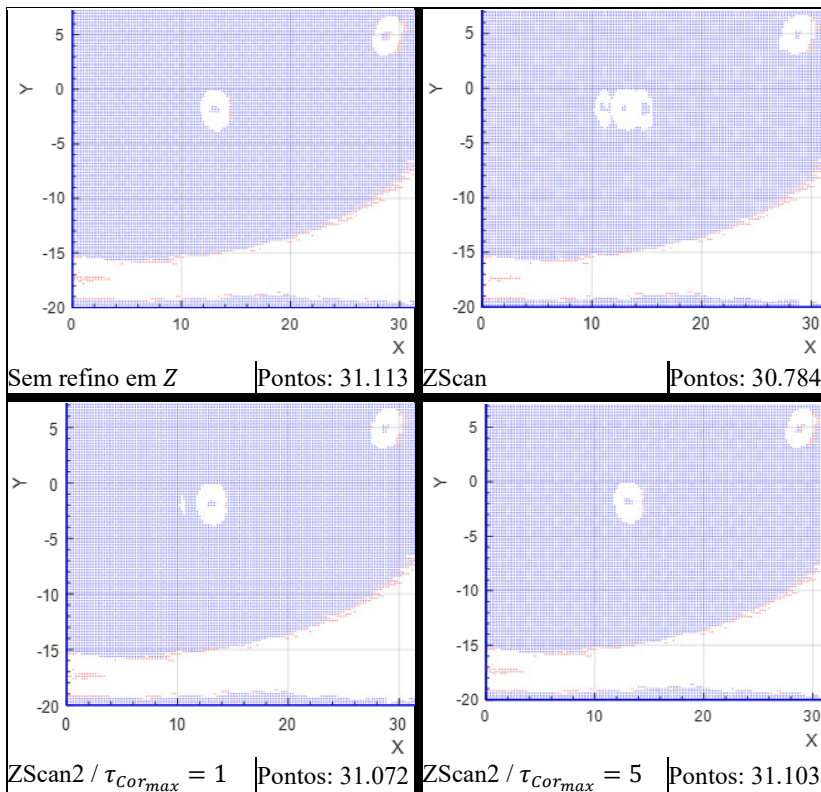


Figura 77 – Comparação do resultado de medição de região do queijo da cabeça de manequim (Figura 76). Nota-se claramente os artefatos causados pela descontinuidade da fase. Com apenas um passo de tolerância na correção da faixa de procura ($\tau_{Cor_{max}} = 1$) quase todos artefatos desaparecem. Já com cinco a medição é praticamente mesma do que a obtida com o processamento sem refino (diferença de 10 pontos, ou 0,03%).

4.2.6 Refino em XY

O refino em XY tem grande influência no tempo de processamento, uma vez que são fatores multiplicativos. Por exemplo, um fator de 10 vezes na resolução X e Y resulta num número de pontos 100 vezes menor. Uma maneira simples de realizar esse refino é o processamento da medição com uma resolução “grosseira” em XY e obtenção do volume de medição. Realiza-se então nova medição, com a resolução refinada, por exemplo, em 10 vezes. Os limites de procura da próxima iteração são

dados pelo volume de medição obtido anteriormente somado à resolução anterior.

4.2.7 *Medição com volume de procura de forma livre (XYZScan)*

Uma maneira aprimorada de refino, aqui nomeada de “medição com volume de procura de forma livre” ou *XYZScan* é obtida se os limites em *XYZ* forem baseados na nuvem de pontos da iteração anterior. Ou seja, ao invés de realizar a procura por pontos válidos em um paralelepípedo, a procura é feita numa forma livre. Os limites dessa forma livre podem ser definidos pela interpolação bilinear entre os pontos vizinhos da iteração anterior, ou então, simplesmente no “pequeno” paralelepípedo formado pelos pontos extremos. A liberdade de forma do volume de procura pode ser somente em um ou em uma combinação de coordenadas, sendo a ótima a que utiliza as três (*XYZ*). Deve-se atentar que é possível perder pontos no caso em que a superfície do objeto mensurado varie mais do que a forma de procura definida na iteração anterior. Esse refino aprimorado, apesar de vislumbrado, não foi implementado no código devido à limitação de tempo do trabalho.

4.3 PROJECÇÃO ATRAVÉS DE INTERFACES PLANAS DE REFRAÇÃO

A projeção direta (objeto \rightarrow imagem) é necessária para a realização da triangulação inversa, uma vez que pontos 3D são testados se válidos ou não. Já a projeção inversa (imagem \rightarrow objeto), utilizada na triangulação convencional, será utilizada também no presente trabalho em dois pontos: calibração dos parâmetros de refração (4.4) e no algoritmo iterativo para a projeção inversa, o qual é explanado logo em sequência (4.3.2). A seguir são descritos os dois métodos de projeção, inversa e direta.

4.3.1 *Método para a projeção inversa através de interfaces planas de refração (InvProjRefra)*

A projeção inversa através de n interfaces planas de refração pode ser realizada de forma direta, utilizando a lei de Snell para as refrações. A restrição dada pelo POR permite a realização do cálculo da projeção inversa em apenas duas dimensões (no POR) e posterior conversão para

3D após a obtenção de \mathbf{M} em 2D. Apesar de tornar a projeção mais simples (uma dimensão a menos), requer passos extras para mudança de sistemas de coordenadas ($3D \rightarrow 2D \rightarrow 3D$). Somando isso ao fato de que o POR somente é válido no caso de interfaces paralelas, optou-se por realizar o cálculo de maneira genérica em 3D. Deve-se lembrar que no caso de interfaces não paralelas, são necessários mais dados de entrada ao método, referentes ao vetor normal e um ponto em cada interface ao invés de somente um vetor normal dado pelo eixo da câmera (\mathbf{A}).

A seguir os parâmetros de entrada e saída (tabela 14) do processo e as etapas de cálculo são descritos (ver diagrama de blocos na figura 78):

Tabela 14 – Parâmetros de entrada e saída do método para projeção inversa através de interfaces planas de refração (InvProjRefra).

Entrada	Saída
<ul style="list-style-type: none"> • Ponto 2D na imagem • Parâmetros da câmera • Parâmetro de refração 	<ul style="list-style-type: none"> • Pontos de interseção ($\mathbf{q}_{1,\dots,n}$) nas interfaces planas de refração • Vetor direção no último meio (n)

Conforme o diagrama de blocos da figura 78 e a ilustração da figura 79, na primeira iteração ($i = 0$) o ponto inicial do primeiro feixe é o próprio centro de projeção da câmera definido no centro de coordenadas, ou seja $\mathbf{q}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ e o vetor direção \mathbf{v}_0 é obtido pela projeção inversa do ponto 2D \mathbf{m} : $\mathbf{v}_0 = K^{-1}\mathbf{m}$, conforme o modelo de câmera *pinhole* (vide seção 2.1). Já nas próximas iterações ($i > 0$), o vetor direção (\mathbf{v}_i), e o ponto inicial (\mathbf{q}_i) são dados direção do vetor anterior refratado e o ponto de interseção com a interface de refração, os quais foram obtidos na iteração anterior, conforme descrito a seguir:

Uma vez definido o ponto inicial do feixe e sua direção, calcula-se o ponto de interseção (\mathbf{q}_{i+1}) do vetor \mathbf{v}_i com a interface plana de refração. Para tal, utiliza-se a equação vetorial de interseção linha-plano, onde obtém-se o comprimento (s) do vetor até o ponto de interseção com a i -ésima interface plana de refração:

$$s_{i+1} = \frac{(\mathbf{p}_{p_i} - \mathbf{q}_i) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{\mathbf{v}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}}, \quad (29)$$

sendo que \mathbf{p}_{p_i} e $\hat{\mathbf{n}}$ representam respectivamente um ponto no plano e a normal à interface plana de refração; \mathbf{q}_i o ponto inicial da linha (feixe) e \mathbf{v}_i sua direção. Obtém-se então o ponto \mathbf{q}_{i+1} a partir da equação da reta:

$$\mathbf{q}_{i+1} = s_{i+1}\mathbf{v}_i + \mathbf{q}_i. \quad (30)$$

Substituindo (29) em (30):

$$\mathbf{q}_{i+1} = \left(\frac{(\mathbf{p}_{p_i} - \mathbf{q}_i) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{\mathbf{v}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}} \right) \mathbf{v}_i + \mathbf{q}_i. \quad (31)$$

Com essa equação pode-se propagar o feixe por interfaces não necessariamente paralelas, uma vez que requer para cada iteração a definição da posição e orientação da interface. Já para o caso de interfaces paralelas de refração, todas possuem o mesmo vetor normal (câmera é axial), que é de sentido oposto ao eixo da câmera ($\hat{\mathbf{n}} = -\mathbf{A}$). Já um ponto na interface de refração de índice i (\mathbf{p}_{p_i}) pode ser obtido pela projeção no eixo da câmera da distância absoluta, dada pela soma das espessuras das interfaces anteriores:

$$\mathbf{p}_{p_i} = \sum_{j=0}^i d_j \mathbf{A}. \quad (32)$$

Substituindo $\hat{\mathbf{n}}$ por $-\mathbf{A}$ e (32) em (31), obtém-se:

$$\mathbf{q}_{i+1} = \left(\frac{[(\sum_{j=0}^i d_j)\mathbf{A} - \mathbf{q}_i] \cdot \mathbf{A}}{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{A}} \right) \mathbf{v}_i + \mathbf{q}_i. \quad (33)$$

Como $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A} = 1$, a equação pode ser simplificada para:

$$\mathbf{q}_{i+1} = \left(\frac{(\sum_{j=0}^i d_j) - \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{A}}{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{A}} \right) \mathbf{v}_i + \mathbf{q}_i. \quad (34)$$

Sendo assim, para o caso de interfaces paralelas de refração, pode-se utilizar a equação (34).

Após a definição do ponto de interseção no plano e sua direção no meio atual, calcula-se o vetor direção para o meio seguinte (\mathbf{v}_{i+1}) utilizando a forma vetorial da lei de Snell (21). O processo se repete até

que o caminho óptico em todos os meios tenha sido definido. Como resultado, obtém-se os pontos de interseção $\mathbf{q}_{1,\dots,n}$ e o vetor direção no último meio (\mathbf{v}_n).

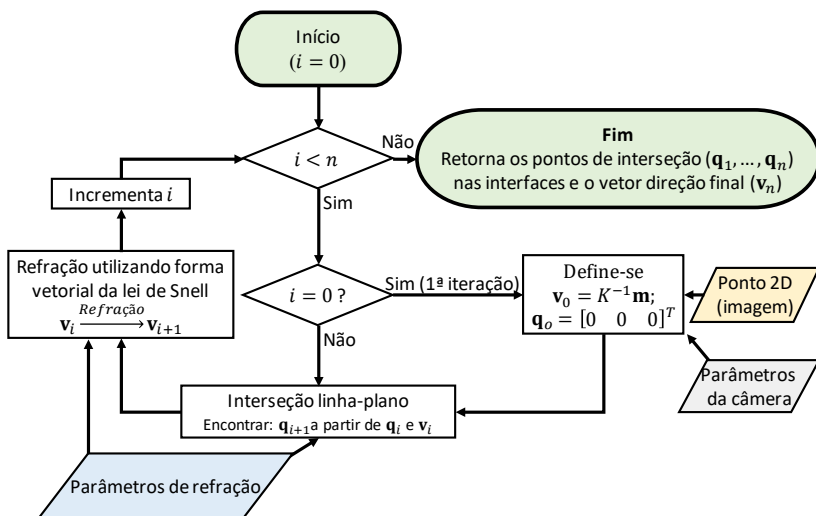


Figura 78 – Diagrama de blocos da Projeção Inversa Através de Múltiplas Interfaces Planas de Refração (InvProjRefra).

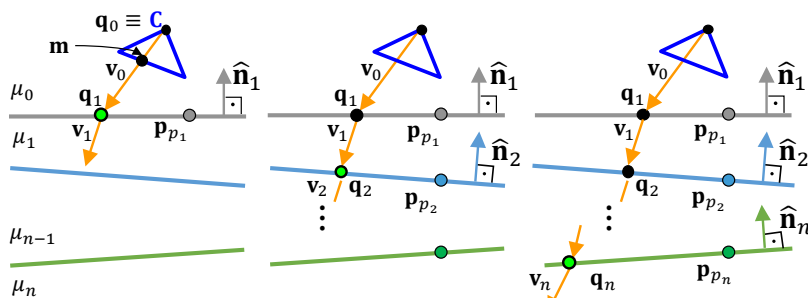


Figura 79 – Ilustração do primeiro ($i = 0$), segundo e último passo ($n - 1$) do método para projeção inversa *InvProjRefra*. No primeiro passo define-se interseção com a primeira interface (\mathbf{q}_1) e direção no segundo meio (\mathbf{v}_1). O procedimento é repetido até que se obtenha a interseção na última interface (\mathbf{q}_n) e direção no último meio (\mathbf{v}_n). No caso de interfaces paralelas de refração, todas as normais ($\hat{\mathbf{n}}_i$) às interfaces são iguais ao inverso da direção do eixo da câmera ($-\mathbf{A}$) e os pontos quaisquer nas interfaces (\mathbf{p}_{p_i}) podem ser obtidos pelas espessuras dos meios (Figura 70).

4.3.2 Algoritmo iterativo para a projeção através de interfaces planas de refração (*IteraProjRefra*)

O algoritmo calcula a projeção direta de forma iterativa a partir da minimização do erro da projeção inversa (descrita na seção anterior), dado pela distância do último raio projetado ao ponto 3D. A tabela 15 lista os parâmetros de entrada e saída do método. Já seu diagrama de blocos é exposto na figura 81 e descrito a seguir. Da mesma forma que o método anterior, pode-se utilizar o presente algoritmo para n interfaces não necessariamente paralelas. Para tal, deve-se conhecer um ponto e o vetor normal em cada uma das interfaces de refração.

Tabela 15 – Parâmetros de entrada e saída do método para projeção inversa através de interfaces planas de refração (*InvProjRefra*).

Entrada	Saída
<ul style="list-style-type: none"> • Ponto 3D (objeto) a ser testado na <i>InvT</i> • Parâmetros da câmera • Parâmetro de refração • Configuração do algoritmo iterativo • Estimativa inicial 	<ul style="list-style-type: none"> • Ponto 2D projetado na imagem

No início do processo define-se o vetor de erro (\mathbf{V}_e) como infinito. Na primeira iteração ($i = 0$) utiliza-se como parâmetro de entrada da projeção inversa o ponto 2D da estimativa inicial. De forma similar, (KOTOWSKI, 1988) resolve um sistema não linear de equações de forma iterativa e também utiliza como estimativa inicial a projeção no ar.

Esse ponto é projetado conforme a lei de Snell pelas interfaces de refração (método descrito anteriormente, *InvProjRefra*). Em sequência, calcula-se o módulo da distância ($\|\mathbf{V}_e\|$) entre a última linha projetada (saída do *InvProjRefra*) e o respectivo ponto 3D. Caso o erro seja menor ou igual à tolerância ou o número de iterações maior ou igual ao número máximo de iterações, o método encerra e retorna o ponto 2D calculado. Caso contrário, um novo ponto na imagem é calculado:

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{m}_{i-1} - \mathbf{m}_c, \quad (35)$$

sendo \mathbf{m}_c o vetor correção em pixel:

$$\mathbf{m}_c = \tau f \frac{1}{V_e(3)} \begin{bmatrix} V_e(1) \\ V_e(2) \end{bmatrix}, \quad (36)$$

definido por: dois primeiros elementos¹⁸ $V_e(1:2)$ do vetor de erro normalizado pela coordenada Z; comprimento focal médio f ; e τ que é uma constante que pode reduzir o número de iterações necessárias para a convergência do método. Durante experimentos (três meios: ar/vidro/água) com o algoritmo observou-se que o índice de refração da água ($\tau = \mu_{\text{água}}$) resulta em menos iterações. Sendo assim, adotou-se esse valor como padrão. Conforme mostrado na seção 3.2.1 (ver equação (16)), o fator de escala no caso da janela plana na água é aproximadamente o índice de refração da água, o que explica o uso de $\tau = \mu_{\text{água}}$.

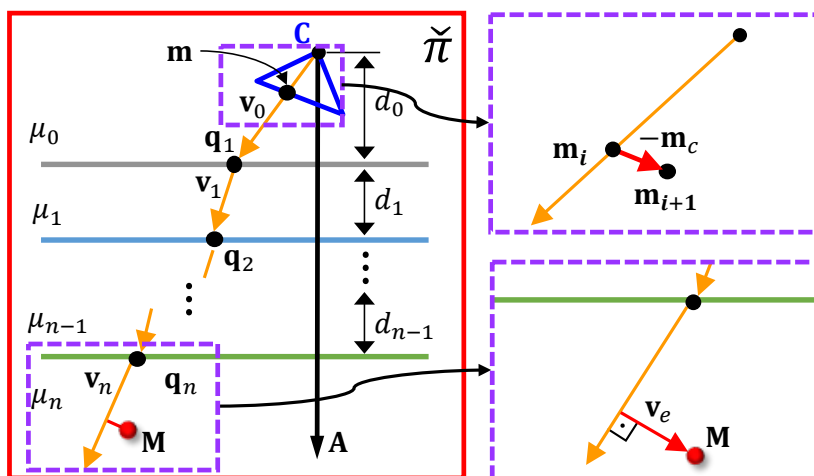


Figura 80 – Vetor de erro V_e utilizado no método iterativo. O método corrige \mathbf{m}_i (subtraindo \mathbf{m}_c) até que se obtenha um vetor erro de comprimento menor do que o erro máximo tolerado ou o número máximo de iteração seja atingido. Imagem esquerda adaptada de (AGRAWAL et al., 2012).

¹⁸ Considere que $V(a:b)$ é o vetor formado pelos elementos de índice a a b de um vetor qualquer V . $V(a)$ é o elemento de índice a de V .

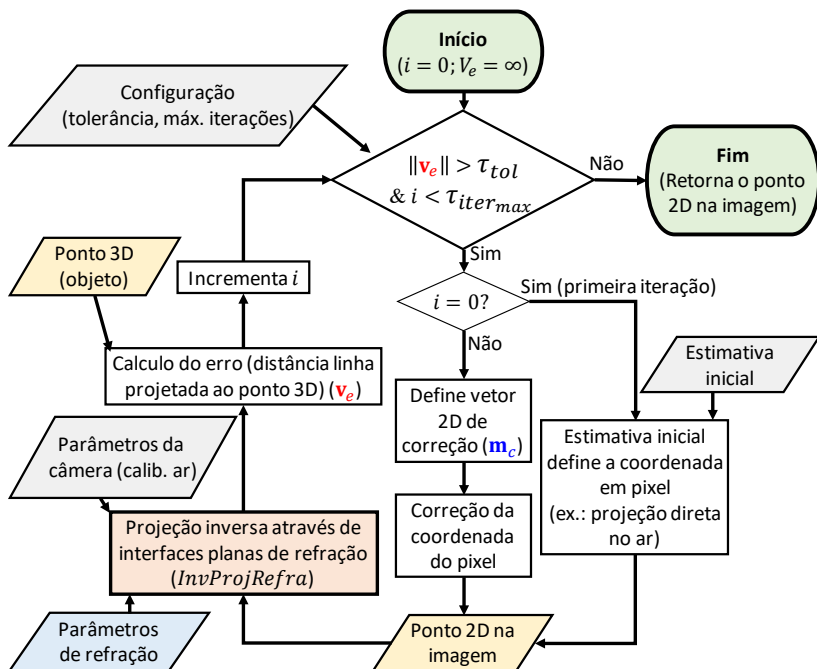


Figura 81 – Diagrama de sequência do algoritmo iterativo de cálculo da projeção direta através de interfaces planas de refração.

4.4 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REFRAÇÃO

A calibração do sistema estéreo para medição através de interfaces planas de refração é uma etapa de suma importância, uma vez que a definição dos parâmetros de refração de forma correta resulta numa melhor performance do sistema, ou seja, menor incerteza de medição.

Conforme descrito previamente (seção 3.4), existem diferentes técnicas para calibração individual ou estéreo (triangulação dos feixes) dos parâmetros de refração. Uma dessas técnicas utiliza o erro de medição de um par de esferas com distância fixa e um plano para a definição dos parâmetros de refração (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015a). Para realizar a calibração através da minimização do erro de medições de objetos calibrados, é necessário a codificação dos pontos homólogos de forma absoluta, ou seja, cada ponto na imagem deve possuir um código único. No caso da projeção de franjas, deve-se projetá-las não somente na

direção de maior sensibilidade do sistema (mesma orientação da coordenada de maior distância dos centros das câmeras), mas também na direção perpendicular a essa. Isso é necessário pois a codificação em apenas um sentido só pode ser utilizada se os parâmetros do sistema são conhecidos, limitando a procura por ponto correspondente em uma reta (projeção no ar) ou curva (através de interfaces de refração).

A calibração com a redução do erro de medição com codificação em apenas um sentido foi avaliada pelo autor e utilizada no artigo (BUSCHINELLI et al., 2016). Apesar da otimização convergir para valores que resultam num menor erro de medição, não garante que um ponto considerado válido projetado nas duas imagens represente o mesmo ponto real do objeto. Esse tipo de efeito pode ser notado quando se realiza a medição de objetos com variação “abrupta” no eixo de “menor sensibilidade” da codificação projetada. A figura 82 ilustra os artefatos obtidos, nota-se que a região dos olhos do manequim possui um padrão de “duplicação”, assim como a região com alvos colados. Isso ocorre, pois, as linhas de varredura em Z projetadas nas imagens, apesar de resultarem em um ponto com mínima diferença absoluta de fase (dentro da tolerância), devido a um erro residual de calibração, nunca passam pelo mesmo ponto do objeto na imagem. Por fim, os resultados experimentais reafirmam que se deve utilizar a codificação dupla (perpendiculares) na calibração, possibilitando a estimação adequada dos parâmetros de refração.

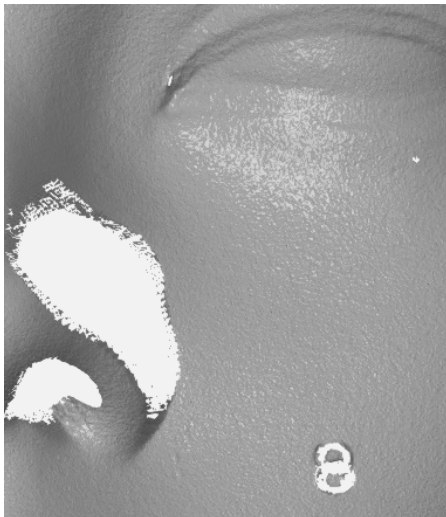


Figura 82 – Medição de rosto de manequim efeito de duplicação vertical devido a calibração incorreta. Note região dos olhos e alvo com duplicações verticais.

Apesar de ser possível contornar esse tipo de problema com codificação por fase em ambas as orientações, optou-se por desenvolver uma calibração com objetos mais simples e que seja indiferente ao método de identificação de pontos homólogos. A calibração desenvolvida se baseia em correspondências de pontos 2D em pares de imagens estéreo triangulados, que resultam em pontos 3D no espaço em relação a pontos 3D de um padrão. Esse tipo de calibração pode ser chamado de *calibração por correspondências estéreo 2D-3D*.

O método desenvolvido requer um padrão plano com pontos de fácil identificação na imagem, por exemplo, as interseções dos retângulos de um padrão tipo tabuleiro de xadrez. Este tipo de padrão geralmente é de fácil fabricação e calibração (medição dos retângulos). Conforme ilustra a figura 83, os pontos identificados nos pares de imagem são projetados utilizando o método de projeção inversa *InvProjRefra* (vide seção 4.3.1) e parâmetros de refração de uma estimativa inicial. Os feixes projetados no último meio (onde se encontra o padrão) são então triangulados. Idealmente, conhecidos os parâmetros de refração, esses feixes cruzariam e seu ponto de interseção seria exatamente o ponto 3D obtido no par de imagens. Todavia, devido a não linearidades, imperfeições na modelagem do sistema, ruído, limitação de resolução,

entre outros, isso não ocorre. Considera-se então que o “ponto de interseção” é o ponto médio da linha formada pelos pontos (\mathbf{c}_1 e \mathbf{c}_2) de menor distância entre os feixes projetados. O segmento formado por esses pontos será aqui nomeado de $\overline{\mathbf{c}_2\mathbf{c}_1}$. Uma vez conhecidos todos os “pontos de interseção” ou pontos médios, é feito um ajuste (rotação e translação) dos pontos 3D calibrados do objeto em relação à nuvem de pontos 3D triangulados. Em sequência, calcula-se os segmentos entre os pontos médios e seus respectivos pontos 3D conhecidos do padrão. Por fim, calcula-se o erro dado pelas distâncias dos pontos 3D e também pelo comprimento dos vetores de distância entre feixes ($\overline{\mathbf{c}_2\mathbf{c}_1}$). A distância entre os feixes também é considerada no erro justamente com o intuito de minimizar o problema descrito anteriormente, onde as curvas de procura nas imagens não possuíam pontos homólogos “verdadeiros”.

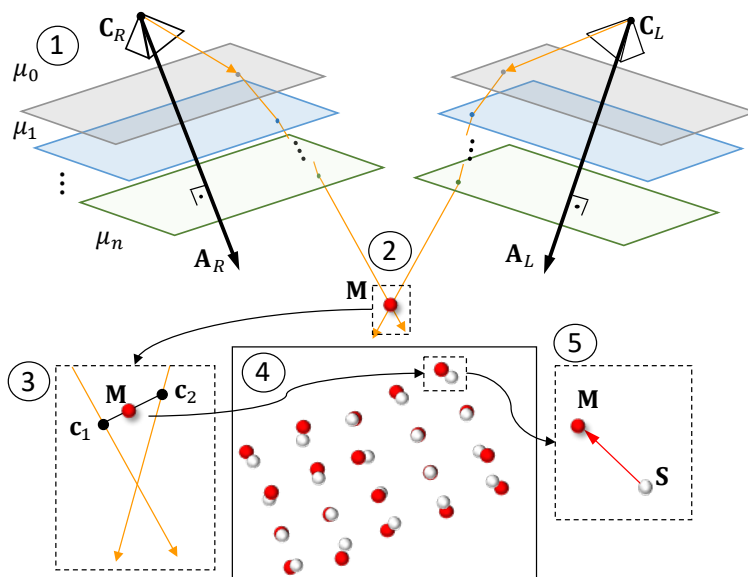


Figura 83 – Obtenção do erro residual durante a calibração dos parâmetros de refração (PR). 1) Definição dos PR. 2) Projeção inversa dos pares de pontos nas imagens. 3) Cálculo da mínima distância entre feixes triangulados e ponto médio. 4) Ajusta os pontos 3D conhecidos do padrão aos pontos 3D triangulados utilizando método do tipo de Horn. 5) Calcula distância entre pontos. Os PR são os que minimizam o erro dado por $\|\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2\|$ e $\mathbf{S} - \mathbf{M}$ para todos os pontos e poses do padrão.

A tabela 16 expõe os parâmetros de entrada e de saída da função custo de calibração.

Tabela 16 – Parâmetros de entrada e saída da função custo de calibração.

Entrada	Saída
<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros de refração (estimativas e valores fixos) • Pares de pontos 2D • Parâmetros das câmeras • Pontos 3D do padrão 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo. Lista de vetores erro, formada pelas distâncias entre os pontos triangulados e os pontos do padrão e pela distância dos feixes triangulados

Em suma, a calibração do sistema é realizada conforme as etapas a seguir:

1. Calibração das câmeras no ar utilizando o modelo *pinhole* com correção de distorção (seção 2.2).
2. Posicionamento do sistema estéreo para visualização através das interfaces planas de refração.
3. Aquisição de imagens de padrão de calibração dentro do volume de medição.
4. Remoção da distorção das imagens.
5. Obtenção dos pontos 2D nas imagens (ex.: grade do tabuleiro de xadrez).
6. Obtenção dos parâmetros de refração (\mathbf{A} , $d_{0,\dots,n}$ e $\mu_{0,\dots,n}$) através da minimização do erro dado pela distância entre os pontos 3D do padrão e os obtidos pela triangulação 2D dos feixes projetados, assim como a distância entre os feixes projetados.

4.5 VISÃO GERAL DA PROPOSTA

No presente capítulo foram descritas as técnicas desenvolvidas durante a tese para a realização da medição com sistema estéreo ativo através de interfaces planas de refração (AIPR) utilizando a triangulação inversa (InvT). Os principais conceitos são:

- Métodos para otimização do tempo: Refino em Z com maior tolerância a descontinuidades (4.2.5), refino em XY (4.2.6) e refino completo (4.2.7).
- InvProjRefra (4.3.1): Projeção inversa AIPR utilizado na calibração dos parâmetros de refração e no algoritmo IteraProjRefra.
- IteraProjRefra (4.3.2): Projeção direta AIPR, utilizado para realizar a InvT através de n interfaces não necessariamente paralelas.
- Calibração dos parâmetros de refração do tipo correspondências estéreo 2D-3D (4.4).

Nos capítulos seguintes descreve-se a ampla avaliação prática experimental realizada dos conceitos aqui expostos para o caso de duas interfaces de refração (três meios, $n = 3$), referentes aos meios ar/vidro/água. Deve-se notar que os conceitos aqui desenvolvidos podem ser estendidos para qualquer número de interfaces, assim como outras técnicas de identificação de pontos correspondentes podem ser utilizadas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação dos conceitos desenvolvidos na tese, realizou-se uma série de experimentos controlados, onde foi abordada a medição de formas 3D com um sistema estéreo óptico ativo (projeção de franjas) através de duas interfaces planas de refração, ar/vidro, vidro/água.

Devido à complexidade do desenvolvimento de um protótipo vedado para uso subaquático, optou-se por uma configuração “reversa” (Figura 84), onde o meio de medição é contido em um tanque com janelas anguladas e transparentes, ao invés da utilização de uma carcaça impermeável no sistema estéreo. Essa configuração facilita muito a realização dos testes em laboratório e possibilita a validação dos conceitos aqui propostos.

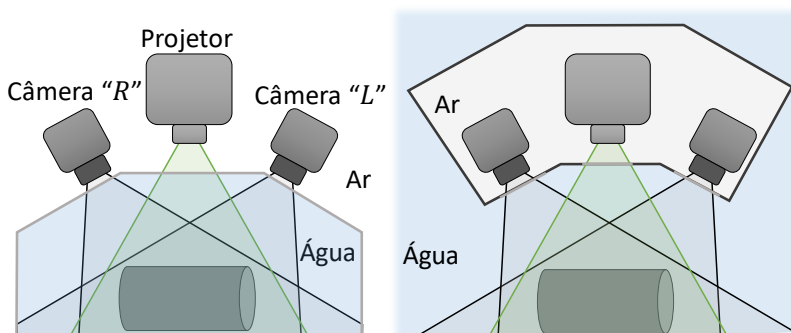


Figura 84 – Vista superior do esquemático da configuração “reversa” para testes em laboratório, onde o meio de medição fica contido em um tanque com paredes inclinadas (esquerda) e do sistema vedado (direita).

Optou-se pela utilização de um sistema de medição estéreo com projeção de franjas previamente avaliado metrologicamente para a medição no ar em (PINTO, 2010). Este sistema é descrito a seguir na seção 5.2 e no **Apêndice B**. Esta escolha permitiu um maior foco nos efeitos da refração e na avaliação da técnica de medição descrita na tese, que possui um grande componente de desenvolvimento de *software*.

Com base na revisão bibliográfica, conhecimento prático e hardware disponível para a realização dos experimentos, definiu-se

requisitos iniciais da capacidade de medição da configuração proposta, conforme expostos na tabela 17.

A seguir, são descritos os procedimentos adotados, assim como a montagem e configuração dos experimentos.

Tabela 17 – Requisito iniciais do sistema.

Item	Valor	Unidade
Volume de medição no ar	$200 \times 200 \times 200 = 8 \times 10^6$	mm ³
Volume de medição na água	$\approx 200 \times 200 \times 200 = 8 \times 10^6$	mm ³
Distância do protótipo ao mensurado (standoff)	≈ 500	mm
Resolução das câmeras	1624×1224	pixels
Resolução lateral (XY)	0,1	mm
Resolução Z	0,01	mm
Ruído no ponto 3D (σ)	0,05	mm
Erro máximo 3D	0,3	mm

5.1 CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados nas imediações do Labmetro, em uma área do prédio onde existem laboratórios de medição por coordenadas da fundação CERTI, o que garante um bom controle de temperatura e umidade na sala. Além disso, a estrutura do piso diminui a suscetibilidade a vibrações, podendo-se considerar o sistema estático durante todos os experimentos.

A figura 85 mostra a configuração do experimento antes do posicionamento do tanque de água. O sistema estéreo foi fixado sobre uma mesa de granito, com seu eixo de visão aproximadamente perpendicular à parede. Para facilitar o posicionamento dos objetos no volume de medição, foi colado papel *contact* branco sobre a mesa e linhas de referência foram desenhadas: início, meio e fim da faixa de medição e linha central paralela à parede. Uma terceira câmera foi posicionada centrada, mais alta e atrás do sistema estéreo (vide canto esquerdo superior da figura 85). Esta câmera possui duas funções principais: 1) documentação dos experimentos e alinhamento de objetos a serem medidos; e 2) medição de referência da posições e orientação das janelas

do tanque em relação às câmeras (**Apêndice C**). Estas posições são posteriormente comparadas com as obtidas com a calibração dos parâmetros de refração do sistema.

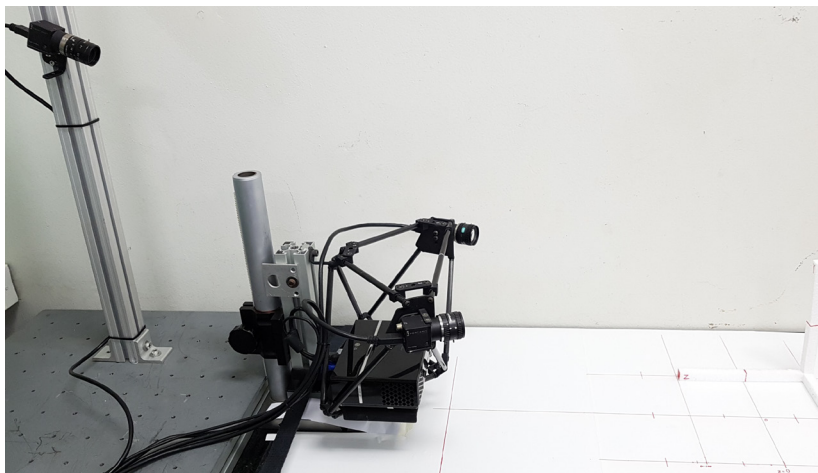


Figura 85 – Configuração do experimento sem o tanque de água. Sistema estéreo com projetor e terceira câmera (no canto esquerdo superior da imagem) utilizada para auxiliar nos experimentos.

A linha central vertical da imagem obtida por essa câmera foi alinhada visualmente com a linha de referência do centro de volume de medição do sistema estéreo (Figura 86). Deve-se notar que o alinhamento das linhas de referência e da terceira câmera não é crítico, pois não influenciam na capacidade de medição do sistema; mas têm o objetivo de facilitar o posicionamento do padrão de calibração e de objetos a serem medidos (primeira função da terceira câmera).

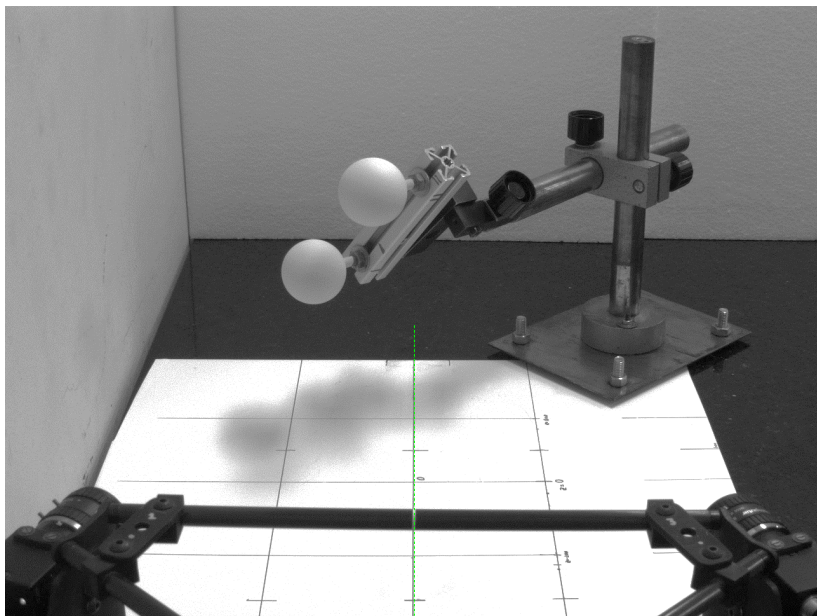


Figura 86 – Visão da terceira câmera, linha central de referência destacada (verde).

Foi construído um tanque com oito lados para a realização dos experimentos da presente tese. Conforme ilustra a figura 87, o tanque possui duas faces maiores e em cada um dos extremos possui três faces, sendo a central perpendicular à face maior e as duas laterais anguladas de forma simétrica. Apenas o lado “A” do tanque foi utilizado. Este possui ângulo nominal entre as normais das janelas inclinadas de 40° , que é o mesmo ângulo entre os eixos das câmeras do sistema estéreo.

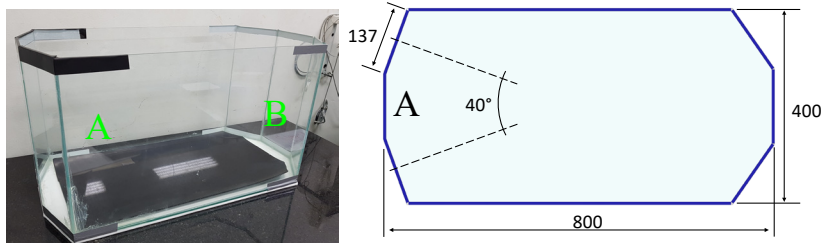


Figura 87 – Foto (esquerda) e dimensões (direita) do tanque de água montado para os experimentos da tese, o lado “A” foi o utilizado com o sistema estéreo e possui ângulo entre normais das janelas de 40° .

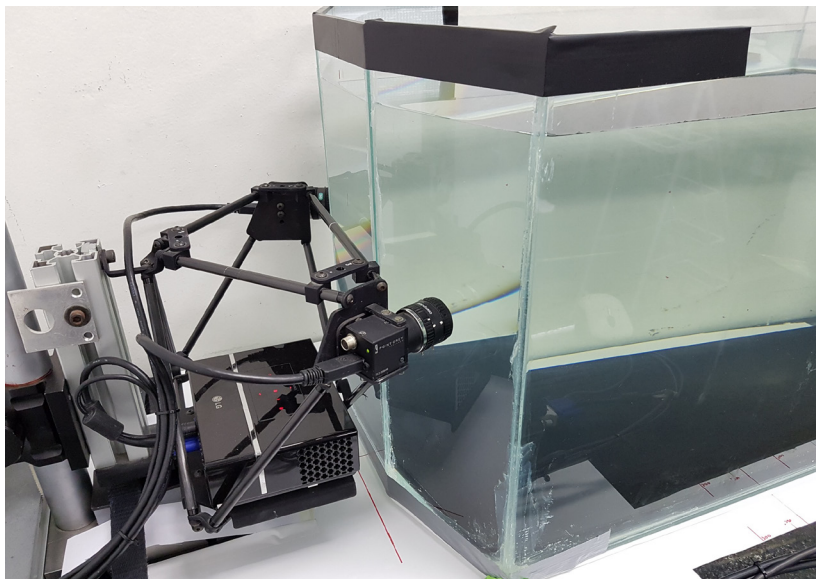


Figura 88 – Posicionamento do tanque com água na frente do sistema estéreo.

5.2 SISTEMA ÓPTICO ESTÉREO ATIVO COM PROJEÇÃO DE FRANJAS

O sistema óptico estéreo ativo utilizado (Figura 88) possui câmeras com resolução de 1624×1224 pixels² e lentes com comprimento focal de 8 mm. O projetor possui resolução de 800×600 pixels². Mais especificações do sistema podem ser vistas no **Apêndice B**. O tempo¹⁹ de aquisição e o de processamento das imagens para a obtenção dos pares de mapa de fase absoluta e de modulação são, respectivamente, em torno de 3 e 5 segundos.

A figura 89 expõe imagens típicas obtidas pelo sistema durante a projeção do mapa de fase e *gray-code*.

¹⁹ Aquisições e processamento das imagens (cálculo do mapa de fases absoluto e modulação) realizados em um notebook com a seguinte configuração: processador Intel i7 720QM @ 1,6 GHz; RAM 8 GB; placa de vídeo NVIDIA GTX 285m; Windows 10 64 bits.

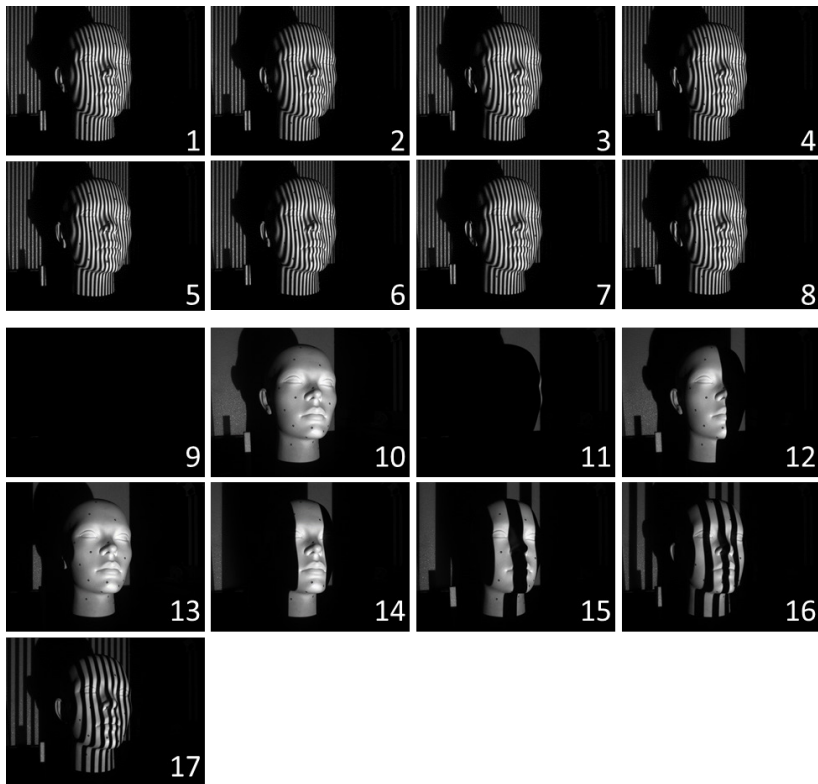


Figura 89 – Imagens adquiridas durante a medição de uma face de manequim no ar. As primeiras oito imagens são referentes aos passos da técnica de projeção de franjas, já as nove subsequentes (9-17) ao *gray-code* para a remoção do salto de fase.

5.3 PROCEDIMENTOS E CONFIGURAÇÃO DE PROCESSAMENTO

Os seguintes procedimentos foram adotados ao longo dos experimentos:

- Medição da temperatura do ar e da água no tanque.
- O sistema ficou ligado pelo menos 40 minutos antes da realização das aquisições.

- A luz ambiente foi desligada durante a medição (projeção das franjas) e durante a configuração do tempo de exposição da câmera.
- O tempo de exposição (ou *shutter*) foi configurado sempre como o máximo múltiplo de $\frac{10^3}{4 \times 60} \cong 4,1667$ ms sem que ocorressem pixels saturados na superfície do objeto a ser medido quando projetado o padrão de franjas. O valor de 4,166 ms foi o período obtido experimentalmente em (PINTO, 2010), onde a variação de intensidade na aquisição sequencial de imagens é mínimo. Este efeito ocorre possivelmente devido ao batimento da frequência de aquisição da câmera (15 Hz) e a de projeção (60 Hz), uma vez que câmera e projetor não são sincronizados.
- As imagens obtidas pelas câmeras industriais foram todas salvas no formato com compactação sem perdas PNG (Portable Network Graphics) e com 8 bpp (bits por pixel).
- O foco do projetor foi ajustado até que os pixels não fossem mais identificados no objeto a ser medido, evitando a perda da qualidade da projeção das franjas devido a limitações de resolução e do *fill factor* (espaçamento entre pixels) do projetor.
- Para a projeção do mapa de fase utilizou-se a configuração exposta na tabela 18.

Tabela 18 – Configuração padrão da projeção.

Parâmetro	Configuração
Direção de variação da fase	Horizontal
Passos	8
Pixels por passo	16
Cor	Branco
Remoção do salto de fase	<i>Gray-code</i>

- Graus de refino em Z: [10 1 0,1 0,01].

- Correção de descontinuidades (ver 4.2.5), máximo número de incremento (\pm) no índice do z de mínimo valor absoluto da diferença de fase: 4.
- Os parâmetros de processamento para a medição 3D com o ZScan foram, quando não especificado o contrário, os da tabela 19.

Tabela 19 – Configuração padrão de processamento.

Item	Símbolo	Valor	Unidade
Resolução em X e Y	-	0,1	mm
Resolução em Z	-	0,01	mm
Valor máximo tolerado do módulo da diferença de fase	$ \Delta\phi _{max}$	0,02	rad
Desvio padrão de fase máximo	$\sigma\phi_{max}$	0,50	rad
Modulação mínima	Γ_{min}	100	intensidade (0-255)
$IteraProjRefra$ - Tolerância	τ_{tol}	0,001	mm
$IteraProjRefra$ – Max. iterações	$\tau_{itermax}$	1.000	-

5.4 CALIBRAÇÃO

A seguir, são descritos os procedimentos adotados durante as calibrações no ar e na água. A partir de agora, quando citado modelo de câmera “SVP”, deve-se entender SVP (projeção central ou *pinhole*) em conjunto com a correção de distorções da lente. O modelo físico da refração (*raytracing*) será nomeado de **Refra**.

A tabela 20 tem o objetivo compilar os casos de uso de calibração e medição no ar e na água e as técnicas utilizadas. Deve-se notar que a medição na água com uma calibração no ar sem qualquer compensação é considerada inviável no presente trabalho, uma vez que os erros obtidos são muito grandes. Como exemplo desse caso de uso, mediu-se a face do manequim, o resultado pode ser visto na seção 6.10.1.

Tabela 20 – Compilação dos casos de uso e das técnicas de calibração utilizadas.

Caso	Calibração		Medição Meio	Restrições
	Meio	Tipo		
1	Ar	SVP	Ar	Nenhuma
2			Água	Inviável (ver seção 6.10.1)
3	Água	SVP	Água	Depende de fatores como o ângulo de visão (ver seção 3.4.4)
4		Refra		Nenhuma

5.4.1 Padrão de calibração da câmera

Para a calibração das câmeras no ar utilizou-se um padrão do tipo tabuleiro de xadrez (Figura 90). Já para as imagens na água, foi utilizada uma versão do padrão plastificada. Os padrões possuem 15×10 retângulos (direções X e Y), cuja dimensão foi medida com o auxílio de um microscópio. Os valores médios obtidos para a coordenada X e Y foram, respectivamente, de $9,968 \pm 0,032$ mm e $10,002 \pm 0,018$ mm. Optou-se pelo uso desse tipo de padrão por ser um método típico de calibração, de fácil reprodução e com bibliotecas disponíveis *online* para seu processamento.

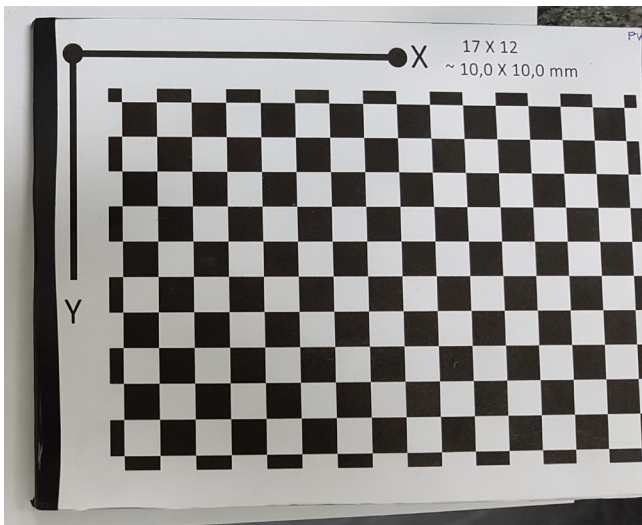


Figura 90 – Padrão de calibração com 15×10 divisões com 10 mm de lado.

5.4.2 Calibração no ar (SVP)

Foram obtidas ao menos 30 imagens em posições aleatórias dentro e próximo ao volume de medição. Os parâmetros de calibração foram obtidos com a *toolbox* para Matlab de Bouguet disponível online (BOUGUET, 2013).

Para a definição do centro do volume de medição ($[0 \ 0 \ 0]^T$ em coordenadas do objeto), utilizou-se um padrão de círculos vazados, com sistema de coordenadas definido em seu centro por três círculos preenchidos. A distância entre círculos também foi medida em microscópio, e os valores para as direções X e Y foram, respectivamente, de: $8,018 \pm 0,079$ mm e $7,969 \pm 0,060$ mm. Nota-se uma incerteza maior na distância dos padrões de círculos do que a obtida no padrão de xadrez; todavia, a definição do centro de coordenadas do objeto serve apenas como referência de posicionamento e não influencia na capacidade de medição do sistema.

Foram adicionadas marcações nos entornos do padrão de círculos vazados que indicam um quadrado de lado 200 mm. O padrão foi então posicionado o mais próximo possível do sistema dentro do volume de interseção entre a projeção e o campo de visão das câmeras. Em sequência o padrão foi distanciado em 100 mm e essa pose foi adquirida pelo

sistema, definindo o sistema de coordenadas do objeto (SCO). A pose utilizada para a definição do SCO pode ser vista na figura 91.

Para a avaliação da calibração, são expostos os mapas de distorções das lentes, poses obtidas do padrão (extrínsecos de cada pose) e erros de reprojeção. O erro de reprojeção em cada imagem/pose é a diferença entre os pontos 2D identificados (no caso, pontos da grade do tabuleiro de xadrez) do ponto obtido a partir da projeção direta dos pontos 3D do padrão utilizando os dados extrínsecos para a determinada pose, assim como os intrínsecos da câmera e coeficientes de distorção obtidos durante a calibração.

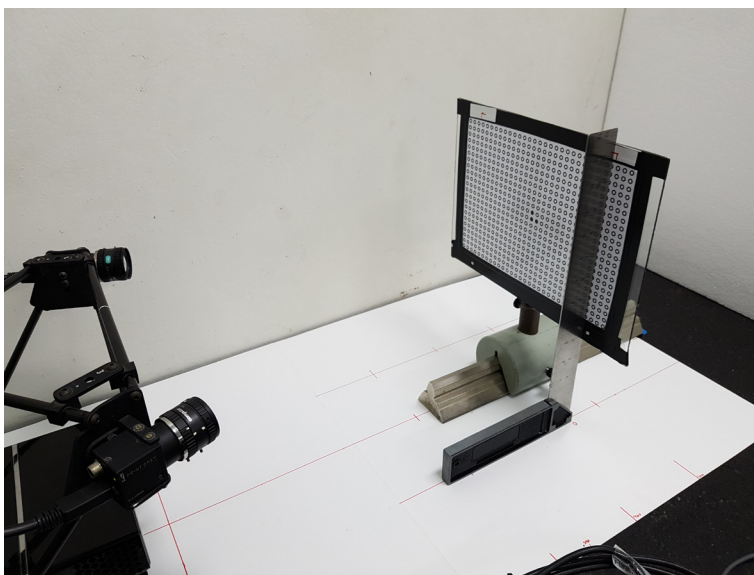


Figura 91 – Padrão de círculos durante definição do centro do volume de medição no ar.

5.4.3 Calibração na água (SVP)

Após a realização da calibração e medições no ar, posicionou-se o tanque na frente do sistema estéreo de forma que o eixo das lentes ficasse visivelmente normal à parede do tanque e a uma distância em torno de 1 mm. A figura 92 mostra em detalhe o posicionamento da parede do tanque com as lentes. Em sequência, antes das calibrações SVP e Refra

na água, extraiu-se a posição e orientação das câmeras em relação as janelas, conforme descrito no **Apêndice C**.

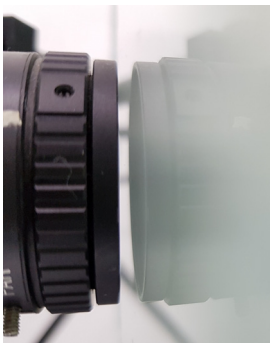


Figura 92 – Detalhe da distância da lente à parede do tanque.

O mesmo procedimento de calibração SVP no ar foi realizado na água com o intuito de comparar os resultados obtidos na água com a aproximação utilizando o modelo SVP e com a modelagem física da refração (Refra).

Utilizou-se água “da torneira” para encher o tanque. Após uma hora de estabilização e do sistema estéreo ligado, foram obtidas 24 imagens do padrão xadrez plastificado em diferentes poses, sendo sua maioria dentro do volume de medição. A movimentação da água não causou suspensão significativa de partículas ou quaisquer outros problemas nas imagens.

Imagens borradas ou com alguma parte do tabuleiro fora do campo de visão de uma das câmeras foram descartadas.

5.4.4 Calibração na água – parâmetros de refração (Refra)

Obtenção dos pontos 2D

Foram identificados os pontos 2D da grade do padrão nos pares de imagens obtidas. Em sequência, removeu-se a distorção dos pontos. Essas duas etapas foram realizadas com o método de identificação de pontos e com a função “normalize” da toolbox para MATLAB desenvolvida por Bouguet (BOUGUET, 2013).

Estimativa inicial e valores fixos dos parâmetros de refração

A tabela 21 lista a estimativa inicial dos parâmetros de refração. Foram definidos como fixos o índice de refração no ar e a espessura e índice de refração do vidro do tanque. O máximo ângulo de **A** em relação ao eixo Z do sistema de coordenadas de cada câmera (**A** \angle Z) foi definido como 10°. Sendo assim, a variação máxima dos valores nas coordenadas X e Y é de $\pm(\tan(10^\circ) = 0,1763)$. Para este caso, a coordenada Z de **A** é uma variável dependente de x e y . Por isso, na otimização, o valor de Z é calculado internamente na função custo, que é o resultado da normalização do vetor dado pelos valores $[x \ y \ 1]^T$.

Tabela 21 – Estimativa inicial e limites dos parâmetros de refração. Parâmetros a serem otimizados destacados em vermelho (**A**, d_0 , μ_2). Coordenadas **A** e distâncias d_i em milímetros.

Item	Símbolo	Câmeras (L e R)	Limite inferior	Limite superior
Eixo da câmera	A	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \pm 0,176 \\ \pm 0,176 \\ 1 \end{bmatrix}$ (normalizado)	
	A \angle Z	0,00°	0,00°	10,00°
Distância da interface	d_0	20,00	1,00	60,00
Espessura da parede do tanque	d_1	6,00 (nominal)	Constante	
Ind. ref. Ar	μ_0	1,0000	Constante	
Ind. ref. Vidro	μ_1	1,5200	Constante	
Ind. ref. Água	μ_2	1,3300	$\pm 0,0500$	

Minimização da função custo

Dentro da função custo, para o ajuste dos pontos 3D obtidos pela triangulação em relação aos do padrão, utilizou-se a função para MATLAB disponível online (JACOBSON, 2015), baseada no algoritmo de Horn (HORN, 1987). Após esse ajuste pode-se calcular a distância entre os pontos.

A função custo (descrita em 4.4) foi minimizada com auxílio da função de resolução de sistema não linear por mínimos quadrados “*lsqnonlin*” do MATLAB. Os limites inferiores e superiores são os já listados na tabela 21.

5.5 AVALIAÇÃO DO SISTEMA E MEDIÇÕES

Foram utilizados objetos não calibrados como exemplos de medição e objetos calibrados para a avaliação metrológica do sistema estéreo no ar e na água. Os procedimentos e objetos utilizados são descritos a seguir.

5.5.1 Avaliação com plano baseada na VDI/VDE 2634

Foram realizados três diferentes experimentos com o plano padrão: mesma posição no ar e água, deslocamentos controlados e posições aleatórias inclinadas. Devido à grande quantidade de dados a serem processados optou-se pela resolução de malha XY de 0,5 mm. De forma a avaliar se tal piora (o padrão é de 0,1 mm) na resolução XY teria efeito nos resultados, avaliou-se o histograma de erro de uma das medições com resolução de malha de 0,1 mm e 0,5 mm. Não foram encontradas alterações significativas nos valores de erro máximo, mínimo, médio e desvio padrão.

A medição dos planos segue as orientações da associação alemã de engenheiros (VDI)²⁰ presentes no guia para sistemas ópticos de medição 3D VDI/VDE 2634 (VDI/VDE-2634, 2008). A remoção dos piores pontos é realizada conforme o seguinte procedimento: ajusta-se um plano à nuvem de pontos; os pontos mais distantes (1 a cada 1000) são removidos.

Como padrão plano, utilizou-se um vidro espesso de uma “mesa” de microscópio, que tipicamente passa por um rígido processo de fabricação e possui erro de planeza muito pequeno. O vidro possui um formato circular com diâmetro e espessura, respectivamente, em torno de 205 mm e 10,2 mm, conforme ilustra a figura 93. Ele foi medido em uma

²⁰ Site da associação alemã de engenheiros VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*): <http://www.vdi.eu> responsável pelo guia VDI/VDE 2634.

máquina de medir por coordenadas (MMC) Mitutoyo na fundação CERTI antes e após pintura branca fosca com spray, a respectiva planeza obtida foi de $3\ \mu\text{m}$ (próprio erro da máquina) e $28\ \mu\text{m}$ ($0,028\ \text{mm}$). Para facilitar seu posicionamento durante os ensaios, o mesmo foi fixado em um suporte (Figura 94).

Conforme descrito anteriormente, a planeza do plano obtida com a MMC foi de $28\ \mu\text{m}$. Nas análises realizadas, o erro foi calculado com base na distância dos pontos medidos à um plano matemático ajustado aos mesmos, sendo o erro de planeza considerado desprezível.



Figura 93 – Padrão plano de vidro de microscópio antes e após pintura, com respectivo erro de planeza de $3\ \mu\text{m}$ e $28\ \mu\text{m}$. Diâmetro e espessura, respectivamente, em torno de $205\ \text{mm}$ e $10,2\ \text{mm}$.

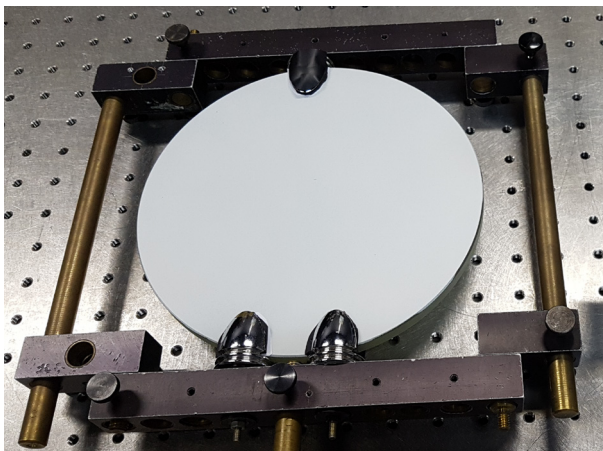


Figura 94 – Padrão plano (planeza 0,028 mm) fixo em suporte para facilitar a realização das medições em diferentes posições.

5.5.2 Avaliação com par de esferas baseada na VDI/VDE 2634

Para a avaliação da incerteza de medição do sistema, também tomou-se como base as orientações do guia para sistemas ópticos de medição 3D VDI/VDE 2634 (VDI/VDE-2634, 2008). Conforme descrito no documento, o par de esferas deve ter a distância entre centros (L_p) das esferas e seus respectivos diâmetros (D_p) calibrados com incerteza menor ou igual a 1/5 do erro a ser avaliado.

São avaliados dois parâmetros, o erro de espaçamento entre as esferas ou *sphere-spacing error* (*SSE*) e o erro de “apalpação”, ou *probing error* (*PE*), relacionados respectivamente ao erro de escala do sistema (erro sistemático) e ao erro aleatório. Para tal avaliação, deve-se medir o padrão de esferas em (ao menos) sete diferentes posições, ilustradas na figura 95. A seguir, descreve-se os procedimentos adotados para a avaliação dos dois parâmetros de erro.

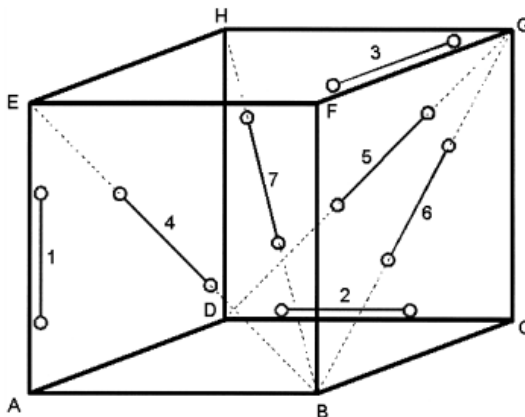


Figura 95 – Posições sugeridas pelo VDI/VDE 2634 (VDI/VDE-2634, 2008).

1. Erro de espaçamento entre esferas, ou *sphere-spacing error (SSE)*

- O raio das esferas deve ser fixo conforme sua calibração.
- Pode-se remover os três piores pontos (maior erro) a cada mil pontos.
- A posição do centro é definida pelo ajuste de uma esfera com o raio padrão utilizando mínimos quadrados.
- L_p é obtido pela distância dos centros das esferas ajustadas.
- O *SSE* é dado pela diferença entre o valor obtido e o calibrado.
- Se o erro máximo permitido é excedido em apenas uma medição, essa medição pode ser repetida uma vez.

2. Erro de apalpação ou *probing error (PE)*

- O erro de apalpação é a diferença radial entre os pontos 3D medidos e o raio de uma esfera ajustada matematicamente aos pontos medidos.
- Quando indicado como um único valor, *PE* é dado pela soma dos valores absolutos mínimo e máximo (distância pico-vale).

O padrão de esferas foi montado soldando esferas de metal duro disponíveis no laboratório em parafusos presos num perfil de alumínio. A origem das esferas não é conhecida, mas são provavelmente provenientes de um rolamento. Após a montagem as esferas foram pintadas de branco.

A figura 96 mostra o par de esferas durante sua calibração, onde foram realizados três ciclos de medição de 13 pontos em cada esfera. A calibração foi realizada na mesma MMC que mediu o padrão plano. Como resultado, obteve-se o diâmetro médio (D_{p1} e D_{p2}) e o erro de forma de cada esfera, assim como a distância entre centros (L_p). Estes valores estão no esquemático da figura 97 e compilados na tabela 22. Nota-se um erro de forma considerável nas esferas, provavelmente relacionado a pintura.

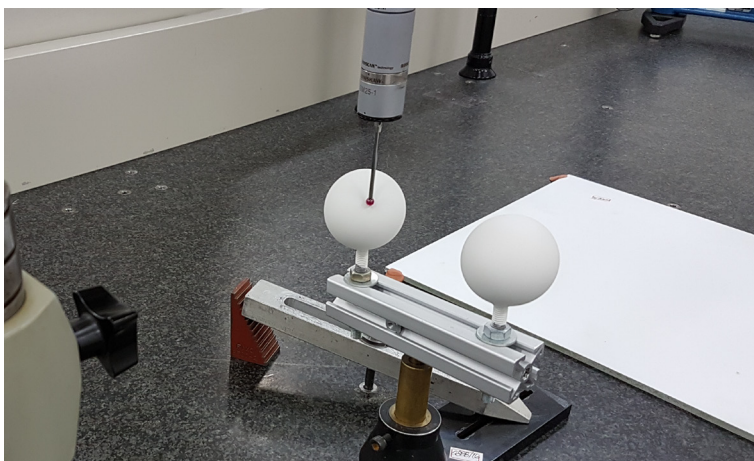


Figura 96 – Par de esferas de aço durante calibração em máquina de medir por coordenadas da Mitutoyo na Fundação CERTI. Foram obtidos 13 pontos em cada esfera e realizados três ciclos de medição.

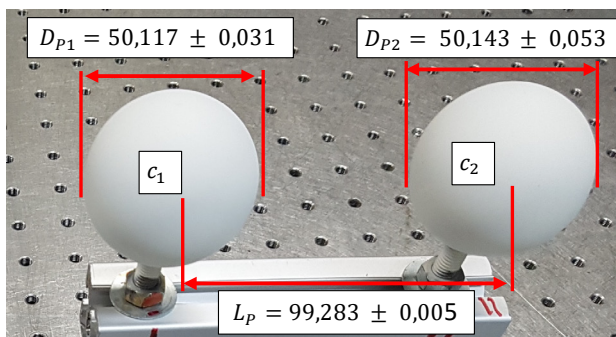


Figura 97 – Padrão de par de esferas, indicação da distância entre centros (L_p) e diâmetro (D_p).

Tabela 22 – Dimensões calibradas do par de esferas.

Item	Símbolo	Valor [mm]
Esfera 1	D_{p1}	$50,117 \pm 0,031$
Esfera 2	D_{p2}	$50,143 \pm 0,053$
Distância entre centros	L_p	$99,283 \pm 0,005$

5.5.3 Avaliação com objetos de forma complexa calibrados

Além da avaliação do sistema com objetos “clássicos” padrão (par de esferas e plano), realizou-se a medição dos dois objetos de forma complexa calibrados: cabeça de manequim e cavidade preenchida com cordões de solda.

Cabeça de manequim

A cabeça de manequim é um bom exemplo de superfície livre com forma complexa. Ela foi calibrada (Figura 98) utilizando um sistema óptico estéreo ativo com projeção de franjas comercial GOM ATOS (GOM, 2015) em laboratório da Fundação CERTI. Os alvos que podem ser vistos colados na cabeça de manequim são para que o sistema ATOS concatene medições em diferentes regiões da peça, que foi medida por completo. O erro máximo especificado é da ordem de $\pm 0,03$ mm, suficiente para a avaliação do sistema estéreo descrito na presente tese. A medição de referência obtida pode ser vista na figura 99.

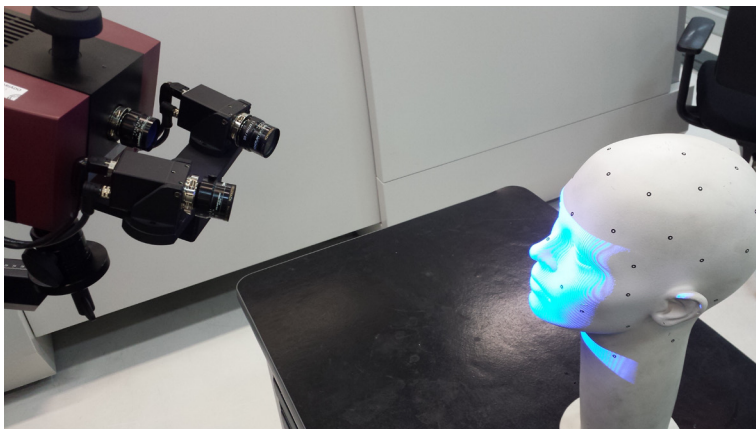


Figura 98 – Cabeça de manequim durante calibração com sistema GOM ATOS (GOM, 2015) em laboratório da Fundação CERTI.

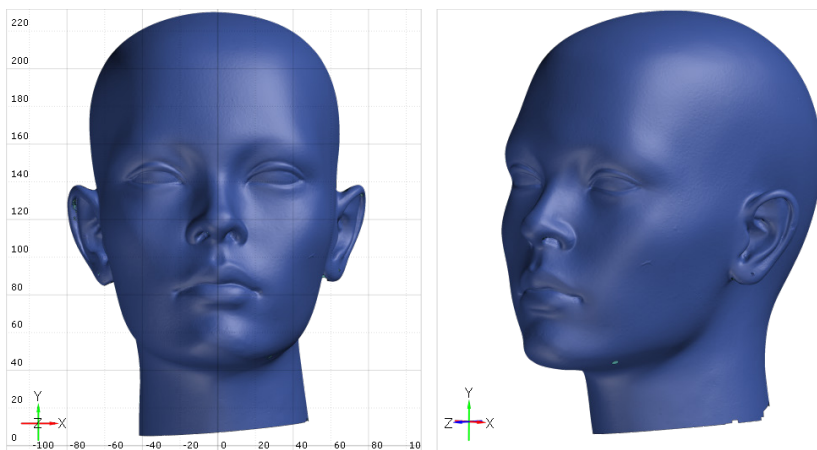


Figura 99 – Resultado da medição de referência (calibração) da cabeça de manequim com o sistema GOM ATOS.

Placa com cavidade preenchida com cordões de solda

Essa peça é uma réplica de um trecho de pá de turbina hidráulica de grande porte a qual possuía uma região usinada simulando a cavidade decorrente da perda de material devido à cavitação. Essa cavidade na peça foi preenchida com cordões de solda por um robô durante testes de

deposição de soldagem no projeto RoboTurb²¹. A placa também foi calibrada com o sistema GOM ATOS.



Figura 100 – Réplica de parte de região cavitada de pá de turbina hidráulica preenchida com cordões de solda.

5.5.4 *Objetos não calibrados (exemplos de medição)*

A título de exemplo de possíveis aplicações da técnica de medição através de superfícies planas de refração, realizou-se a medição em meio

²¹ “O RoboTurb é um sistema automatizado, desenvolvido em conjunto pela UFSC, o LACTEC, a COPEL e FURNAS, capaz de realizar “in situ” a recuperação de superfícies erodidas por cavitação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte”. Texto do site: <http://robotica.ufsc.br/roboturb>.

subaquático de uma seção de tubo PVC de 305 mm (12") de diâmetro e de um riser de 152 mm (6") de diâmetro.

5.6 VISUALIZAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A visualização das nuvens de pontos, planos e esferas ajustadas foi realizada tanto no MATLAB quanto no *software* GOM Inspect 2016 (versão gratuita²²). Para uma melhor visualização do resultado de medição, foram geradas superfícies/malhas a partir das nuvens de pontos obtidas. Esse procedimento foi realizado no *software* GOM Inspect. A figura 101 mostra a nuvem de pontos e superfície resultante da medição da face da cabeça de manequim.

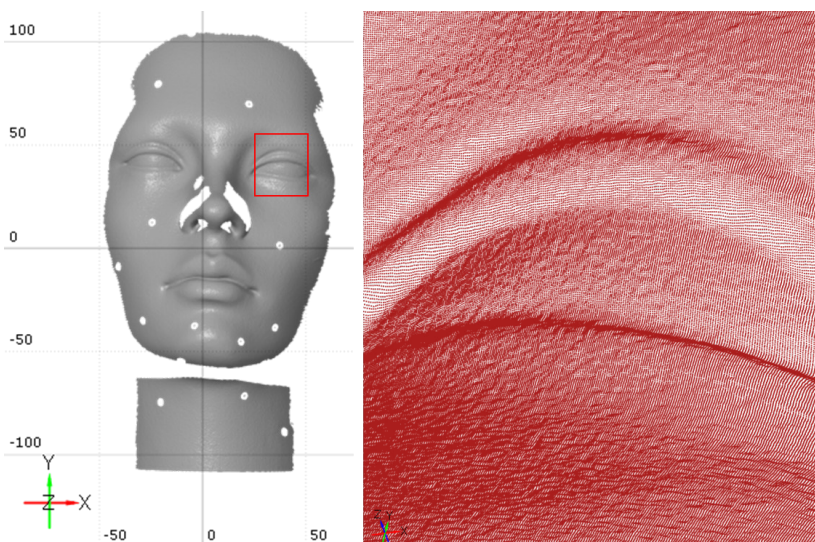


Figura 101 – Exemplo de superfície obtida e detalhe da nuvem de pontos da medição da face de um manequim no ar com a resolução padrão do sistema $0,1 \times 0,1 \times 0,01 \text{ mm}^3$.

A comparação dos resultados de medição de objetos de forma complexa calibrados é realizada também com auxílio do *software* GOM Inspect. Para tal, a malha obtida é alinhada com a medição de referência

²² Link para baixar o *software* GOM Inspect <https://support.gom.com/display/SOFTWARE/>.

e a distância normal (desvio ou erro) da malha à referência é computada. O resultado é apresentado na forma de um mapa de cores (relacionadas ao valor desvio) sobre a superfície de referência. Os valores máximos e mínimos foram ajustados manualmente para uma melhor visualização do resultado obtido. Ao lado do mapa de cores existe um histograma dos desvios. O *software* também fornece o desvio padrão dos erros mostrados no mapa de desvio.

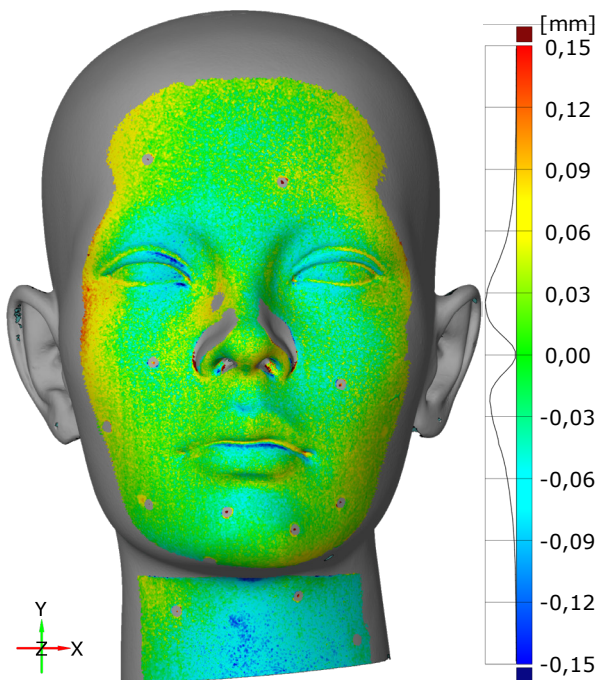


Figura 102 – Exemplo de mapa de desvios. Medição de referência do objeto é colorida conforme os desvios em relação à medição sendo avaliada. Note o histograma de desvios ao lado da escala do mapa de cores e sistema de coordenadas no canto inferior esquerdo.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais aqui descritos foram realizados conforme os procedimentos listados no capítulo anterior. Foram realizadas medições no ar com o modelo SVP, e na água, com a aproximação dos efeitos da refração por SVP e com a modelagem física da refração (Refra).

Durante os experimentos, a temperatura do ar foi de (23 ± 2) °C e da água de (21 ± 2) °C.

6.1 IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO PARA A MEDIÇÃO

O cálculo da nuvem de pontos foi inicialmente feito com *scripts* em MATLAB, uma vez que é uma interface comumente utilizada no meio científico, com diversas funções prontas e grande facilidades para o uso de matrizes. Em sequência, visto a necessidade de redução do tempo de processamento, o código foi convertido para o C++, obtendo-se uma grande redução no tempo de processamento.

Durante o desenvolvimento, a verificação do *Algoritmo Iterativo para a Projeção Através de Interfaces Planas de Refração (IteraProjRefra)* foi realizada conforme os seguintes passos: Projeção inversa de pontos na imagem. Seleção de um ponto qualquer do feixe na última interface. Projeção direta utilizando o método a ser testado. Cálculo da diferença entre o ponto projetado e o originalmente utilizado para a projeção inversa. O erro obtido foi desprezível ($< 1E-8$ mm) para pontos 2D simulados em toda região da imagem.

6.1.1 Código inicial em MATLAB

Como dito anteriormente, (AGRAWAL et al., 2012) mostra que a projeção direta através de duas interfaces planas de refração com (três) meios com índice de refração diferentes resulta numa equação de ordem 12. O artigo publicado por Agrawal possui material extra com uma função em MATLAB que resolve essa equação, assim como um código que verifica seu resultado. Sendo assim, o *ZScan2* foi alterado para utilizar este método de projeção direta considerando a refração ao invés da simples projeção no ar, podendo-se assim obter os primeiros resultados e

validar a triangulação inversa através de interfaces planas de refração. Em sequência, o *Algoritmo Iterativo para a Projeção Através de Interfaces Planas de Refração (IteraProjRefra)* foi desenvolvido. Mesmo sendo um algoritmo iterativo, para o caso de três meios, é em torno de três vezes mais rápido no MATLAB do que a solução direta por polinômio. Ambas as funções foram vetorizadas. Durante os testes, o *IteraProjRefra* convergiu em 5 ± 3 iterações para uma tolerância de erro 3D de 0,001 mm. Se comparado à aproximação por SVP, pode-se considerar que o método possui um alto custo computacional, uma vez que calcula o caminho óptico da luz através das interfaces de refração, ao invés de uma simples reta, que é o caso da aproximação SVP na água. O tempo de processamento do método ficou em torno de 15 vezes maior do que a aproximação por SVP.

6.1.2 Otimização do código (C++) e avaliação da performance

Devido ao uso intenso de matrizes e vetores nos algoritmos, optou-se pela utilização da biblioteca de álgebra para C++ Eigen^{23, 24}. Esta biblioteca facilita a conversão do código feito em MATLAB para C++.

O algoritmo iterativo de projeção (*IteraProjRefra*) que inclui a projeção inversa (*InvProjRefra*) foi convertido para C++. Para chamar essa função em C++ dentro do ZScan no MATLAB, foi necessário criar uma função de interface²⁵. Como a projeção direta (*IteraProjRefra*) é a parte de maior demanda computacional no processamento, esta conversão foi a que resultou no maior ganho de velocidade²⁶, que foi de oito vezes. Em sequência, o restante do código também foi convertido para o C++, reduzindo o tempo em mais de seis vezes. Por fim, em comparação ao código original em MATLAB, o ganho acumulado de velocidade foi de 48 vezes. Estes dados são compilados na tabela 23. Com isto, o tempo de processamento de uma medição típica passou de mais de

²³ Eigen - biblioteca em C++ para álgebra linear: <http://eigen.tuxfamily.org>.

²⁴ Guia rápido para o Eigen e relação Eigen/MATLAB: <http://eigen.tuxfamily.org/dox/AsciiQuickReference.txt>

²⁵ Utilizou-se a função *mexFunction*, mais detalhes em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/apiref/mexfunction.html>.

²⁶ Testes de processamento realizados em um computador com as seguintes especificações: processador Intel i7 4770 @ 3,4 GHz; RAM 8 GB; placa de vídeo NVIDIA GTX 770; Windows 10 64 bits.

6 horas para menos de 10 minutos, sendo que o processamento de regiões menores ou com uma resolução XY mais grosseira (por ex.: 1 mm ao invés de 0,1 mm), o tempo de processamento cai exponencialmente (100 vezes mais rápido).

Tabela 23 – Avaliação do tempo de processamento para uma medição típica (face de manequim) com resoluções em XYZ de $(0,1 \times 0,1 \times 0,01)$ mm, obtendo aproximadamente 18.400 pontos.

Caso	ZScan2	IteraProjRefra	Tempo²⁶ hh:mm	Ganho de velocidade
1	MATLAB	MATLAB	06:20	-
2	MATLAB	C++	00:46	8× (em relação ao caso 1)
3	C++	C++	00:08	6× (em relação ao caso 2)
Total				48×

6.1.3 Interface final (Labview)

Após o desenvolvimento do código em C++, criou-se uma interface em Labview (Figura 103) que chama os métodos em MATLAB e C++. Esta interface facilita a seleção do volume e resolução da medição, local dos arquivos de origem e seleção entre processamento para testes (caso 1, 2 ou 3 da tabela 23). Como a integração Labview/MATLAB é muito simples, optou-se por manter a chamada em C++ dentro do *script* em MATLAB.

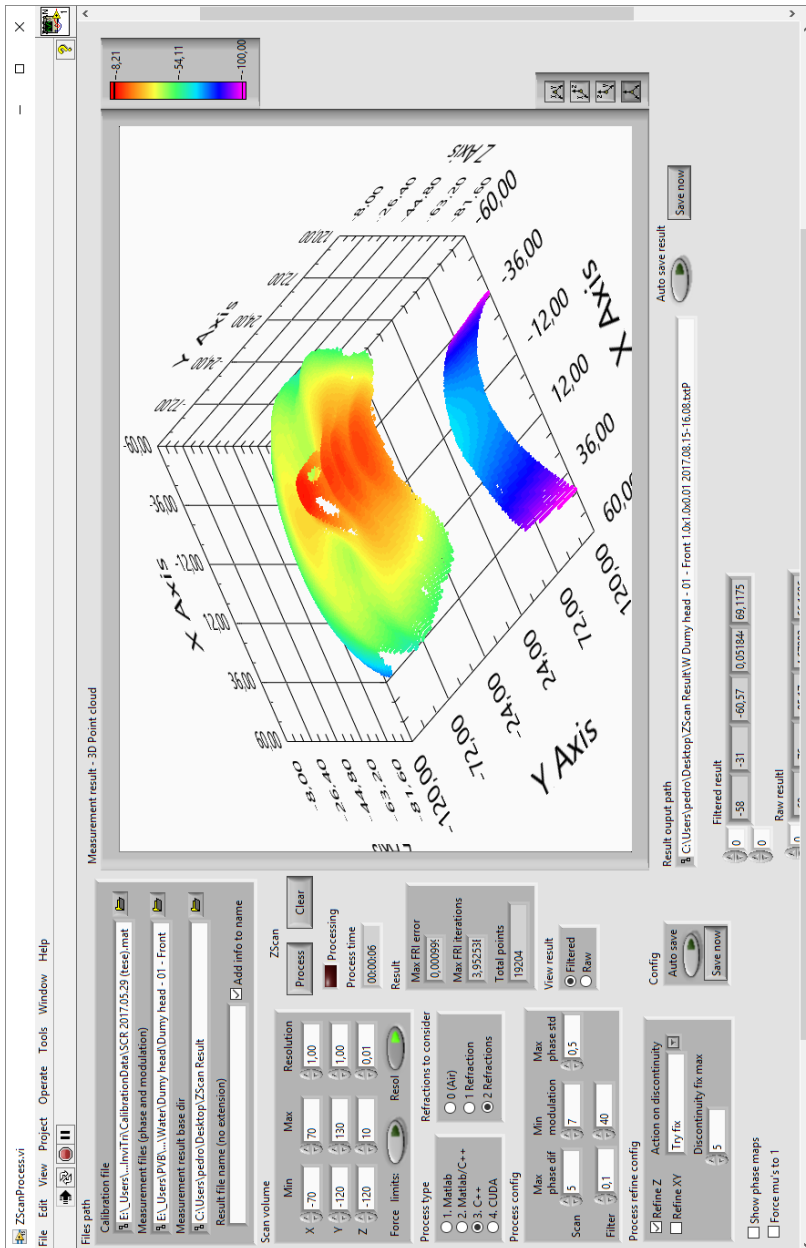


Figura 103 – Interface do software desenvolvido na tese no Labview.

6.2 CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS NO AR (SVP)

A seguir descreve-se o processo de aquisição das imagens e do resultado de calibração obtido.

6.2.1 Aquisição das imagens

Foram adquiridas imagens dentro do campo de visão simultâneo das duas câmeras. Isto foi feito com o intuito de realizar uma otimização estéreo da calibração, onde existe a restrição de que a posição relativa entre as câmeras é fixa. Foram aproveitadas 24 imagens de 32 adquiridas. Exemplos de imagens obtidas pelo sistema e pela câmera auxiliar central podem ser vistos na figura 104.

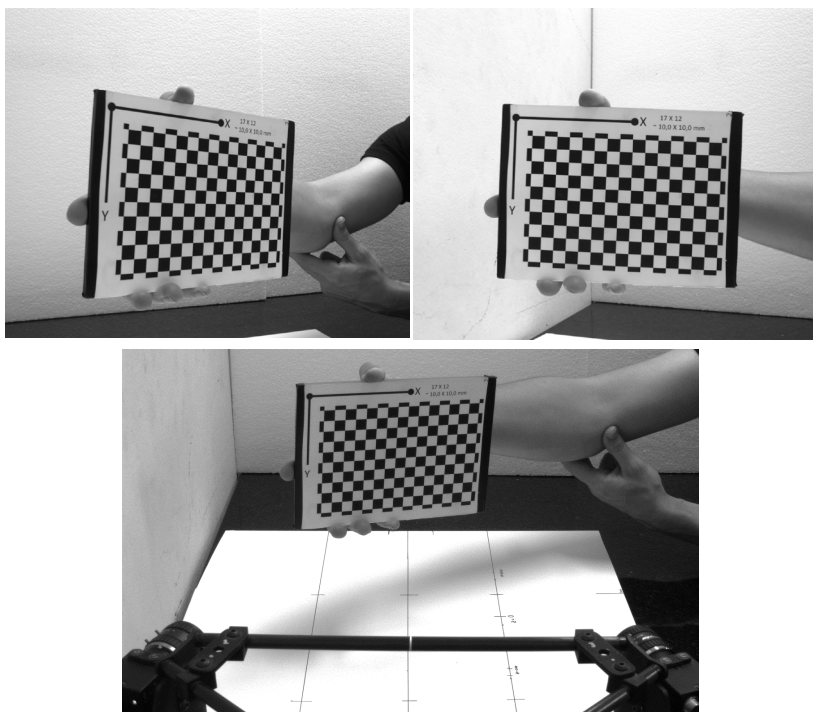


Figura 104 – Uma das aquisições do padrão tipo xadrez durante a calibração no ar. Imagem da câmera esquerda, direita e auxiliar.

6.2.2 Parâmetros obtidos

Realizou-se a calibração individual das câmeras e, na sequência, uma otimização estéreo. A tabela 24 lista os parâmetros intrínsecos das câmeras. Os valores estão em pixel, mas pode-se converter os dados para milímetros multiplicando pelo tamanho do pixel ($4,4 \mu\text{m}$). O comprimento focal obtido em milímetros está próximo do nominal da lente (8 mm), conforme era esperado. A matriz de transformação do sistema de coordenadas da câmera (SCC) esquerda para a direita (Rt_{LR}) é exposta na tabela 25. A distância obtida entre os centros de projeção das câmeras foi de ~ 275 mm.

Tabela 24 – Parâmetros intrínsecos da câmera e de distorção da lente obtidos na calibração no ar.

Item	Câmera esquerda (L)		Câmera esquerda (R)	
Dist. focal	$f_L = \begin{bmatrix} 1.892,35 \\ 1.894,50 \end{bmatrix}$		$f_R = \begin{bmatrix} 1.896,32 \\ 1.897,10 \end{bmatrix}$	
	Distância focal média: 8,36 mm		Distância focal média: 8,35 mm	
Centro	$\mathbf{c}_L = \begin{bmatrix} 804,24 \\ 593,74 \end{bmatrix}$		$\mathbf{c}_R = \begin{bmatrix} 794,04 \\ 611,04 \end{bmatrix}$	
Matriz	$K_L = \begin{bmatrix} 1.892,35 & 0 & 804,24 \\ 0 & 1.894,50 & 593,74 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		$K_R = \begin{bmatrix} 1.896,32 & 0 & 794,04 \\ 0 & 1.897,10 & 611,04 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Distorção	k_1	$-9,757 \times 10^{-2}$	k_1	$-9,594 \times 10^{-2}$
	k_2	$1,811 \times 10^{-1}$	k_2	$1,533 \times 10^{-1}$
	ξ_2	$-2,687 \times 10^{-3}$	ξ_2	$-8,807 \times 10^{-3}$
	ξ_1	$-1,281 \times 10^{-3}$	ξ_1	$-2,209 \times 10^{-3}$
	k_3	0	k_3	0

Tabela 25 – Relação estéreo – rotação e translação do sistema de coordenadas da câmera esquerda para a direita. Valores em milímetros.

Item	Câmera esquerda para a direita
Rotação	$R_{LR} = \begin{bmatrix} 0,7558 & 0,0196 & 0,6545 \\ -0,0111 & 0,9998 & -0,0171 \\ -0,6547 & 0,0056 & 0,7559 \end{bmatrix}$
Translação	$\mathbf{t}_{LR} = \begin{bmatrix} -256,81 \\ 1,89 \\ 97,38 \end{bmatrix}$
Distância	$\ \mathbf{t}_{LR}\ = 274,66$

Após a calibração do sistema estéreo definiu-se a matriz de transformação do SCO para o SCC esquerda (Rt_L) com os parâmetros extrínsecos da imagem do padrão de círculos vazados obtida pela câmera esquerda (Figura 91). A matriz de transformação do SCO para o SCC direita (Rt_R) pode ser obtida pela multiplicação: $Rt_R = Rt_{LR}Rt_L$. A tabela 26 expõe os parâmetros obtidos.

Tabela 26 - Parâmetros extrínsecos – calibração no ar. Valores em milímetros.

Câmera esquerda (L)	Câmera esquerda (R)
$R_L = \begin{bmatrix} 0,9345 & -0,0105 & 0,3558 \\ -0,0075 & -0,9999 & -0,0099 \\ 0,3559 & 0,0066 & -0,9345 \end{bmatrix}$	$R_R = \begin{bmatrix} 0,9391 & -0,0233 & -0,3429 \\ -0,0240 & -0,9997 & 0,0021 \\ -0,3429 & 0,0062 & -0,9394 \end{bmatrix}$
$\mathbf{t}_L = \begin{bmatrix} -21,28 \\ 7,99 \\ 450,35 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t}_R = \begin{bmatrix} 22,02 \\ 2,42 \\ 451,75 \end{bmatrix}$
$\ \mathbf{t}_L\ = 450,92$	$\ \mathbf{t}_R\ = 452,29$

A figura 105 expõe os mapas de distorção radial e tangencial obtidos para a câmera esquerda. O mapa de distorção completo pode ser visto na figura 106. A câmera direita possui mapa de distorção similar.

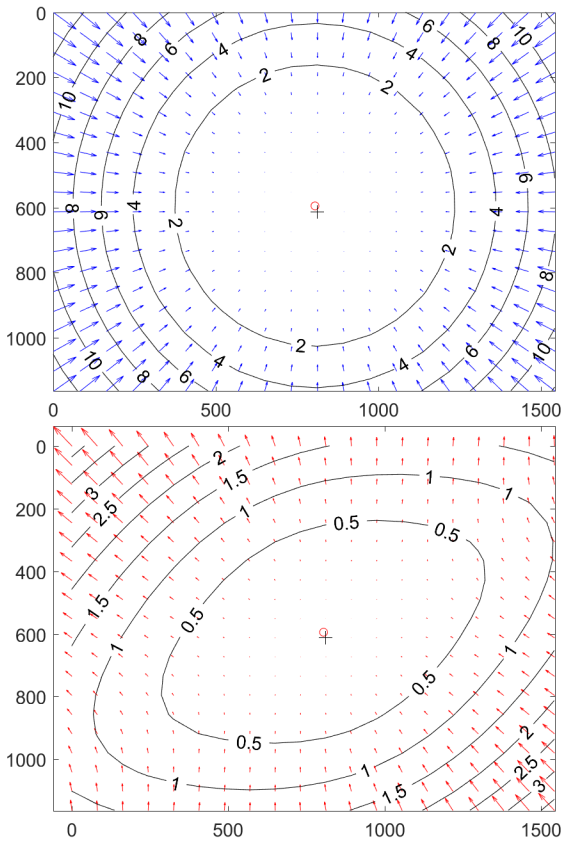


Figura 105 – Mapa de distorção radial e tangencial da calibração SVP no ar para a câmera esquerda. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.

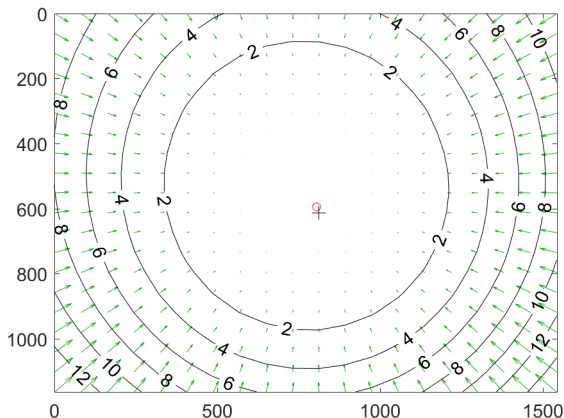


Figura 106 – Mapa de distorção completo da calibração SVP no ar da câmera esquerda. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.

6.2.3 Erro de reprojeção

A figura 107 mostra o erro de reprojeção²⁷ das câmeras esquerda e direita. As poses obtidas do padrão de calibração são expostas na figura 108, sendo que o cubo representa o volume de medição no ar.

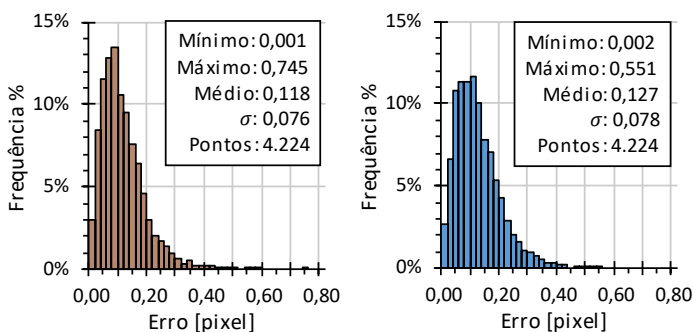


Figura 107 – Histograma relativo (%) do erro de reprojeção (em pixel) da calibração no ar para a câmera da esquerda (L) e direita (R) antes da otimização estéreo.

²⁷ Erro de reprojeção é a diferença dos pontos 3D do padrão projetados com os dados de calibração obtidos em relação aos pontos 2D identificados na imagem, conforme descrito em 5.4.2.

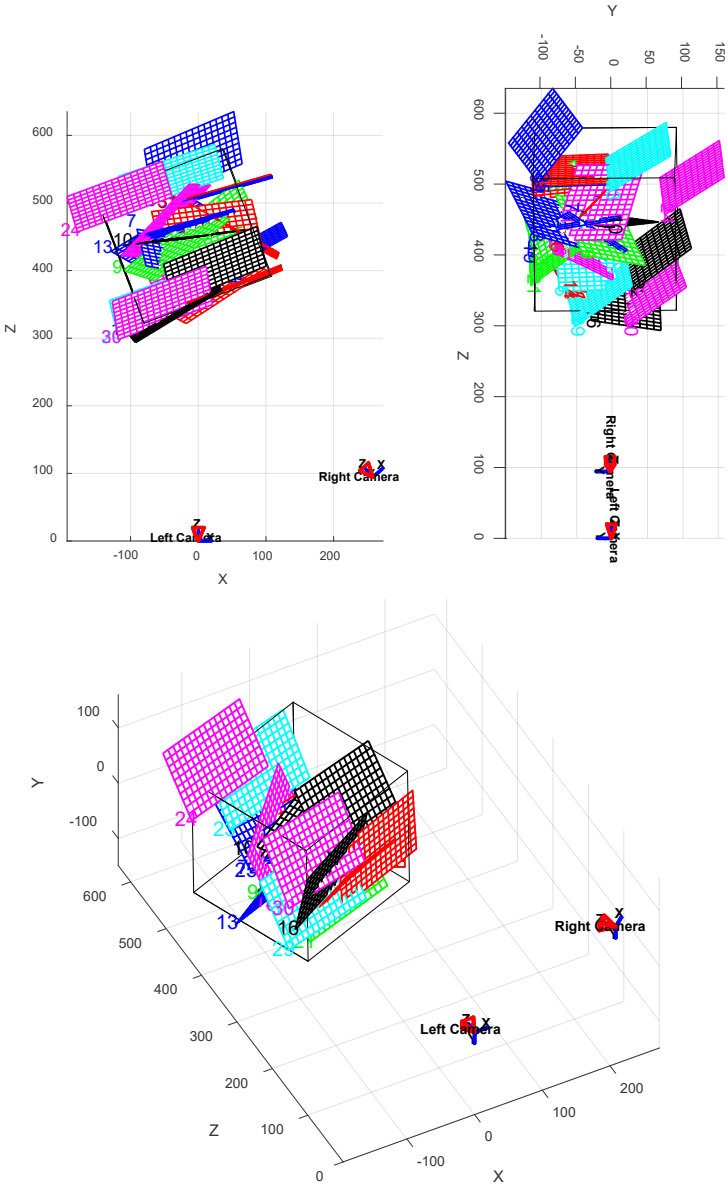


Figura 108 – Vista superior, lateral e perspectiva das poses calculadas do padrão após calibração SVP no ar. Cubo de lado 200 mm representa o volume de medição. Sistema de coordenadas da câmera esquerda.

6.3 CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS NA ÁGUA (SVP)

Foram utilizadas as 20 melhores imagens de 24 adquiridas em diferentes poses do padrão dentro do tanque. A figura 109 ilustra as imagens obtidas durante uma das poses adquiridas na água do padrão plastificado tipo tabuleiro de xadrez.

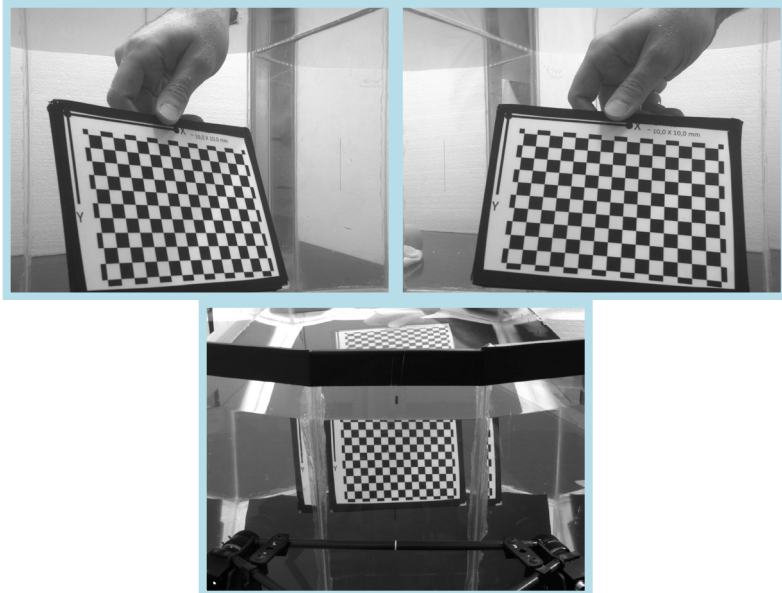


Figura 109 – Imagens obtida pelo sistema e pela terceira câmera durante calibração SVP na água.

6.3.1 Parâmetros obtidos

A tabela 24 lista os parâmetros intrínsecos obtidos. Os valores estão em pixel, mas assim como na calibração no ar, pode-se converter os dados para milímetros multiplicando pelo tamanho do pixel ($4,4 \mu\text{m}$). A relação entre os sistemas de coordenadas das câmeras após a otimização estéreo pode ser vista na tabela 29. A transformação do SCO para o SCC esquerda foi definida como a mesma que no ar. A tabela 28 expõe os parâmetros extrínsecos das câmeras.

Tabela 27 – Parâmetros intrínsecos da câmera e de distorção da lente obtidos na calibração na água.

Item	Câmera esquerda (L)	Câmera esquerda (R)		
Comp. focal	$f_L = \begin{bmatrix} 2532,21 \\ 2534,70 \end{bmatrix}$	$f_R = \begin{bmatrix} 2533,92 \\ 2537,52 \end{bmatrix}$		
	Distância focal média: 11,15 mm	Distância focal média: 11,16 mm		
Centro	$\mathbf{c}_L = \begin{bmatrix} 833,66 \\ 624,25 \end{bmatrix}$	$\mathbf{c}_R = \begin{bmatrix} 821,62 \\ 625,63 \end{bmatrix}$		
Matriz completa	$K_L = \begin{bmatrix} 2532,21 & 0 & 833,66 \\ 0 & 2534,70 & 624,25 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$K_R = \begin{bmatrix} 2533,92 & 0 & 821,62 \\ 0 & 2537,52 & 625,63 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
Distorção	k_1	1,976E-1	k_1	1,931E-1
	k_2	5,332E-1	k_2	7,126E-1
	ξ_2	3,980E-3	ξ_2	1,270E-3
	ξ_1	7,182E-3	ξ_1	5,157E-3
	k_3	0	k_3	0

Tabela 28 – Relação estéreo – rotação e translação (Rt_{LR}) do sistema de coordenadas da câmera esquerda para a direita para a calibração SVP na água. Valores em milímetros.

Item	Câmera esquerda para a direita
Rotação	$R_{LR} = \begin{bmatrix} 0,7559 & 0,0121 & 0,6546 \\ -0,0068 & 0,9999 & -0,0106 \\ -0,6546 & 0,0035 & 0,7559 \end{bmatrix}$
Translação	$\mathbf{t}_{LR} = \begin{bmatrix} -260,79 \\ 1,29 \\ 96,02 \end{bmatrix}$
Distância	$\ \mathbf{t}_{LR}\ = 277,91$

Tabela 29 - Parâmetros extrínsecos – calibração na água. Valores em milímetros.

Câmera esquerda (L) (forçado mesmo que no ar)	Câmera esquerda (R) $Rt_R = Rt_{LR}Rt_L$
$R_L =$ $\begin{bmatrix} 0,9345 & -0,0105 & 0,3558 \\ -0,0075 & -0,9999 & -0,0099 \\ 0,3559 & 0,0066 & -0,9345 \end{bmatrix}$	$R_R =$ $\begin{bmatrix} 0,9393 & -0,0157 & -0,3428 \\ -0,0176 & -0,9998 & -0,0024 \\ -0,3427 & 0,0083 & -0,9394 \end{bmatrix}$
$t_L = \begin{bmatrix} -21,28 \\ 7,99 \\ 450,35 \end{bmatrix}$	$t_R = \begin{bmatrix} 18,00 \\ 4,66 \\ 450,42 \end{bmatrix}$
$\ t_L\ = 450,92$	$\ t_R\ = 450,80$

A figura 110 expõe os mapas de distorção radial e tangencial obtidos. O mapa de distorção completo pode ser visto na figura 111.

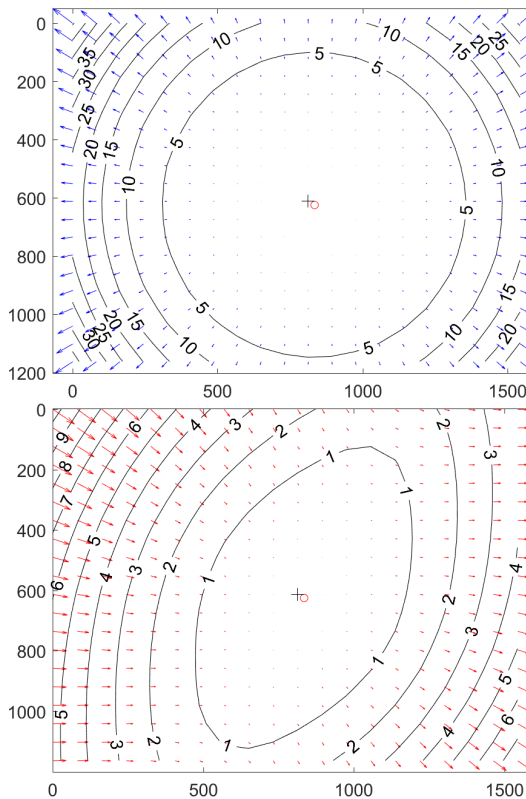


Figura 110 – Mapa de distorção radial e tangencial da calibração SVP na água. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.

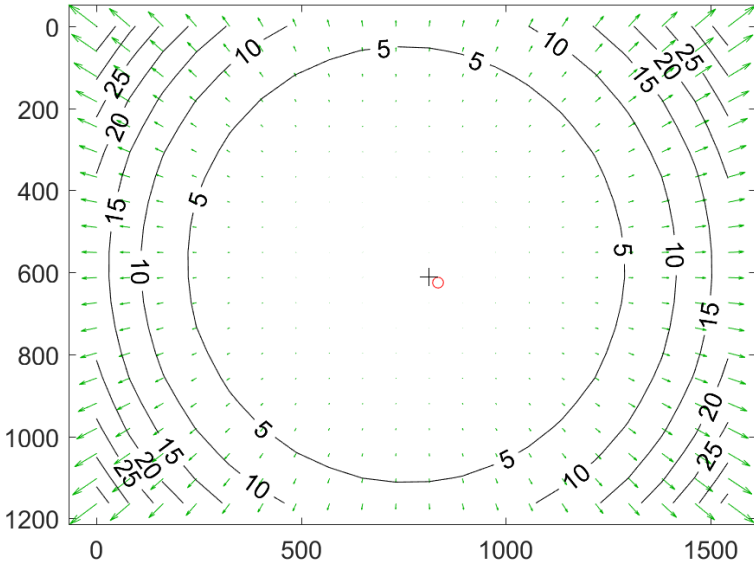


Figura 111 – Mapa de distorção completo da calibração SVP na água. Sendo “o” o centro obtido na calibração e “+” o centro da imagem.

6.3.2 Relação com a calibração no ar

A tabela 30 compara alguns dos parâmetros obtidos com a calibração SVP realizada no ar e na água. É interessante notar que a distância focal média obtida na água (11,16 mm) é em torno de 1,33 (33%) maior do que o no ar (8,36 mm), valor o qual está relacionado com a relação do índice de refração no ar e na água. Os parâmetros de distorção variam relativamente mais e, conforme mostrado em (KANG; WU; YANG, 2012), possuem influência muito significativa na compensação da refração utilizando o modelo SVP.

Tabela 30 – Comparação entre calibração SVP obtida no ar e na água.

Item	Símbolo	Ar	Água	Relação	Variação
Distância focal L	f_L	8,36 mm	11,15 mm	/	1,33340
Distância focal R	f_R	8,35 mm	11,16 mm	/	1,33619
Distância câmeras	t_{LR}	274,66 mm	277,91 mm	–	3,25 mm
Distorção esquerda [pixel]	k_1	-9,757E-02	1,976E-01	%	-303%
	k_2	1,811E-01	5,332E-01	%	194%
	ξ_2	-2,687E-03	3,980E-03	%	-248%
	ξ_1	-1,281E-03	7,182E-03	%	-661%
	k_3	0	0	%	0%

6.3.3 Comparação da correção da distorção

Na figura 112 pode-se notar a grande diferença entre os mapas de distorção obtidos no ar e na água. Já a figura 113 mostra a diferença visual antes e após a correção da distorção no ar e na água utilizando as calibrações obtidas no ar e na água. Nota-se bordas na imagem obtida na água com correção de distorção dos parâmetros na água (Água / Água). No detalhe (regiões pontilhadas) nas imagens nota-se que, aparentemente, ocorre uma boa compensação da distorção devido a refração com os parâmetros obtidos na água, já que os círculos ficam mais alinhados com a linha de referência traçada. No entanto, deve-se lembrar que essa compensação nem sempre é suficiente, uma vez que a distorção devido a refração é uma distorção 3D, que depende da distância do objeto, e não 2D, conforme descrito na seção 3.4.

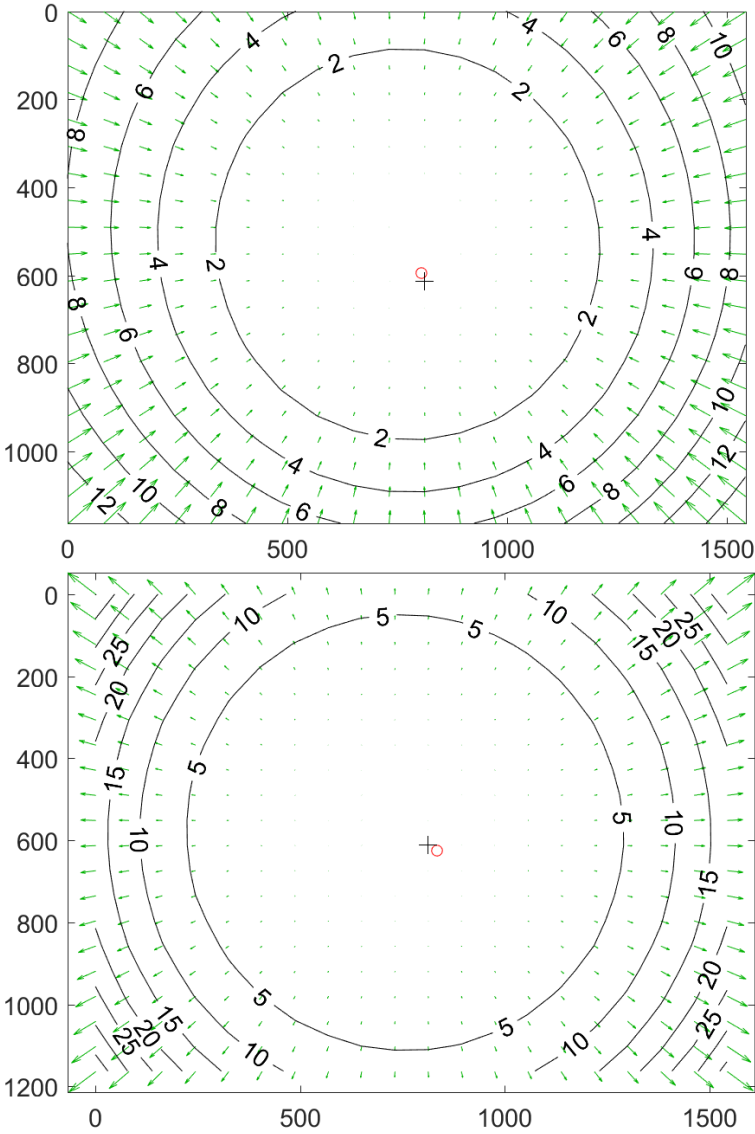


Figura 112 – Comparação entre o mapa de distorção dos parâmetros obtidos na calibração no ar (cima) e na água (baixo) da câmera esquerda.

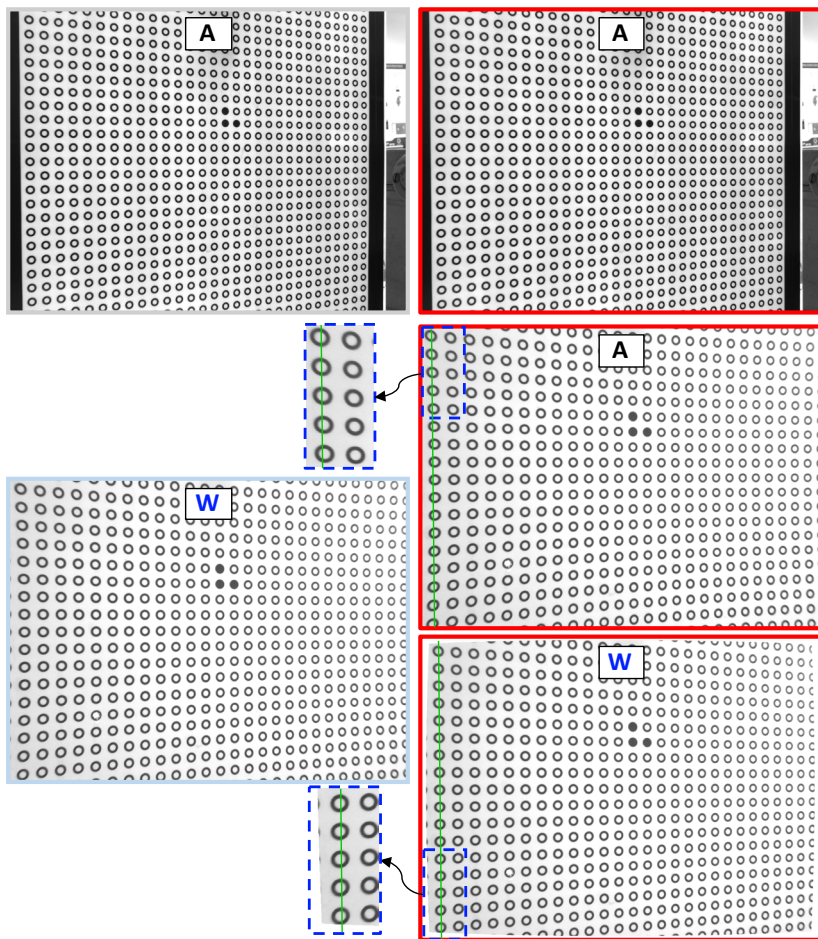


Figura 113 – Exemplo de correção da distorção de imagens obtidas no ar (A) e na água (W) (coluna da esquerda) com parâmetros de distorção obtidos em calibração no ar e na água (coluna da direita). Imagens obtidas com a câmera esquerda. No detalhe, as regiões em pontilhado comparam a imagem obtida na água após a correção da distorção com os parâmetros obtidos no ar e na água.

6.4 CALIBRAÇÃO NA ÁGUA – PARÂMETROS DE REFRAÇÃO (REFRA)

A seguir descreve-se a obtenção dos parâmetros de refração utilizando a modelagem física (Refra). Em sequência, após a obtenção

dos valores ótimos (calibração Refra completa), o erro residual foi recalculado para diferentes valores de espessura das interfaces e índices de refração com o intuito de verificar a influência da variação de parâmetros de refração no erro. Estas análises, expostas nas seções seguintes, são importantes pois permitem quantificar se é necessário, por exemplo, recalibrar um sistema que foi calibrado em água com diferente temperatura ou salinidade.

6.4.1 Parâmetros de refração conhecidos

Alguns parâmetros de refração podem ser obtidos diretamente, como a espessura do vidro do tanque (d_1), os índices de refração ($\mu_{0,1,2}$), podendo utilizar-se os valores tabelados ou então medi-los com o auxílio de um refratômetro. A espessura da parede de vidro do tanque foi medida com um micrômetro, o valor obtido após sete medições foi de $d_1 = (5,94 \pm 0,05)$ mm. O índice de refração no ar pode ser considerado como $\mu_0 = 1,0000$. O índice de refração do vidro pode ser considerado como o valor tabelado $\mu_1 = 1,5200$. Por fim, o índice de refração da água do laboratório utilizada nos experimentos foi medido com um refratômetro no Laboratório de Físico-químico da UNOCHAPECÓ. O equipamento possui divisão de escala de 0,0005 e o valor médio após três medições foi de $1,3335 \pm 0,0005$. A temperatura da água era de $17,5^\circ\text{C}$, um pouco abaixo da temperatura em que realizou-se os experimentos ($\sim 21^\circ\text{C}$) no Labmetro. O índice de refração na água foi o único medido para comparação com resultado da otimização uma vez que é o de maior influência no erro de medição. De toda forma, pode-se incluir o índice de refração de todos os meios na otimização e uma avaliação da influência de suas variações é feita na seção 6.4.5.

Os parâmetros listados acima são os mesmos para ambas as câmeras. Já no caso das distâncias (espessura do meio #0) e orientação às janelas do tanque, pode-se ter valores consideravelmente diferentes para cada uma das câmeras ($d_0^L, d_0^R, \mathbf{A}_L, \mathbf{A}_R$). Estes parâmetros foram obtidos com auxílio da terceira câmera, conforme descrito no **Apêndice C**.

A tabela 31 compila todos parâmetros de refração previamente conhecidos, os quais são utilizados como estimativa inicial, valor fixo ou apenas como referência para comparar com o resultado de calibração.

Tabela 31 – Parâmetros de refração conhecidos. Eixo das câmeras **A** em milímetros.

Símbolo	Nominal	Valor medido		Valor obtido com
	Câmeras (L e R)	Câmera L	Câmera R	
A	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,01406 \\ 0,00382 \\ 0,99989 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00773 \\ 0,01160 \\ 0,99990 \end{bmatrix}$	Parâmetros extrínsecos de padrão nas janelas do tanque. Valores obtidos com a calibração no ar do sistema estéreo e terceira câmera. Ver Apêndice C .
A∠Z	0,00	0,83°	0,80°	
d_0	-	18,61 mm	18,76 mm	
d_1	6,00	5,94 ± 0,05 mm		
μ_0	1,0000	-		Tabelado
μ_1	1,5200	-		Tabelado
μ_2	1,3300	1,3335 ± 0,0005		Medição com refratômetro

6.4.2 Aquisição das imagens

As imagens obtidas para a calibração dos parâmetros de refração e para calibração utilizando o modelo SVP na água foram as mesmas, todavia, foram utilizadas apenas 9 imagens para a obtenção dos parâmetros de refração.

6.4.3 Parâmetros de refração obtidos

Para a otimização selecionou-se 9 dos 24 pares de imagens obtidos dentro da água. As poses do padrão obtidas após a otimização podem ser vistas na figura 114. A tabela 32 expõe a legenda de cores, erro máximo, médio e desvio padrão obtido para cada uma das 9 imagens.

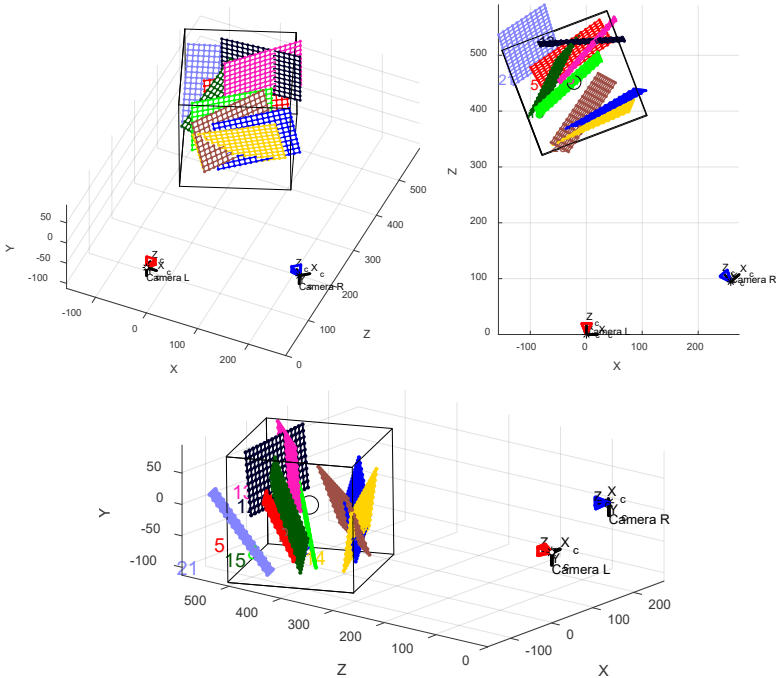


Figura 114 – Poses estimadas do padrão após a otimização dos parâmetros de refração. O cubo refere-se ao volume de medição de 200^3 mm³ definido no ar.

Tabela 32 – Legenda de cores, erro máximo, médio e desvio padrão final das 9 imagens utilizadas na calibração. Valores em milímetros.

Cor	#	Erro máximo	Erro médio	σ
Blue	1	0,270	0,065	0,034
Red	2	0,282	0,067	0,033
Green	3	0,268	0,052	0,030
Dark Blue	4	0,282	0,057	0,033
Pink	5	0,287	0,059	0,037
Yellow	6	0,282	0,060	0,039
Dark Green	7	0,343	0,056	0,040
Light Blue	8	0,396	0,078	0,057
Brown	9	0,246	0,061	0,030

Os parâmetros de refração obtidos são listados na tabela 33 sendo que se optou pelo uso dos valores nominais como estimativa inicial. Foram otimizados o eixo da câmera, a distância as janelas e o índice de refração da água (\mathbf{A}, d_0, μ_2), sendo que o índice de refração é o mesmo para ambas as câmeras. Não foram utilizados os valores conhecidos dos eixos das câmeras (\mathbf{A}) e distâncias às interfaces do tanque (d_0) pois a maneira como estes foram obtidos, apesar de poder ser realizada de forma relativamente simples na montagem “inversa” utilizada nos ensaios, não pode ser facilmente reproduzida em um protótipo compacto. Além disso, existe uma série de erros atrelados a obtenção dos parâmetros extrínsecos que podem resultar numa calibração pior do que a obtida com a otimização. Com isto em vista, para avaliar a diferença dos resultados obtidos com valores otimizados e de referência, realizou-se uma comparação dos erros obtidos utilizando desde a otimização completa até a condição sem nenhuma otimização. Essa comparação é exposta na seção 6.11.

Tabela 33 – Parâmetros de refração estimados, limites e após a otimização. Os parâmetros que foram otimizados estão destacados em vermelho (\mathbf{A}, d_0, μ_2) e com *. Coordenadas \mathbf{A} e distâncias d_i em milímetros.

Símbolo	Estimativa inicial			Valor após minimização	
	Câmeras (L e R)	Limite inferior	Limite superior	Câmera L	Câmera R
\mathbf{A}^*	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \pm 0,176 \\ \pm 0,176 \\ 1 \end{bmatrix}$ (normalizado)		$\begin{bmatrix} -0,01504 \\ 0,00278 \\ 0,99988 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,00995 \\ 0,00334 \\ 0,99994 \end{bmatrix}$
$\mathbf{A} \angle Z$	0,00°	0,00°	10,00°	0,88°	0,60°
d_0^*	20,000	1,000	60,000	16,938	16,496
d_1	6,00 (nominal)	Constante		6,00	
μ_0	1,0000	Constante		1,0000	
μ_1	1,5200	Constante		1,5200	
μ_2^*	1,3300	$\pm 0,0500$		1,3381	

Os vetores de erro 3D para cada pose do padrão são expostos na figura 115. Conforme pode-se notar na imagem, foram removidos da calibração três pontos (região superior direita) que apresentavam um erro muito maior do que os outros. Este erro pode ser devido a problemas na impressão e/ou na identificação do ponto na imagem. Nota-se que os vetores não possuem uma componente sistemática global, que pode ocorrer caso a otimização não convirja ou devido à problemas no ajuste dos pontos do padrão aos projetados.

O histograma dos erros é exposto na figura 116, assim como o erro mínimo, máximo, médio e desvio padrão.

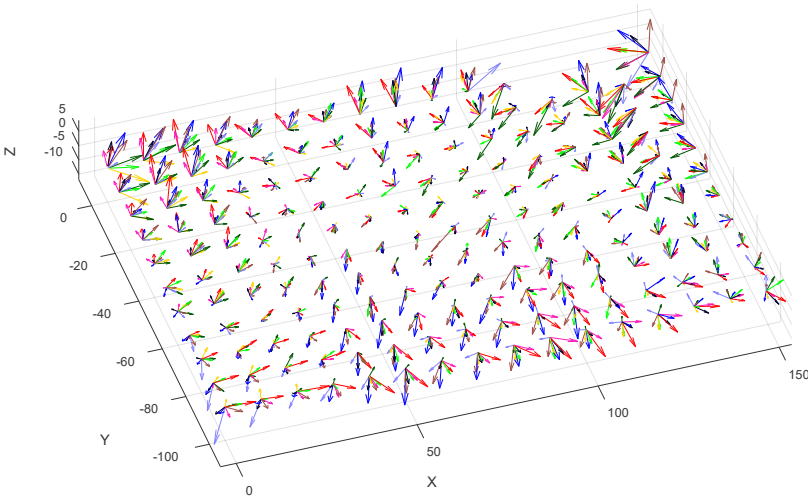


Figura 115 – Vetores de erro para todas as nove posições do padrão. Foram excluídos da otimização três pontos da linha superior, começando pelo segundo da esquerda para a direita. O maior vetor representa um erro de 0,30 mm.

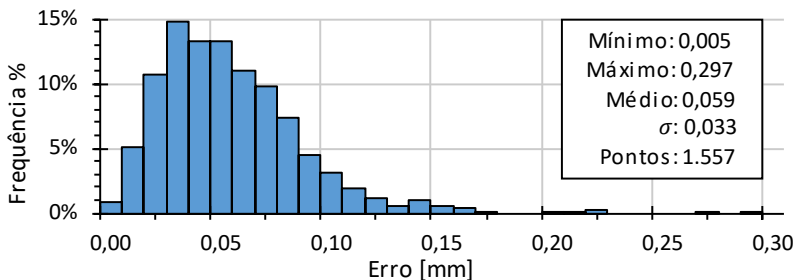


Figura 116 – Histograma relativo (%) do erro dado pela distância dos pontos triangulados e do padrão.

6.4.4 *Influência da variação das distâncias*

Variou-se a distância da parede do tanque às câmeras esquerda e direita (d_0^L, d_0^R) em ± 1 mm. O gráfico 3D exposto na figura 117 mostra o erro máximo ($\varepsilon_{Emax} = \bar{\varepsilon} + 2\sigma$) obtido para tal variação. A variação do erro para apenas uma das distâncias (esquerda) pode ser visto na figura 118. Apesar do erro aumentar para distâncias diferentes da otimizada, pode-se considerar que essa variação é pequena, sendo seu valor extremo obtido quando subtraídos um milímetro de ambas as distâncias, obtendo ε_{Emax} de calibração de 0,16 mm (28%). Já a figura 119 mostra a variação do erro em relação a espessura da parede do tanque (d_1). Nesse caso, nota-se uma sensibilidade menor. Isso ocorre provavelmente devido ao fato de que o desvio dos feixes que corre dentro do vidro ser pequeno.

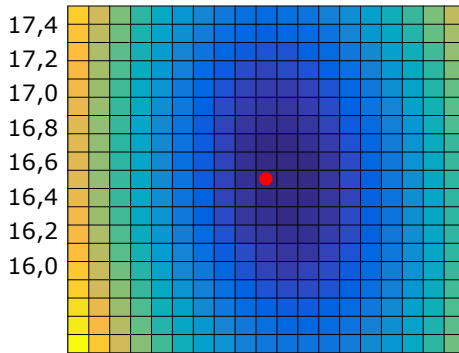
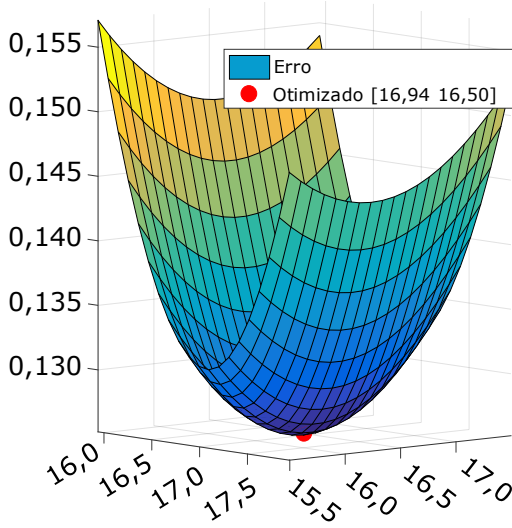


Figura 117 – Vista perspectiva e superior da variação do erro residual de calibração variando a distância da parede do tanque na câmera esquerda e direita (d_0^L, d_0^R) em ± 1 mm após a otimização.

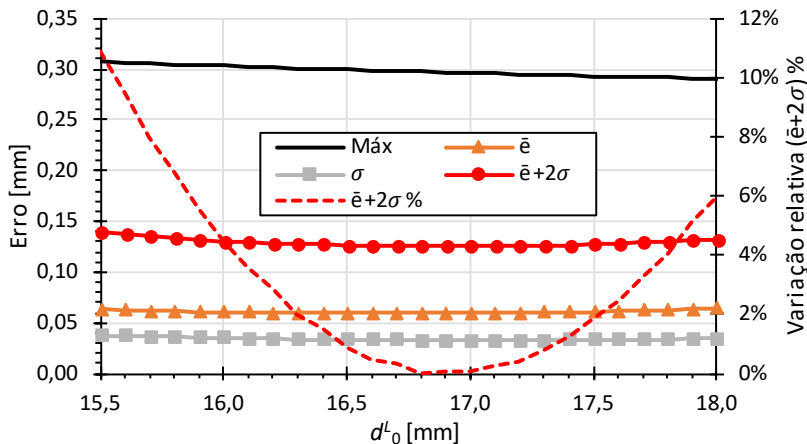


Figura 118 - Erro de calibração em relação à variação da distância à parede do tanque da câmera esquerda (L). Parâmetros de refração otimizados com $d_0^L = 16,938$ mm.

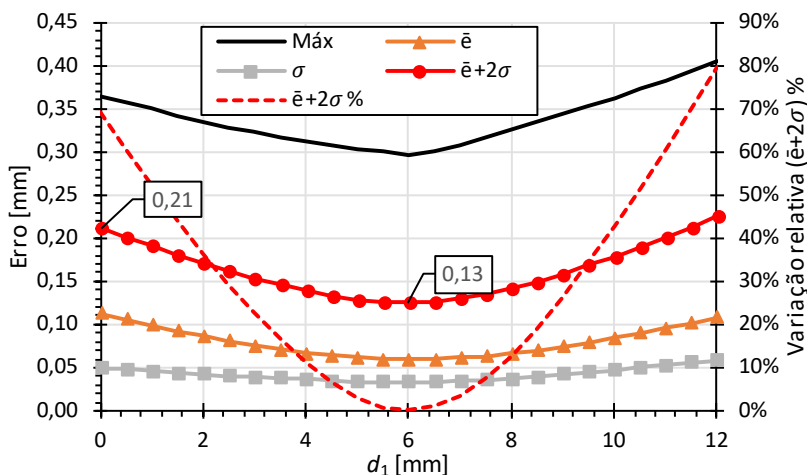


Figura 119 – Erro de calibração em relação à variação da espessura da parede do tanque de água. Parâmetros de refração otimizados com $d_1 = 6,00$ mm (valor nominal).

6.4.5 Influência da variação do índice de refração

Conforme a tabela 3 (seção 3.1.3), o índice de refração da água aumenta em torno de 0,001 para uma redução na temperatura de 10°C. A

figura 120 mostra o erro de calibração considerando uma variação de temperatura de $\pm 10^\circ\text{C}$, que resulta numa variação oposta do índice de refração aproximada de $\mp 0,001$ (note os sinais trocados). Com essa variação de temperatura, o erro estatístico máximo ($\bar{e} + 2\sigma$) tem uma variação relativa de $\pm 20\%$. Conclui-se que variações de poucos graus ($\pm 2^\circ\text{C}$) na temperatura não são críticas.

A mudança de salinidade (água doce para salgada) causa um aumento no índice de refração de 0,007 (sete vezes maior) e um consequente aumento no erro de 370%. Ou seja, deve-se calibrar o sistema no tipo de água em que será utilizado, doce ou salgada. Caso o sistema já tenha sido calibrado em um diferente tipo de água, a calibração pode ser um simples ajuste do índice de refração, utilizando um objeto padrão para verificação do erro. Todavia, conforme descrito na seção 5.4, deve-se atentar se a correspondência 2D 3D foi mantida, o que pode ser feito com um padrão tipo tabuleiro de xadrez ou com codificação absoluta de pontos (ex.: projeção de franjas na horizontal e vertical).

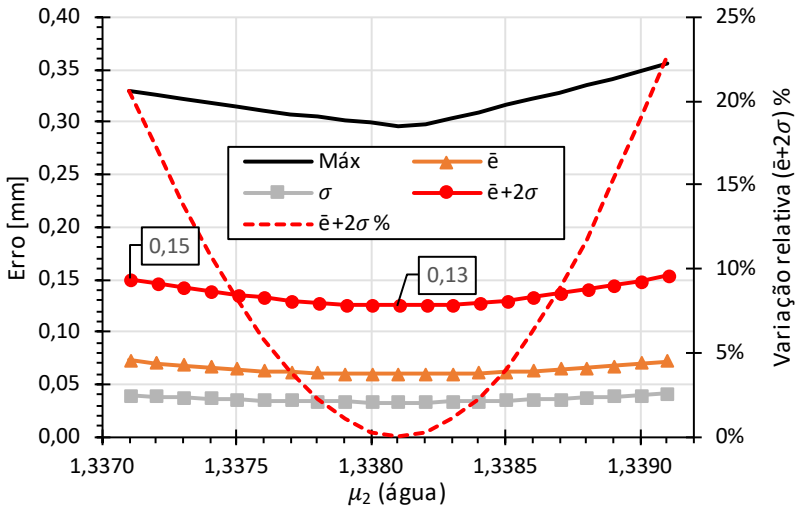


Figura 120 – Erro da calibração em relação à variação do índice de refração da água em $\pm 0,001$. Parâmetros de refração otimizados com $\mu_2 = 1,3381$. Sendo \bar{e} o erro médio.

6.5 AVALIAÇÃO DO VOLUME DE MEDIÇÃO

Conforme descrito na metodologia dos experimentos (5.4), o sistema de coordenadas do objeto (SCO) ou centro de medição no ar, foi definido como o centro do cubo de 200 mm dentro da zona de interseção (projektor/campo de visão das câmeras), com face frontal normal e o mais próximo possível do sistema. Após a calibração, os parâmetros do sistema foram utilizados para alimentar um modelo CAD. Para obter a região de projeção e ao mesmo tempo confirmar os dados inseridos no modelo CAD, realizou-se a medição de um plano com $\sim 300 \times 400 \text{ mm}^2$ em cinco posições Z diferentes. Em sequência, os resultados das medições foram inseridos no modelo CAD. Por fim, foi possível coincidir o campo de visão do modelo CAD com as bordas das medições realizadas. O resultado final obtido é exposto na figura 121.

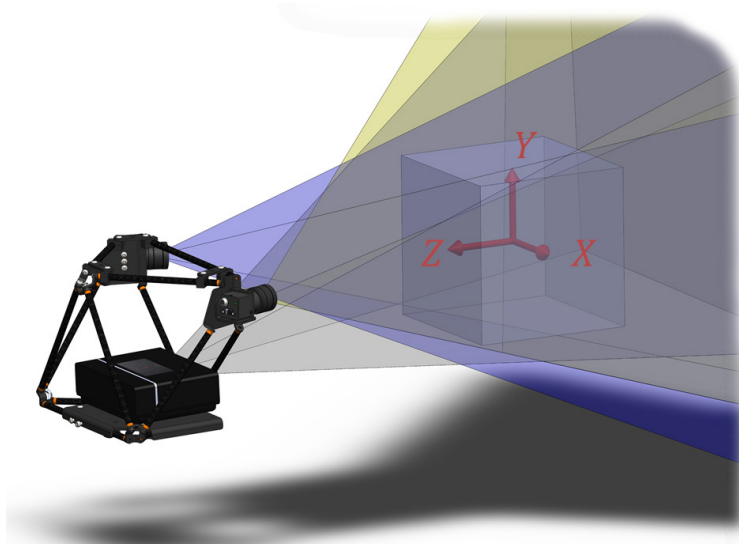


Figura 121 – Vista perspectiva do modelo CAD do sistema e do volume de medição (cubo de 200 mm de lado) no ar.

O mesmo procedimento de medição do plano foi realizado na água. O modelo CAD pode ser visto na figura 122. Nota-se que, devido à refração na água, o campo de projeção é bastante reduzido, impossibilitando a obtenção de um volume de medição na água em

posição similar. Durante os experimentos descritos no presente capítulo, posicionou-se os objetos de avaliação em toda região de interseção englobando ao máximo o volume que o sistema possui no ar. Como na água obtém-se um efeito de aproximação dos objetos, avaliou-se também o sistema em posições mais distantes em Z , o que possibilita compensar o volume perdido devido à aproximação aparente e ao campo de projeção reduzido. Com essas considerações, pode-se obter um mesmo volume na água delimitando um paralelepípedo com dimensões $(X \times Y \times Z)$ $160 \times 200 \times 250 \text{ mm}^3$; com face frontal a 30 mm do CCO.

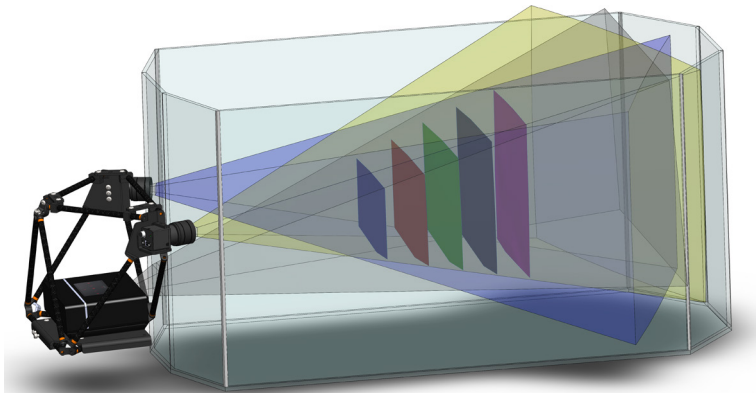


Figura 122 – Vista perspectiva do modelo CAD do sistema e tanque mostrando o campo de projeção; campo de visão das câmeras e cinco posições de um plano medido, ilustrando o volume útil de medição na água.

6.6 AVALIAÇÃO COM PLANO

A seguir são descritos os resultados obtidos nos três diferentes experimentos com o plano padrão: mesma posição no ar e água, deslocamentos controlados e posições aleatórias inclinadas.

6.6.1 Plano na mesma posição no ar e na água

Realizou-se a aquisição do padrão plano numa mesma posição no ar e na água. O plano foi orientado (em relação ao SCO) coplanar ao plano XY , centrado em X e em Z e posicionado um pouco abaixo do centro em

Y (~ 14 mm). Para repetir a mesma posição em ambos os meios, foi utilizada uma base cinemática (ver figura 123). A possibilidade de remoção do plano facilita o posicionamento do tanque de água.

As configurações do experimento no ar e água são expostas na figura 124. A figura 125 mostra as imagens obtidas para ambos os casos pelo sistema. Nota-se o efeito de magnificação da imagem devido à refração na água.



Figura 123 – Base cinemática utilizada no experimento.

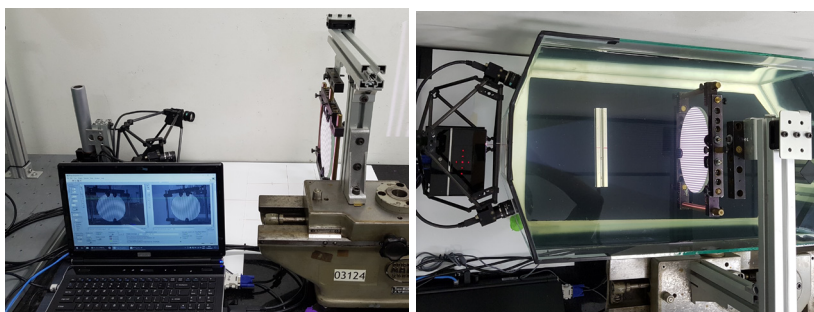


Figura 124 – Fotos durante aquisição com plano na mesma posição no ar e na água.

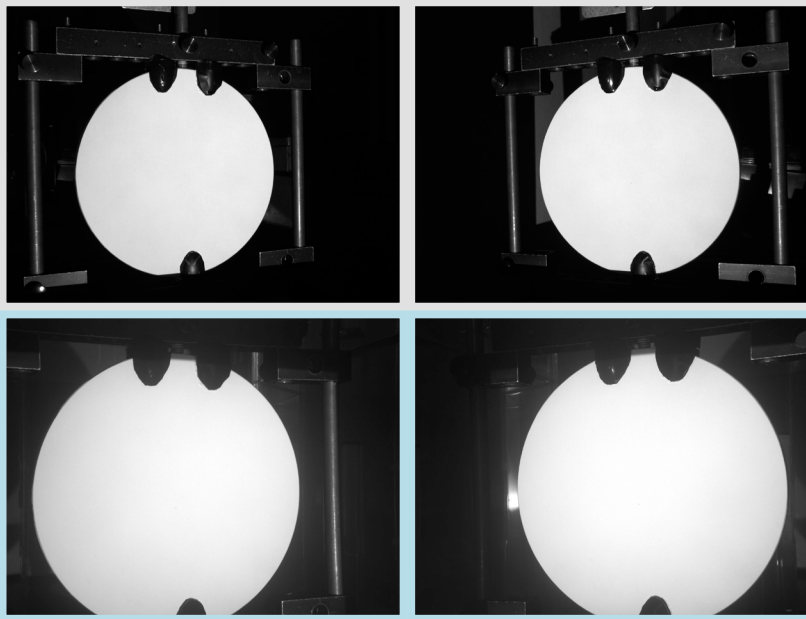


Figura 125 – Imagens obtidas pelo sistema no ar (acima) e na água (abaixo) na mesma posição ($Z \sim 0$ mm).

O desvio com relação ao plano ajustado em cada medição pode ser visto na figura 126, sendo que o mesmo foi calculado após a remoção dos pontos nas bordas do plano e dos pontos mais distantes ao plano ajustado.

Comparando os resultados, pode-se notar um pequeno aumento na dispersão dos erros (σ) de 0,02 mm para 0,03 mm na água. No caso da medição com modelagem da refração, a borda do plano na região inferior esquerda apresentou um erro maior que nos outros casos, atingindo valores até 0,1 mm. Esse erro é provavelmente devido a resíduos da calibração dos parâmetros de refração. Ambos valores estão próximos do erro de planeza obtido com a MMC, que foi de 0,28 mm.

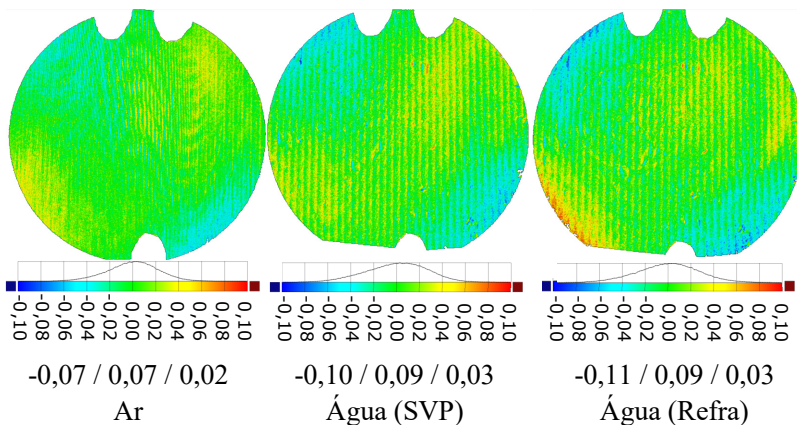


Figura 126 – Desvio ao plano ajustado em cada medição. Os valores abaixo da legenda de cores que estão separados por “/” representam o desvio: mínimo, máximo e σ . Valores em milímetros.

Os resultados de medição obtidos sem nenhum tipo de filtragem no ar, água (SVP) e água (Refra) podem ser vistos nas figuras 127 e 128. Já a figura 129 mostra os resultados após a filtragem previamente descrita. Os resultados foram plotados num mesmo gráfico de forma a comparar a posição resultante em cada caso.

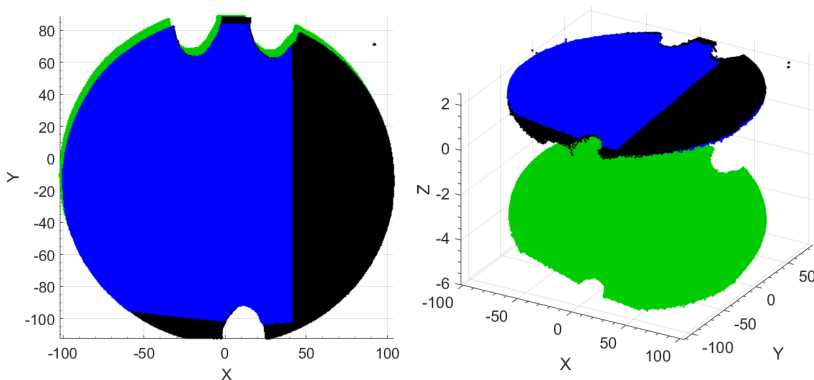


Figura 127 – Vista frontal e perspectiva da medição do plano na mesma posição no ar (preto), água (SVP) (verde) e água (Refra) (azul).

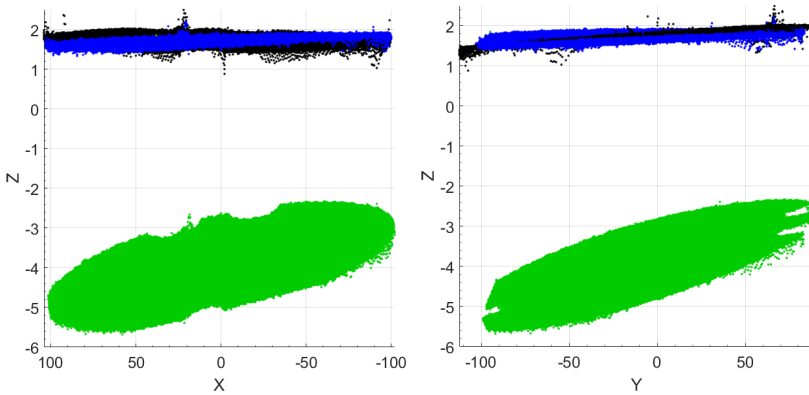


Figura 128 – Vista superior e lateral da medição do plano na mesma posição no ar e água.

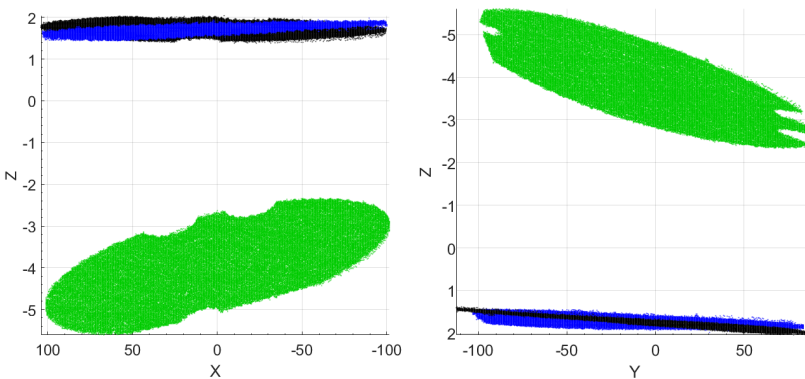


Figura 129 – Vista superior e lateral da medição do plano na mesma posição no ar e água após remoção de pontos espúrios (1/1000) e distantes $\pm 0,2$ mm.

Todas as três calibrações possuem as mesmas matrizes de transformação de coordenadas do objeto para a câmera esquerda. Entretanto, conforme pode-se perceber nos resultados obtidos, as nuvens de pontos possuem posição e orientação diferentes. No caso da calibração utilizando o modelo físico de refração (Refra) essa diferença é bem sutil, o que indica que a modelagem e a calibração foram adequadas. Todavia, na aproximação dos efeitos da refração com o modelo SVP, esta diferença é muito grande. Um fator provável para tal efeito é que os parâmetros intrínsecos e de distorção das câmeras foram ajustados durante a calibração SVP na água de forma a reduzir o erro de reprojeção em pixel,

mas não necessariamente mantém a distância correta de cada pose do padrão utilizado, uma vez que essa posição é um resultado da otimização e não um requisito. Como o modelo SVP não representa fisicamente o que ocorre na refração e sim tenta compensar seus efeitos com a alteração do comprimento focal e parâmetros de distorção, as distâncias entre poses do padrão e câmeras também não representam mais a posição “real” física e sim a que resulta num menor erro. Com isto, pode-se concluir que quando se optar pela utilização da aproximação por SVP para interfaces planas de refração, o sistema de coordenadas no ar não pode ser considerado verdadeiro, e sim apenas uma aproximação. Caso exista a necessidade de definir o sistema de coordenadas do objeto em posição específica, pode-se utilizar uma das poses adquiridas na água. Já para uma relação com o sistema de coordenadas no ar, pode-se utilizar a aquisição de um objeto ou padrão na mesma posição em ambos os meios, como foi realizado no presente experimento, e então corrigir a matriz de transformação de forma que as medições se sobreponham.

Para estimar as distância e inclinação entre os sistemas de coordenadas calculou-se o centro e orientação dos planos medidos em cada caso. A rotação no eixo Z foi desprezada, sendo visualmente nula (Figura 127), as rotações em X e Y combinadas são representadas pelo vetor normal ao plano ajustado. O centro é definido pelo ponto de interseção de uma linha ao plano ajustado, sendo a linha normal ao plano e também passante ao centro da esfera de menor diâmetro que circunscreve os pontos. As respectivas posições do centro do plano e sua normal são expostas nas três primeiras colunas da tabela 34. O diâmetro estimado do padrão através da menor esfera circunscrita também é indicado na tabela. As diferenças entre o sistema de coordenadas na água com o modelo SVP e Refra podem ser vistas na tabela 35. Os módulos dos vetores da distância entre os sistemas de coordenadas foram respectivamente de 8,02 mm e 0,64 mm e os ângulos entre vetores normais de $0,81^\circ$ e $0,13^\circ$.

Tabela 34 – Normal e centro da medição do plano na mesma posição no ar e água (SVP e REFRA).

Item	Símbolo	Ar	Água SVP	Água
\hat{n}	X	-0,000447	0,009633	0,001435
	Y	-0,002742	-0,012623	-0,001411
	Z	0,999996	0,999874	0,999998
	$\hat{n} \angle Z$	0,16°	0,91°	0,12°
Centro	X	2,27	-0,11	1,63
	Y	-13,80	-8,62	-13,81
	Z	1,72	-3,92	1,72
Diâmetro obtido		203,93	203,61	203,66
Pontos		124.327	121.188	120.792

Tabela 35 – Diferença entre sistema de coordenadas do objeto (SCO) na água com modelo SVP e Refra ao SCO no ar.

Item	Símbolo	Água SVP	Água Refra
Ângulo em relação a \hat{n}	$\hat{n} \angle \hat{n}_{Ar}$	0,81°	0,13°
Distância ao centro	X	-2,38	-0,64
	Y	5,18	-0,01
	Z	-5,64	0,00
	Módulo	8,02	0,64

6.6.2 Plano normal em posições controladas (Z)

O mesmo plano padrão foi medido em diferentes posições com auxílio de uma mesa com deslocamento controlado (Figura 124). O plano foi posicionado nas cotas Z (mm) nominais de: 100, 50, 0, -50 e -100 conforme ilustra a tabela 36. Realizou-se três ciclos de aquisições no ar e quatro na água. As imagens foram processadas com o modelo SVP no ar e com o modelo SVP e refração (Refra) na água. Pontos espúrios foram removidos conforme o procedimento descrito no experimento anterior. Para cada medição, ajustou-se um plano matemático.

Tabela 36 – Posições nominais em Z e cores utilizadas nas nuvens de pontos obtidas.

Cor	Aquisição #	Posição [mm]	Deslocamento [mm]
Blue	1	100	0
Red	2	50	50
Green	3	0	100
Black	4	-50	150
Pink	5	-100	200

A vista frontal e perspectiva das nuvens de pontos obtidas durante um dos ciclos de medição na água (Refra) são expostas na figura 130. Nota-se que, devido à refração, o volume de medição na água é reduzido no eixo Y, sendo que o mesmo aumenta de forma gradativa (ângulo de abertura vertical) até atingir 100% em torno da posição $Z = 50$ mm. As figura 131 expõe as vistas superior e lateral. Pode-se notar na vista frontal e superior que o vetor deslocamento é visualmente normal aos planos e paralelo ao eixo Z.

O vetor deslocamento foi definido como o vetor entre os centros das esferas menores circunscritas nas posições 100 e -100 em um dos ciclos de medição no ar. Avaliou-se então o ângulo entre o vetor deslocamento e a normal ao plano na posição 100. O ângulo obtido entre os vetores foi de $0,125^\circ$. Já o ângulo entre o vetor normal e o eixo Z foi de $0,220^\circ$. Para a avaliação da tendência do sistema, deve-se idealmente tomar as distâncias entre os pontos de interseção do vetor deslocamento com cada plano ajustado. Como o vetor normal aos planos está suficientemente paralelo ao vetor deslocamento, utilizou-se esse vetor como referência. O erro devido a esta consideração pode ser calculado a partir do ângulo entre os vetores. Na avaliação de uma distância de 200 mm, tem-se um erro de 0,0015 mm, que pode ser considerado desprezível para o ensaio. Sendo assim, em todas as medições, tomou-se o vetor normal ao primeiro plano como sendo a direção de deslocamento. As distâncias entre planos são obtidas a partir dos pontos de interseção do vetor normal ao primeiro plano com cada plano ajustado.

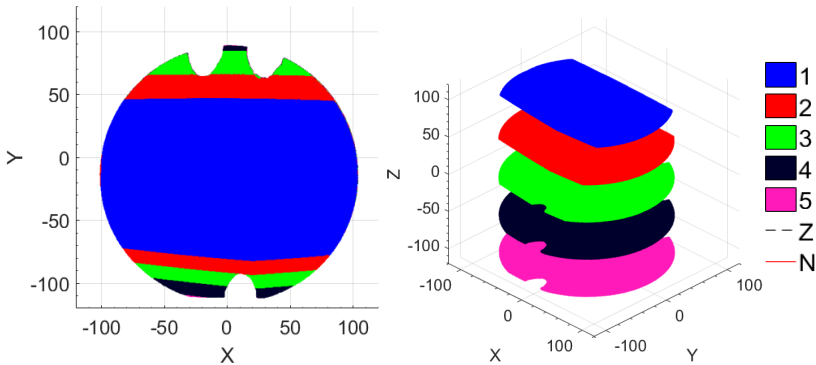


Figura 130 – Vista frontal e perspectiva das nuvens de pontos obtidas da medição do plano com deslocamentos controlados durante um dos quatro ciclos de medição na água.

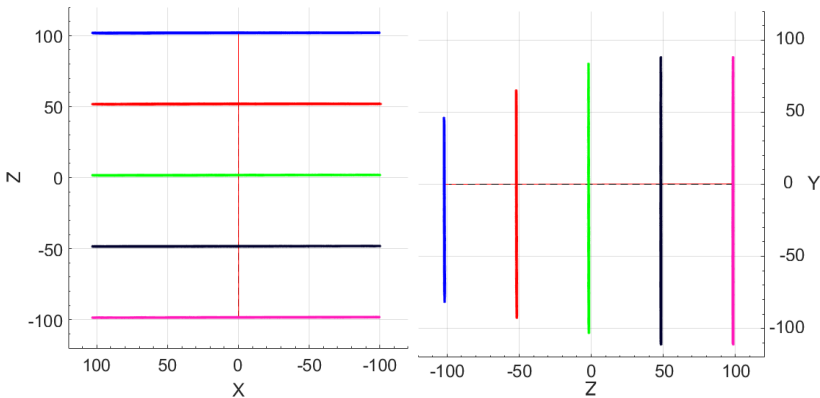


Figura 131 – Vista superior e lateral das nuvens de pontos obtidas da medição do plano com deslocamentos controlados durante um dos quatro ciclos de medição na água. A linha pontilhada representa o eixo Z e a linha contínua vermelha representa o vetor normal ao plano #1. Nota-se que as linhas são visualmente coaxiais.

A tabela 37 compila os resultados obtidos. Nota-se um aumento na tendência média para as medições na água em relação as do ar com máximo de 0,17 mm (vide última coluna da tabela). Já os resultados obtidos com os modelos SVP e Refra são semelhantes, sendo que a tendência com o modelo Refra é no máximo 0,02 mm maior do que a obtida com o modelo SVP. A tendência relativa (%) teve pouca variação

em todos os casos para as diferentes posições do padrão, sendo seu valor máximo de 0,15%, 0,32% e 0,30%, respectivamente para as medições no ar, água (SVP) e água (Refra). A tendência (Td) do sistema para os três casos de medição pode ser vista no gráfico da figura 132. A tabela 38 compara a tendência obtida utilizando o modelo Refra com o SVP na água e com resultados no ar. Já os gráficos individuais de tendência (mm e %) e repetibilidade para 95% de confiança são expostos nas figuras 133, 134 e 135. Deve-se notar que, como foram realizados menos ciclos no ar do que na água (respectivamente 3 e 8), a repetibilidade no ar ficou bem maior devido ao fator multiplicativo *t-student* para 95% de confiança.

Tabela 37 – Tendência e repetibilidade (Re) com intervalo de 95% de confiança para medição de deslocamentos controlados do plano no ar, água (SVP) e (Refra). Valores em milímetros.

Des.	Ar 3 ciclos				Água (SVP) 8 ciclos				Água (Refra) 8 ciclos			
	Td	Td [%]	σ	Re	Td	Td [%]	σ	Re	Td	Td [%]	σ	Re
50	0,07	0,15%	0,04	0,20	0,16	0,32%	0,037	0,09	0,15	0,30%	0,04	0,09
100	0,12	0,12%	0,04	0,18	0,22	0,22%	0,040	0,10	0,24	0,24%	0,04	0,10
150	0,19	0,13%	0,03	0,14	0,31	0,21%	0,033	0,08	0,34	0,23%	0,03	0,08
200	0,23	0,12%	0,05	0,22	0,40	0,20%	0,025	0,06	0,40	0,20%	0,03	0,06
Max	0,23	0,15%	0,05	0,22	0,40	0,32%	0,04	0,10	0,40	0,30%	0,04	0,10

Tabela 38 – Diferença entre a tendência utilizando o modelo Refra com o SVP na água (segunda coluna) e medições no ar (terceira coluna). Valores obtidos a partir dos dados das colunas 2, 3 e 4 da tabela 37. Valores em milímetros.

Deslocamento	Água (Refra - SVP)	Ar - Água (Refra)
	Td	Td
50	-0,01	0,08
100	0,02	0,12
150	0,02	0,14
200	0,01	0,17
Max	0,02	0,17

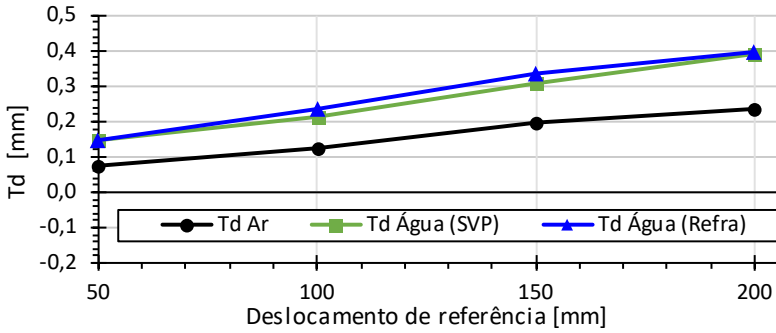


Figura 132 – Tendência na medição de distância no ar, água (SVP) e água (Refra).

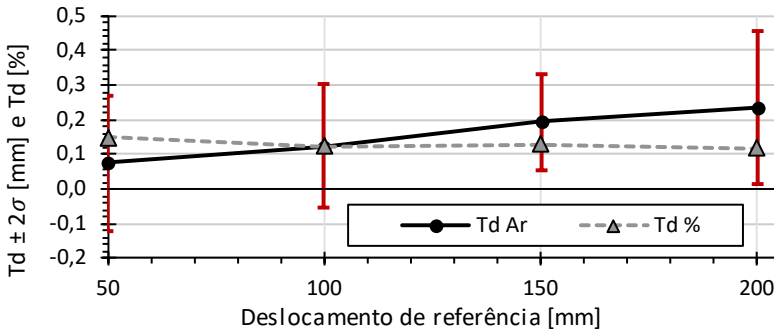


Figura 133 – Tendência na medição de distância no ar.

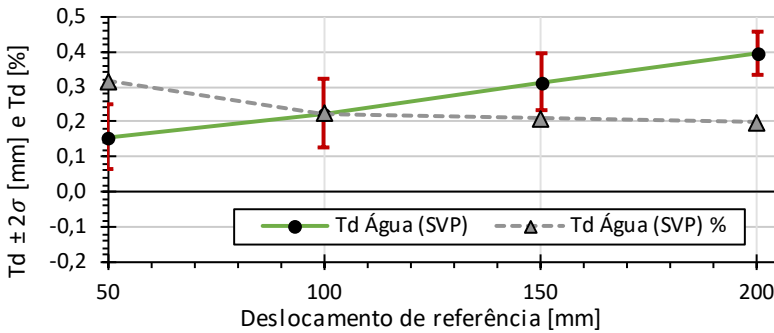


Figura 134 – Tendência na medição de distância na água (SVP).

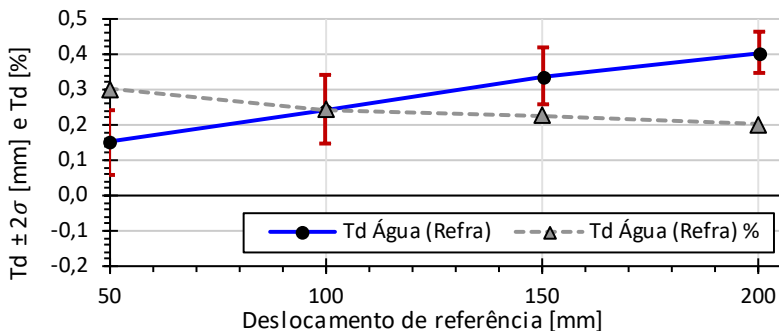


Figura 135 – Tendência na medição de distância na água (Refra).

Os erros residuais de apalpação (distância normal entre ponto e plano ajustado) em todas as posições e ciclos de medição foram compilados e os histogramas normalizados (distribuições probabilidade, área = 1) obtidos são comparados na figura 136. Nota-se no histograma uma maior dispersão dos dados para as medições na água, sendo o desvio padrão obtido em torno de 1,6 vezes (60%) maior do que no ar.

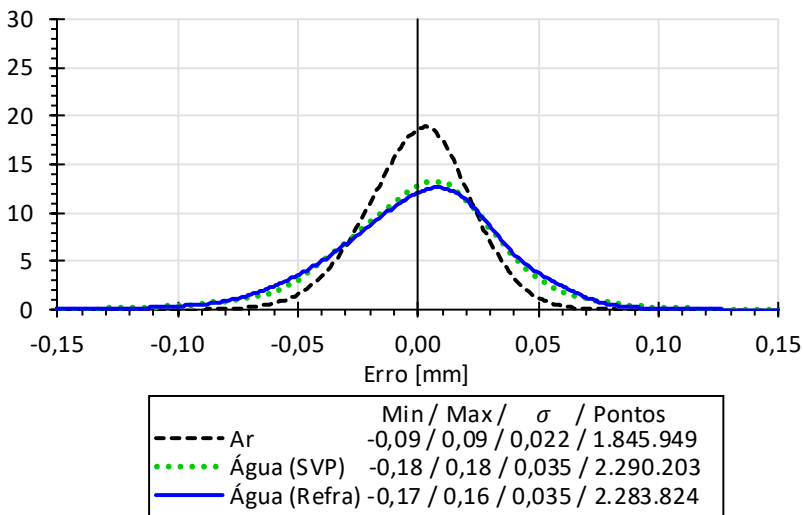


Figura 136 – Contorno do histograma normalizado (distribuição probabilidade, área = 1) do desvio para todas as posições e ciclos dos deslocamentos controlados do plano em cada meio e calibração. O número de pontos no ar é menor pois foram feitos 3 ciclos ao invés de 4 (água), todavia, com apenas um ciclo os histogramas já possuem todos forma similar à exposta no gráfico.

O erro residual ou desvio (distância normal do ponto ao plano ajustado) para todas as posições na medição na água (Refra) é exposto na figura 137. A figura 138 compara o erro residual obtido com o modelo SVP e Refra na água na posição #1 e #5. Nota-se um erro sistemático, sendo que os pontos tendem a uma superfície de 2ª ordem, resultando num formato de “moeda amassada” para o modelo Refra. Já o modelo SVP aparenta possuir um erro sistemático de 3ª ordem resultando em uma deformação “S” na posição #1. No ar, conforme ilustram os gráficos na figura 139, o erro sistemático é em torno de três vezes menor (note faixa de $\pm 0,05$ mm em Z), no entanto, ainda é presente e varia um pouco nas outras posições de aquisição. Na posição mais distante (#5) fica em torno de $\pm 0,08$ mm.

Esses erros sistemáticos são provavelmente residuais da modelagem e da calibração do sistema. Como principais fatores possíveis estão: as imperfeições não modeladas nas lentes; parâmetros de distorção incorretos; imperfeições no padrão de calibração, como erro de planeza, distâncias incorretas entre pontos em sua malha, tanto em pixel como os valores de referência em milímetros. No caso da refração, inclui-se também imperfeições na parede (não modeladas) do tanque e parâmetros de refração incorretos. Em contraste, com uma calibração e modelagem “perfeitas” os erros residuais estariam todos distribuídos numa região uniforme no espaço sem formato/padrão visível, sendo o erro aleatório devido principalmente à resolução das câmeras, resolução do projetor, nitidez das imagens e espalhamento na água.

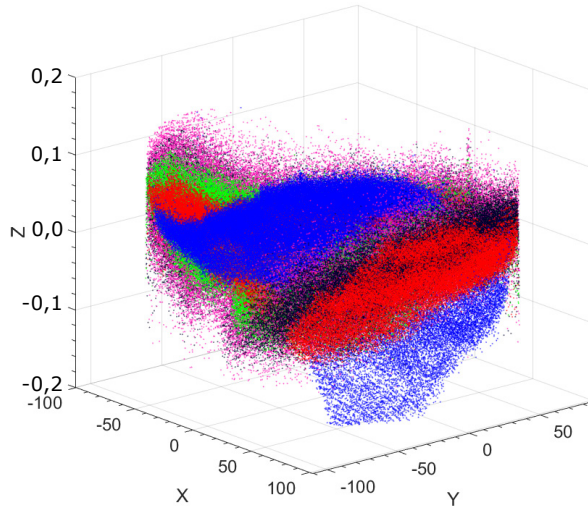


Figura 137 – Desvio aos planos ajustados nas cinco posições de um dos ciclos de aquisição na água com modelo Refra.

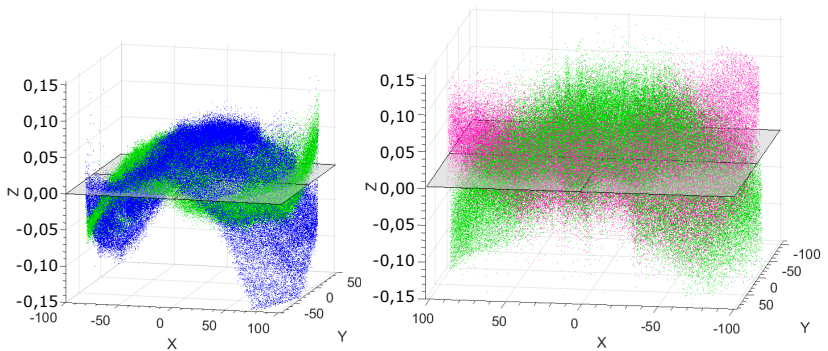


Figura 138 – Desvio ao plano ajustado das nuvens de pontos de um dos ciclos nas posições #1 100 mm e #5 -100 mm obtidas na água com modelo SVP (verde) e Refra (azul e rosa). Nota-se formato “C” nos erros, e formato “S” na posição #1 com modelo SVP.

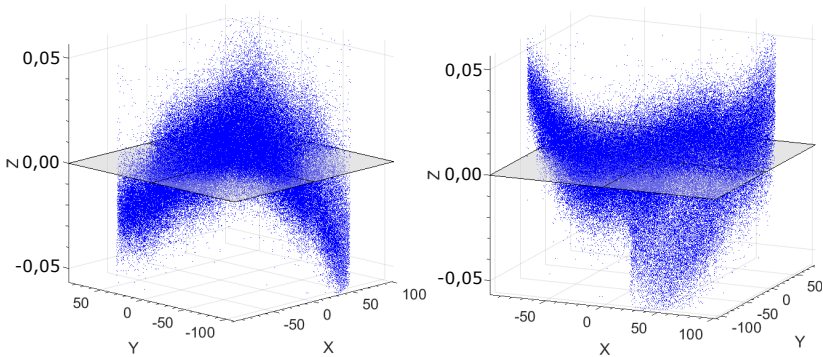


Figura 139 – Desvio ao plano ajustado a nuvem de pontos de um dos ciclos na posição #1 no ar. Nota-se erro sistemático, todavia pequeno se comparado ao obtido na água.

6.6.3 Plano em poses rotacionadas em XY (VDI/VDE)

Nos dois experimentos anteriores os planos encontravam-se normais ao eixo Z, em contraste, aqui se apresenta os resultados obtidos incluindo também poses rotacionadas no eixo X e Y. Foram adquiridas 6 posições diferentes do plano no ar e 18 na água.

Plano - Medições no ar

A figura 140 ilustra as poses adquiridas no ar.

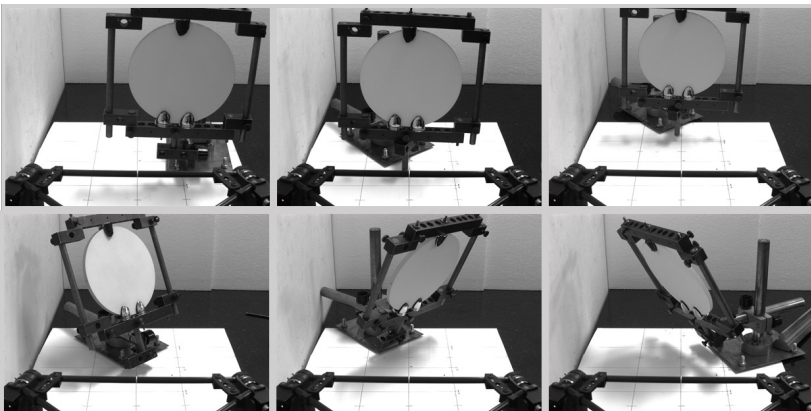


Figura 140 – Seis posições obtidas no ar, enumeradas de 1 a 6 da esquerda para a direita.

As nuvens de pontos obtidas são expostas nas figuras 141 e 142. Pode-se notar que as posições 4, 5 e 6 estão bem rotacionadas nos eixos XY . Com exceção da posição 1, todos resultados estão dentro do volume de medição no ar, representado pelo cubo nas imagens.

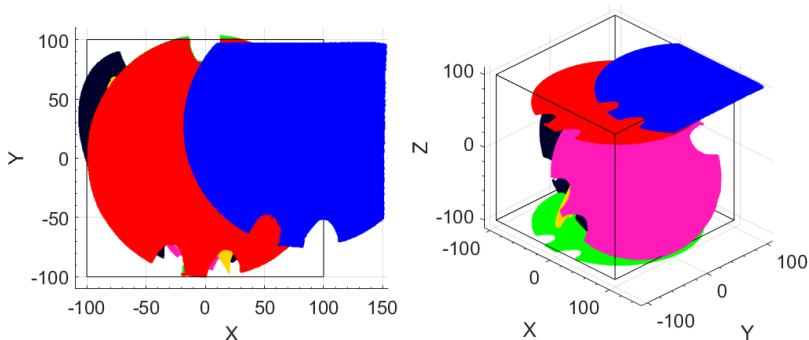


Figura 141 – Vista frontal e perspectiva das 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano em posições aleatórias no ar.

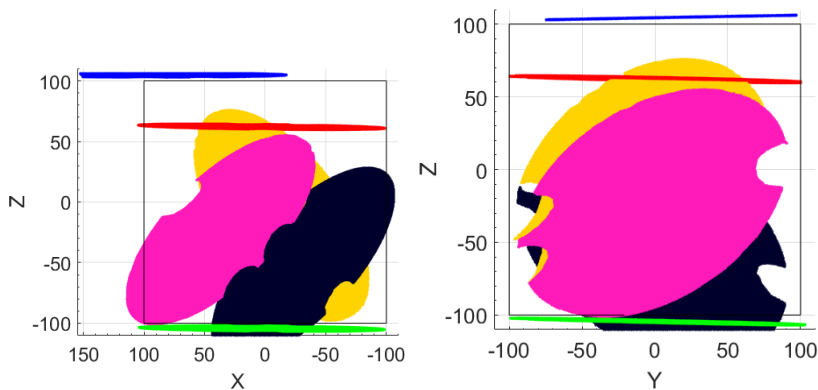


Figura 142 – Vista superior e lateral das 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano em posições aleatórias no ar.

Os desvios obtidos para as nuvens de pontos medidas em cada pose no ar podem ser vistos na figura 143. Já a figura 144 mostra o desvio em mapa de cores.

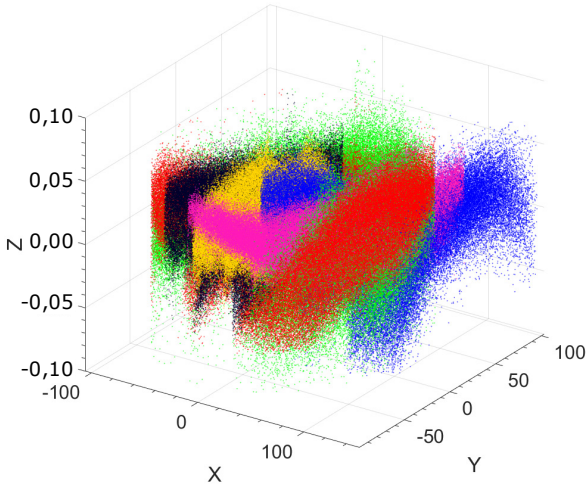


Figura 143 – Desvio ao plano ajustado de todas as 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano no ar em posições não controladas. Valores em milímetros.

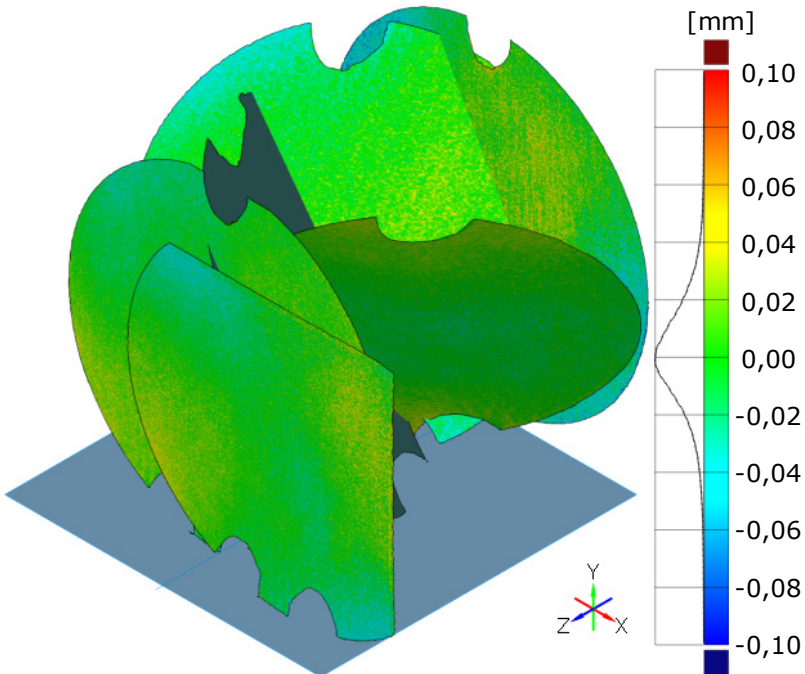


Figura 144 – Vista em perspectiva do desvio ao plano ajustado (em mapa de cores) de todas as 7 nuvens de pontos obtidas da medição do plano no ar em

posições não controladas. Retângulo inferior representa um lado do volume de medição ($200 \times 200 \text{ mm}^2$).

Plano - Medições na água

As 18 poses adquiridas na água podem ser vistas na figura 145, onde foram separadas (1-5; 6-10 e 11-18) de forma a possibilitar uma melhor visualização. Já as figuras 146 e 147 mostram todos os resultados obtidos juntos em diferentes ângulos de visão.

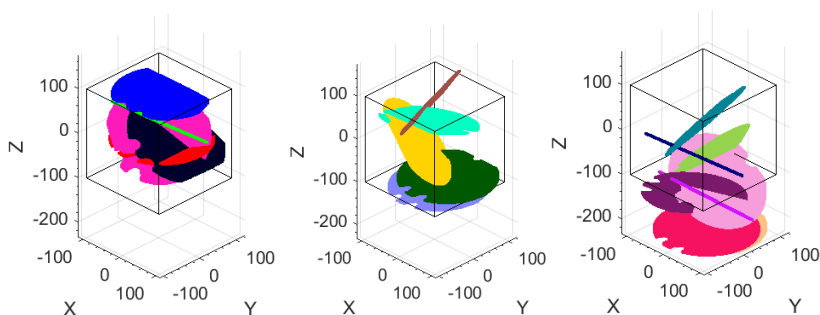


Figura 145 – Vista em perspectiva dos resultados de medição do plano na água em posições não controladas de 1-5; 6-10 e 11-18.

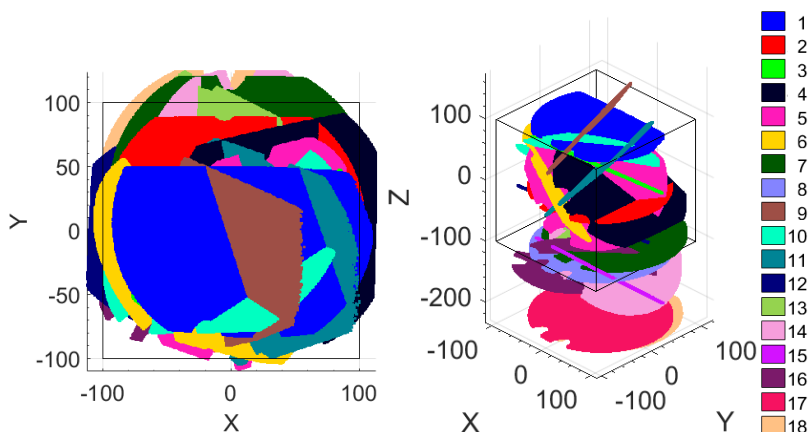


Figura 146 – Vista frontal e perspectiva das medições do plano na água em posições não controladas.

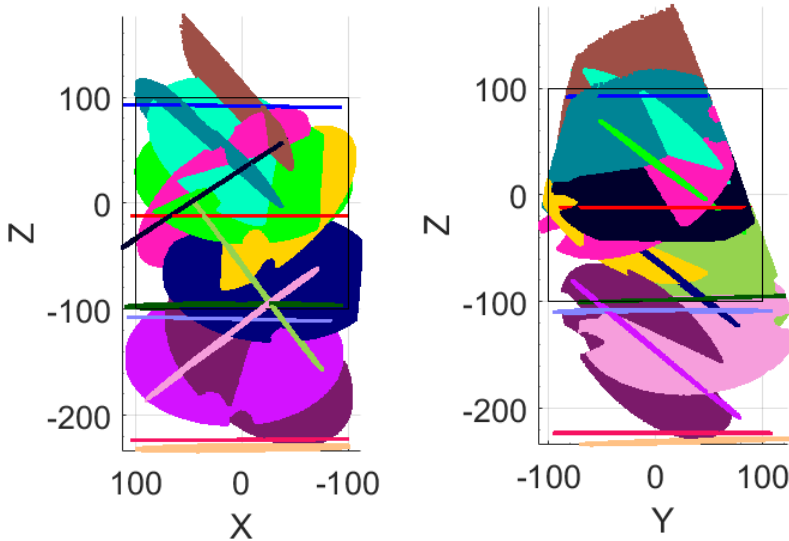


Figura 147 – Visita superior e lateral de todas as medições do plano na água em posições não controladas.

Plano - Comparação das medições

A tabela 39 lista o desvio mínimo, máximo e desvio padrão (σ) para as medições na água processadas com o modelo SVP e Refra. Gerouse um histograma dos desvios obtidos no ar e água (SVP e Refra) (Figura 148). No caso dos resultados na água foram utilizados apenas os desvios das medições de 1-13, uma vez que as poses de 14-18 estão muito fora do volume de medição, sendo que o desvio padrão aumenta consideravelmente, chegando a quase o dobro do obtido nas poses de 1-13.

Tabela 39 – Desvio mínimo, máximo e σ [mm] para as medições na água processadas com o modelo SVP e Refra. Posições em itálico (14-18) estão muito fora do volume de medição e não foram utilizadas no cálculo do histograma.

Cor	Aquisição #	Água (SVP)			Água (Refra)		
		Min	Max	σ	Min	Max	σ
	1	-0,09	0,09	0,026	-0,14	0,14	0,042
	2	-0,11	0,11	0,032	-0,10	0,10	0,030
	3	-0,10	0,10	0,030	-0,11	0,11	0,032
	4	-0,07	0,07	0,022	-0,06	0,06	0,018
	5	-0,04	0,04	0,012	-0,04	0,04	0,013
	6	-0,10	0,10	0,030	-0,08	0,08	0,026
	7	-0,20	0,20	0,062	-0,13	0,13	0,039
	8	-0,21	0,21	0,063	-0,13	0,13	0,040
	9	-0,04	0,04	0,011	-0,04	0,04	0,011
	10	-0,07	0,07	0,021	-0,09	0,09	0,028
	11	-0,05	0,05	0,016	-0,05	0,06	0,017
	12	-0,12	0,12	0,038	-0,11	0,11	0,033
	13	-0,06	0,06	0,017	-0,06	0,06	0,018
	<i>14</i>	-0,13	0,13	0,040	-0,09	0,09	0,029
	<i>15</i>	-0,22	0,22	0,068	-0,12	0,12	0,037
	<i>16</i>	-0,13	0,14	0,041	-0,08	0,08	0,025
	<i>17</i>	-0,40	0,39	0,128	-0,21	0,21	0,062
	<i>18</i>	-0,40	0,38	0,135	-0,23	0,23	0,070

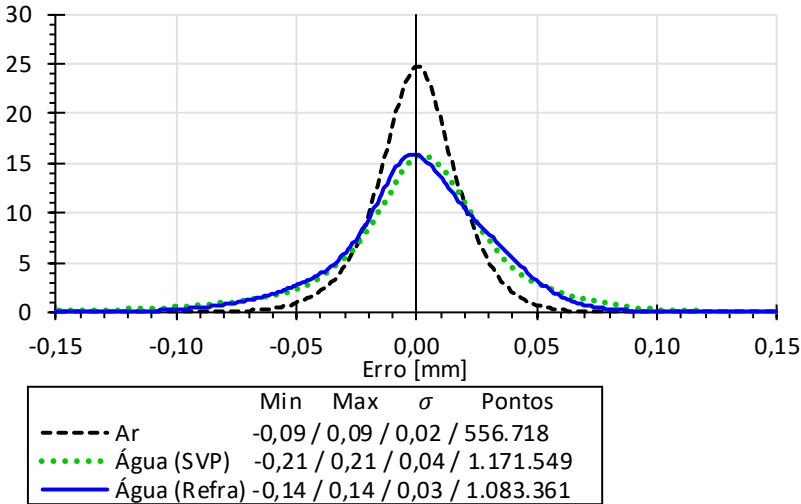


Figura 148 – Histograma normalizado (distribuição probabilidade, área = 1) do desvio ao plano obtido em posições aleatórias, referente a: seis medições no ar, medições de 1 a 13 na água com modelo SVP e Refra.

O desvio de três posições (5, 7 e 18) com as maiores diferenças entre o modelo SVP e Refra foram analisadas também em mapa de cores (Figura 149). Dentre elas, a que apresentou um maior desvio foi a posição 18, a qual se encontra bem fora do volume de medição ($Z \sim 230$ mm) e uma comparação entre os resultados é exposta na figura 150. Nota-se que a modelagem Refra ainda apresenta bons resultados, todavia, a aproximação por SVP apresenta erros da ordem de 0,3 a 0,4 mm nas bordas. Também é possível perceber erro devido a problemas no processamento/aquisição das franjas.

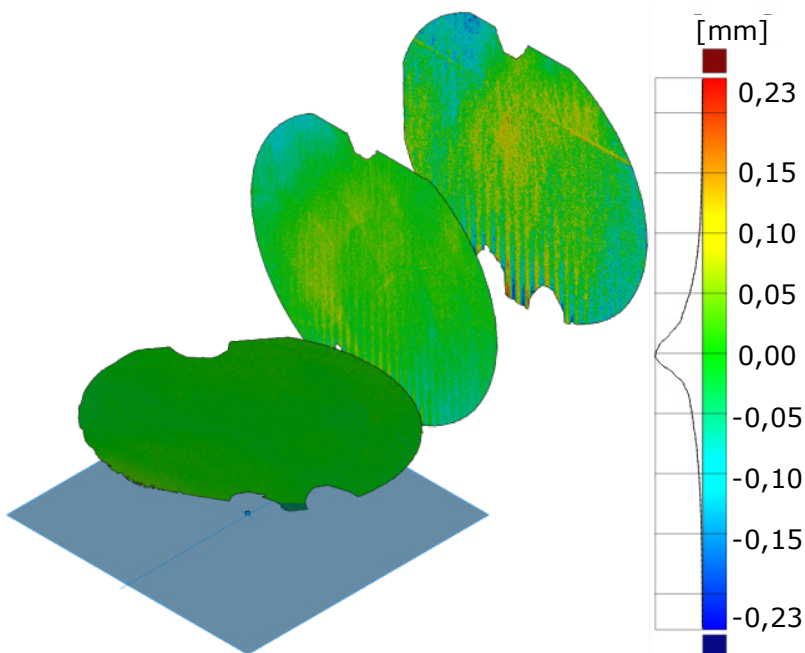


Figura 149 – Vista em perspectiva do desvio dos resultados na água (Refra) nas posições 5, 7 e 18 da medição do plano em posições aleatórias.

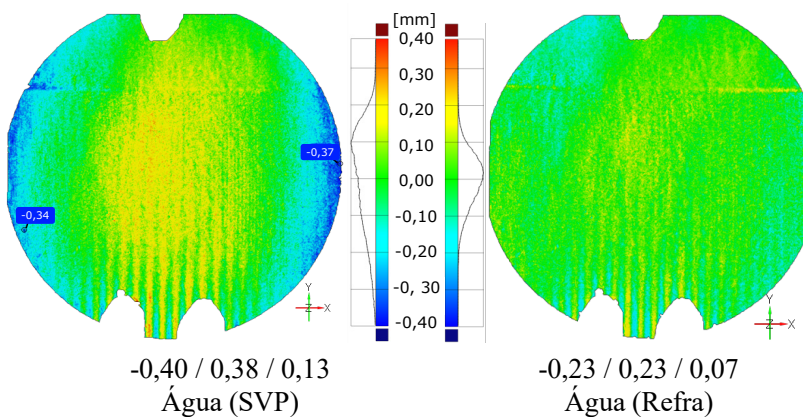


Figura 150 – Comparação entre os desvios obtidos com o modelo SVP e Refra na medição na água na posição 18 ($Z \sim 230$ mm). Os valores abaixo da legenda de cores que estão separados por “/” representam o desvio: mínimo, máximo e σ em milímetros. Nota-se erro devido a problemas no processamento das franjas em

ambos os casos. Já no processamento com o modelo SVP existe um erro sistemático nas bordas que chega a 0,4 mm.

6.7 AVALIAÇÃO COM PAR DE ESFERAS (VDI/VDE)

Foram feitas 16 medições das esferas no ar e 23 na água, sendo que as aquisições e processamento de dados foram baseados nas orientações do guia VDI/VDE-2634 (VDI/VDE-2634, 2008). É interessante notar que como a distância de referência entre as esferas é próxima a 100 mm (99,28 mm), o valor do erro pode ser também interpretado como um valor em porcentagem, por exemplo, um erro de 0,30 mm resulta em $(0,30/99,28) 0,302\%$ ou 0,30%.

Par de esferas - Ar

A figura 151 mostra as 16 posições aleatórias do par de esferas obtidas no ar. Para uma melhor visualização, as posições foram agrupadas de 5 em 5 (1 a 5, 6 a 10 e 11 a 15) e os pontos 3D removidos. A vista frontal, superior e em perspectiva de todas as esferas ajustadas as medições no ar, incluindo os pontos medidos são expostas na figura 152.

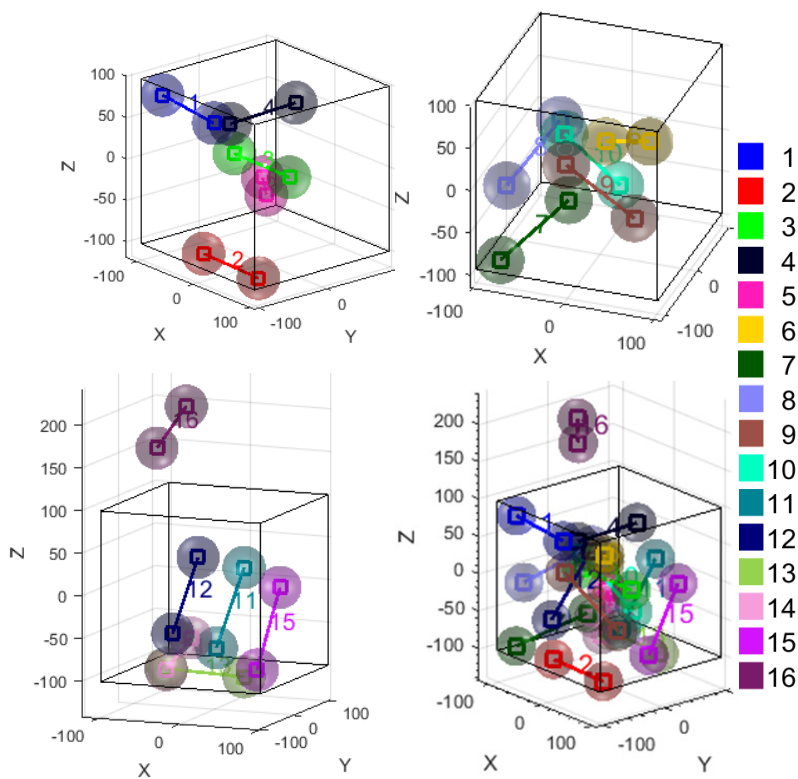


Figura 151 – Esferas ajustadas nas medições no ar do par de esferas em todas 16 posições aleatórias. Do canto esquerdo superior no sentido horário: posições 1 a 5, 6 a 10, 11 a 16 e todas. Volume de medição representado pelo cubo.

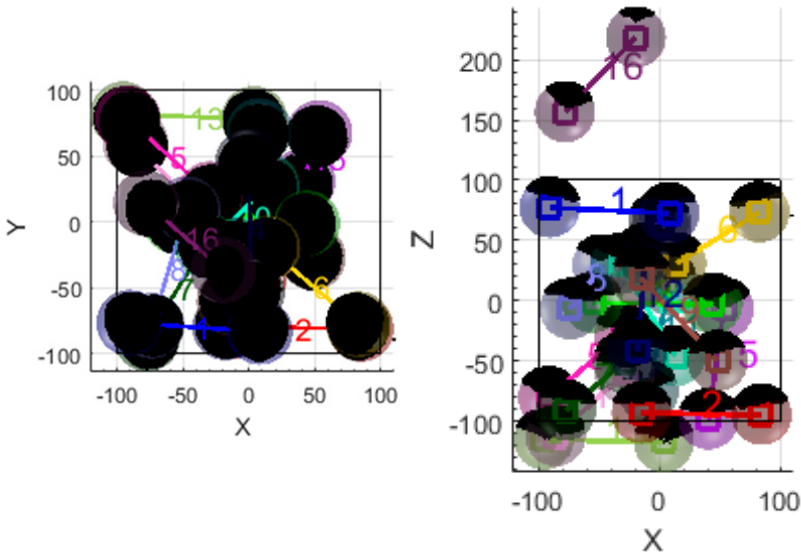


Figura 152 – Vista frontal e superior de todas 16 medições do par de esfera no ar incluindo pontos medidos. Volume de medição representando pelo cubo.

A tabela 40 expõe os erros obtidos para cada uma das posições. Mesmo a aquisição #16 que extrapola o volume de medição em mais de 100 mm em Z possui erro similar aos demais e foi mantida na avaliação. A posição #15 foi a que resultou em um maior erro de escala ($SSE = 0,21$ mm) e a #13 maior erro de apalpação ($PE_1 = 0,26$ mm). A medição #15 foi obtida em posição muito similar a #12, onde o SSE foi de apenas 0,06 mm. Sendo assim, é provável que esse erro esteja relacionado a algum problema no mapa de fase ou em seu processamento durante a triangulação inversa.

Os erros expostos na tabela 40 foram plotados (Figura 153) em relação ao ângulo do vetor distância dos centros das esferas com o eixo Z ($L_{PV} \angle Z$). Não é possível notar relação significativa entre a direção do vetor das esferas e o erro.

Tabela 40 – Legenda de cores das posições do par de esferas e compilação do erro de distância entre centros (SSE) e apalpação (PE_1 e PE_2). Última coluna expõe o ângulo entre o vetor ($\overline{c_1c_2} = L_{PV}$) e o eixo Z no SCO ($L_{PV}\angle Z$). Os erros possuem escalas de cores do verde (menor) ao vermelho (maior). Os ângulos possuem escala reversa de cores.

Cor	#	<i>SSE</i>	<i>PE</i> ₁	<i>PE</i> ₂	<i>L</i> _{PV} $\angle Z$
	1	0,03	0,14	0,09	87°
	2	0,06	0,13	0,17	89°
	3	0,12	0,09	0,09	90°
	4	0,08	0,11	0,08	89°
	5	0,11	0,14	0,13	59°
	6	0,13	0,09	0,13	65°
	7	-0,05	0,11	0,12	67°
	8	0,03	0,10	0,09	68°
	9	0,10	0,09	0,12	46°
	10	0,12	0,09	0,11	40°
	11	0,16	0,11	0,10	27°
	12	0,06	0,09	0,09	36°
	13	0,17	0,26	0,11	89°
	14	0,17	0,17	0,11	58°
	15	0,21	0,16	0,11	23°
	16	0,12	0,11	0,07	51°
Máximo		0,21	0,26	0,17	-

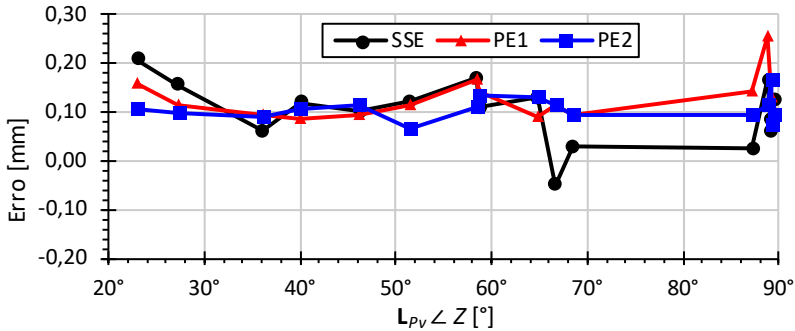


Figura 153 – Gráfico do SSE e PE Vs ângulo do vetor distância das esferas relativo à Z para as 16 diferentes posições do par de esferas no ar.

Par de esferas – Água

As figuras 154 e 155 mostram o sistema durante uma das medições das esferas na água. Já a figura 156 mostra as imagens obtidas pelo sistema e pela terceira câmera durante a medição #11. Os mapas de fase obtidos são expostos na figura 157.

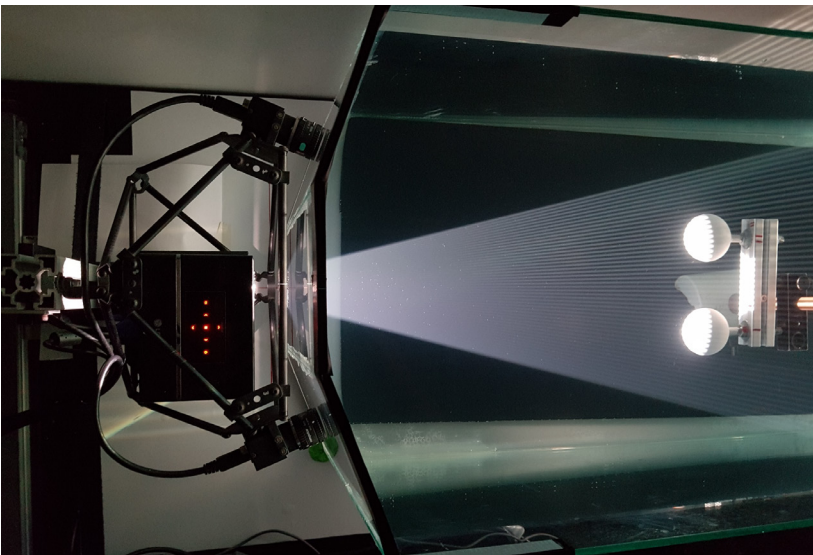


Figura 154 – Par de esferas durante uma das medições na água.

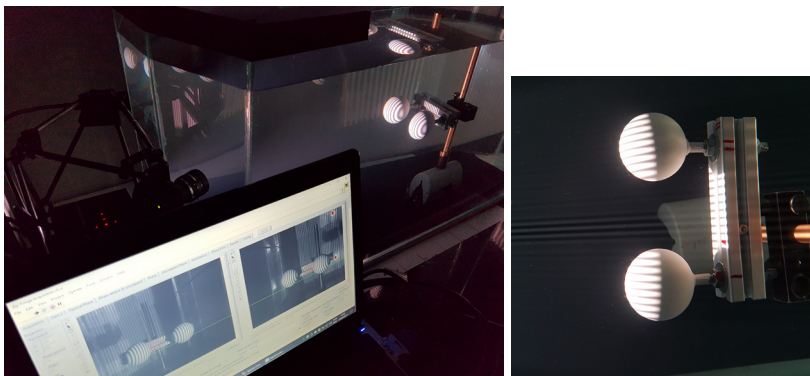


Figura 155 – Foto durante medição do par de esferas onde é possível ver a tela do notebook com a imagem obtida pelo sistema estéreo (esquerda). Detalhe das esferas (direita).

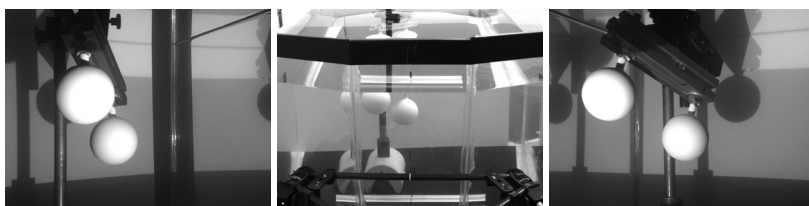


Figura 156 – Imagem obtida pela câmera esquerda, central e direita durante a medição #11.

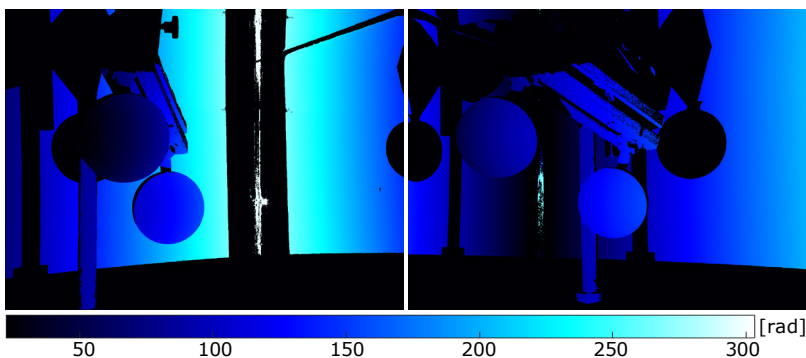


Figura 157 – Mapas de fase obtidos para a medição #11.

Na água, foram adquiridas 23 posições aleatórias do par de esferas, abrangendo todo volume de medição, sendo que quatro medições o

extrapolam (número 1, 21, 22 e 23). As esferas ajustadas às medições na água (Refra) podem ser vistas na figura 158. Já a figura 159 mostra também as nuvens de pontos obtidas. Nota-se uma boa distribuição das medições dentro do volume de medição. A estimativa do erro de escala, dada pelo erro de distância entre esferas (*SSE*), o erro de apalpação (*PE*) e o ângulo em relação ao eixo ($\angle Z$) são expostos na tabela 41. Os dados foram plotados em relação ao ângulo de orientação das esferas na figura 160. O maior *SSE* para o modelo SVP e Refra foi de 0,26 mm, respectivamente para as posições #13 e #23, ambas com ângulo pequeno em reação ao eixo Z ($L_{PV}\angle Z$), o que pode indicar um maior erro de escala na profundidade (coordenada Z). Dentre as medições fora do volume de medição, duas delas apresentaram um erro maior do que as outras, sendo essas as de número 22 e 23, posicionadas em torno de 100 mm mais afastadas do sistema.

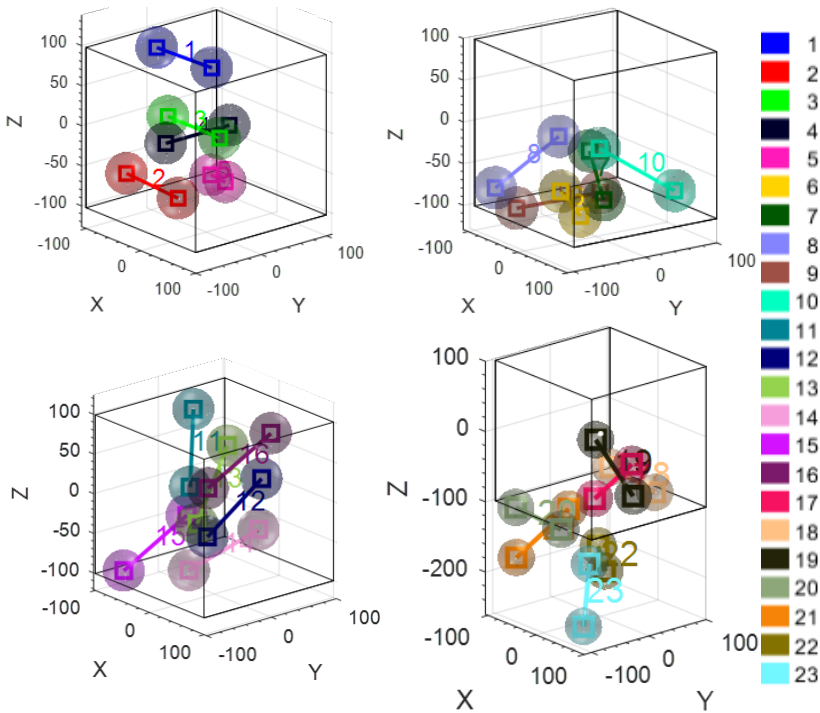


Figura 158 – Resultado de medição do par de esferas na água (Refra) em 23 posições aleatória e respectivas esferas ajustadas. Do canto esquerdo superior no

sentido horário: posições 1 a 5, 6 a 10, 11 a 16 e todas (incluindo os pontos medidos). Volume de medição no ar representado pelo cubo.

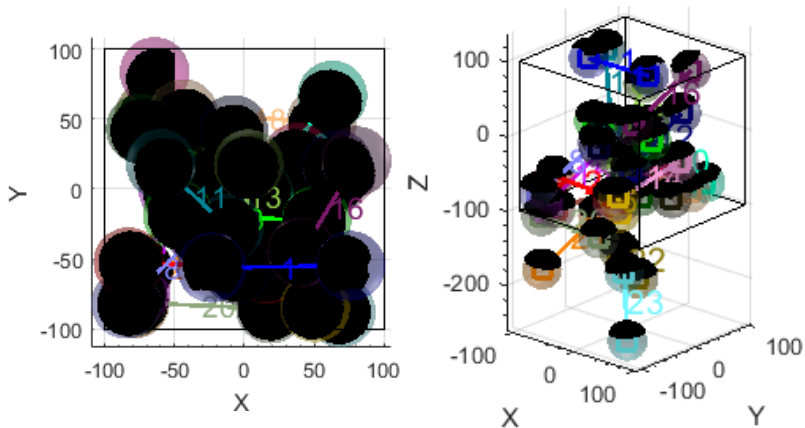


Figura 159 – Vista frontal e em perspectiva de todas 23 medições do par de esfera na água (Refra).

Tabela 41 – Legenda de cores das posições do par de esferas e compilação do erro de distância entre centros (SSE), apalpação (PE 1 e 2) para medição na água com modelo SVP e Refra. Última coluna expõe o ângulo entre o vetor distância dos centros das esferas ($\overline{\mathbf{c}_1\mathbf{c}_2} = \mathbf{L}_{PV}$) e o eixo Z no SCO ($\mathbf{L}_{PV}\angle Z$). Os erros possuem escalas de cores do verde (menor) ao vermelho (maior). Os ângulos possuem escala reversa de cores.

Cor	#	Água (SVP)				Água (Refra)			
		SSE	PE_1	PE_2	$\mathbf{L}_{PV}\angle Z$	SSE	PE_1	PE_2	$\mathbf{L}_{PV}\angle Z$
	1	0,22	0,13	0,14	89	-0,09	0,16	0,14	89
	2	0,09	0,10	0,10	88	0,01	0,11	0,10	89
	3	0,10	0,10	0,09	90	0,09	0,10	0,10	89
	4	0,00	0,07	0,10	90	0,06	0,07	0,10	89
	5	0,13	0,12	0,10	66	0,09	0,12	0,10	66
	6	0,00	0,14	0,11	58	0,04	0,14	0,11	57
	7	0,11	0,09	0,11	71	0,06	0,10	0,13	72
	8	0,12	0,09	0,10	48	-0,07	0,15	0,08	48
	9	0,00	0,15	0,12	82	0,00	0,15	0,12	83
	10	0,08	0,10	0,12	61	0,15	0,10	0,13	60
	11	0,16	0,08	0,09	41	0,16	0,08	0,09	42
	12	0,10	0,12	0,11	40	0,17	0,11	0,11	40
	13	0,19	0,12	0,10	27	0,26	0,11	0,10	27
	14	0,06	0,11	0,11	56	0,10	0,12	0,11	56
	15	0,08	0,15	0,12	52	-0,03	0,15	0,12	53
	16	0,17	0,09	0,12	49	0,14	0,08	0,15	49
	17	0,13	0,15	0,10	47	0,15	0,16	0,11	47
	18	0,12	0,11	0,12	85	0,14	0,11	0,13	86
	19	0,16	0,10	0,13	55	0,18	0,11	0,14	55
	20	0,08	0,14	0,11	88	0,00	0,14	0,11	88
	21	0,22	0,14	0,10	45	-0,16	0,17	0,10	45
	22	0,03	0,16	0,18	90	-0,02	0,18	0,19	90
	23	0,26	0,14	0,23	51	0,02	0,15	0,22	52
Máximo		0,26	0,16	0,23	27	0,26	0,18	0,22	27

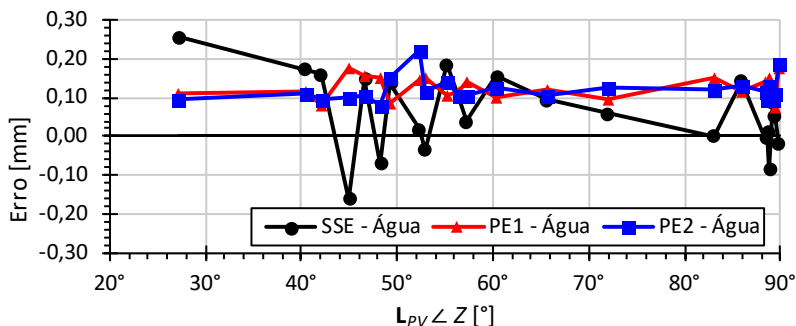


Figura 160 – Gráfico de *SSE* e *PE* Vs ângulo do vetor distância das esferas relativo à *Z* para as 23 diferentes posições do par de esferas na água (Refra).

Comparação entre os erros no ar e na água

As tabelas 42 e 43 compilam os erros de escala (*SSE*) e apalpação ($PE = \max(PE_1, PE_2)$) obtidos durante os ensaios com as esferas no ar e na água. Os gráficos das figuras 161 e 162 expõe, respectivamente, em ordem de aquisição e ângulo em relação à *Z*, o erro da distância entre centros e apalpação para a medição no ar e água (Refra). Não foram plotados os resultados com o modelo SVP, pois estes são bem próximos aos obtidos com o modelo Refra. Nota-se uma tendência em torno de 0,1 mm maior na água do que a obtida no ar. O erro de escala na água aparenta flutuar mais e possui valores extremos maiores, chegando a um mínimo e máximo respectivamente de -0,16 mm e 0,26 mm contra -0,05 mm a 0,21 mm no ar. Foram plotados também os histogramas de *SSE* (Figura 163) e *PE* (Figura 164) no ar e água (Refra).

Tabela 42 – Valor máximo, mínimo, médio e desvio padrão dos erros de distância entre centros (*SSE*) em milímetros obtido para os três casos de medição.

<i>SSE</i>	Ar	Água (SVP)	Água (Refra)
Min	-0,050	-0,001	-0,160
Max	0,208	0,255	0,255
Médio	0,100	0,112	0,063
σ	0,065	0,070	0,100

Tabela 43 – Valor máximo, mínimo, médio e desvio padrão dos erros de apalpação (*PE*) em milímetros obtido para os três casos de medição.

<i>PE</i>	Ar	Água (SVP)	Água (Refra)
Min	0,09	0,09	0,09
Max	0,26	0,23	0,22
Médio	0,13	0,13	0,14
σ <i>PE</i>	0,04	0,03	0,03

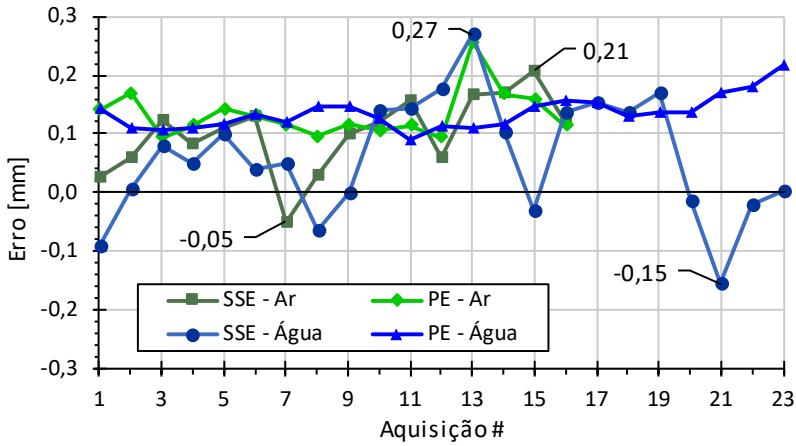


Figura 161 – SSE e PE no ar e na água para cada aquisição. SSE mínimos e máximos indicados.

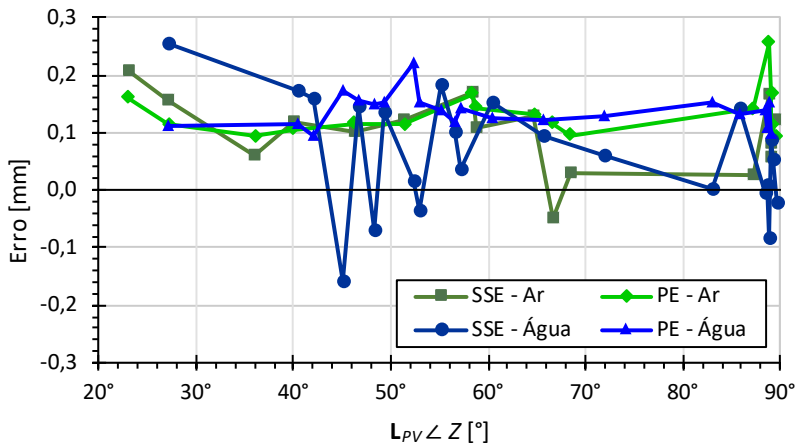


Figura 162 – SSE e PE da medição do par de esferas no ar e na água *Vs* o ângulo de orientação das esferas em relação a Z no SCO.

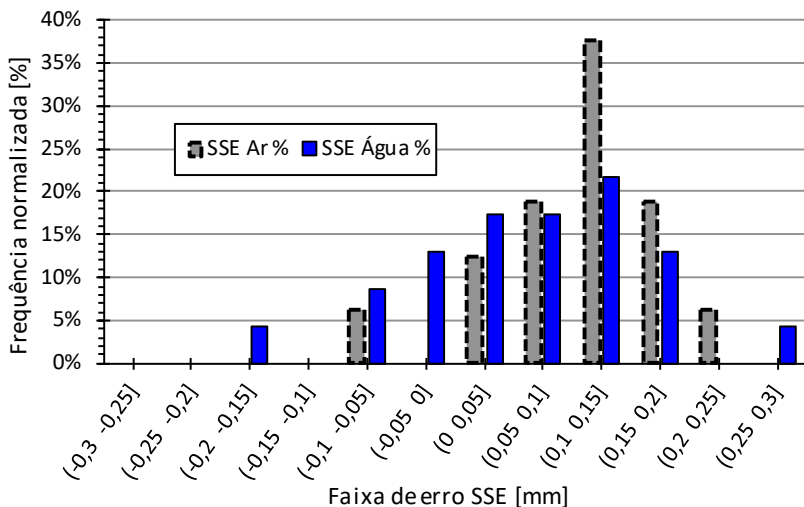


Figura 163 – Histogramas normalizados do SSE no ar e na água.

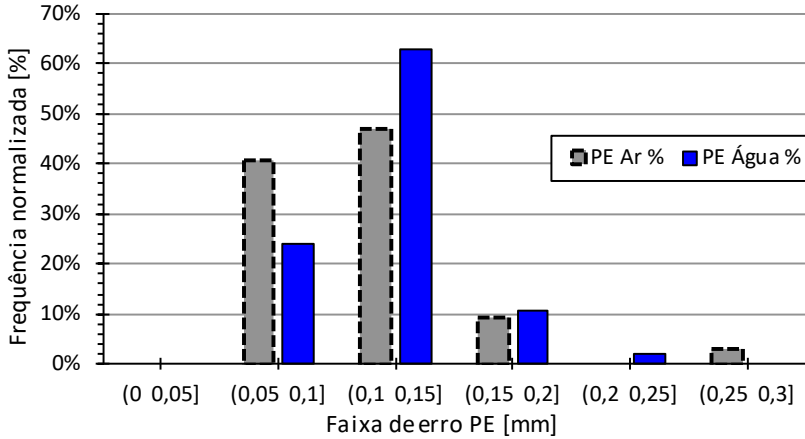


Figura 164 – Histograma do erro de apalpação (*PE*) no ar e na água.

O gráfico da figura 165 compara o erro da distância entre centros (*SSE*) para os três casos de medição, no ar, na água (*SVP*) e na água (*Refra*) em relação ao ângulo entre o vetor centros e o eixo *Z*.

Conforme previamente descrito, o erro de apalpação (*PE*) é um erro extremo, dado pela máxima variação do erro obtido na nuvem de pontos de cada esfera, descontado três pontos a cada mil. Esse erro não fornece uma real noção da variação do erro nas medições. Sendo assim, foi plotado o histograma (Figura 166) de todos os erros, já removidos os piores pontos. Nota-se que os histogramas para o ar e água são relativamente parecidos, sendo que o desvio padrão no ar foi de 0,016 mm contra 0,019 mm e 0,020 na água (*SVP* e *Refra*). Para um intervalo de confiança de 2σ , 95% dos valores estão no intervalo de $\pm 0,032$ mm no ar e $\pm 0,040$ mm na água.

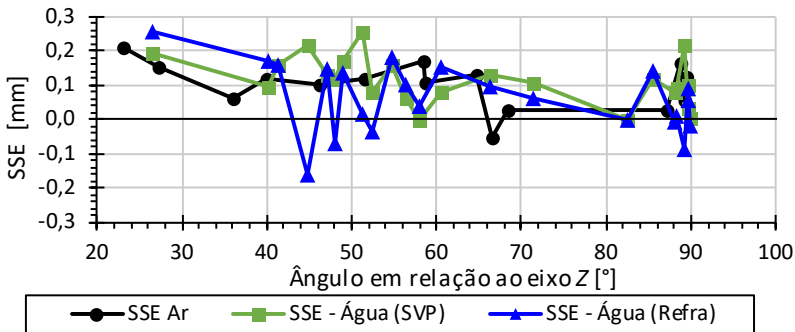


Figura 165 – Erro da distância entre centros das esferas (SSE) para as medições no ar, água (SVP) e água (Refra) em relação ao ângulo entre o vetor centros e o eixo Z.

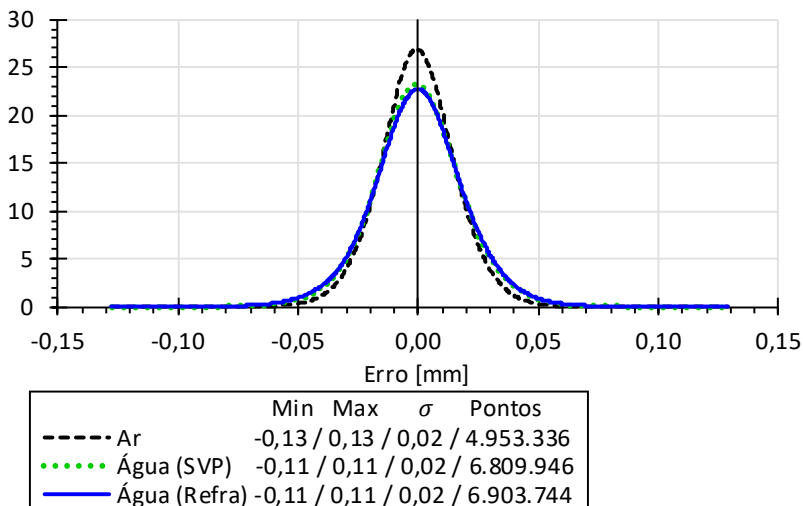


Figura 166 – Histograma de desvios (PE) das medições do par de esferas no ar, água (SVP) e água (Refra). Erro dado pela distância normal de cada ponto medido em relação à superfície da esfera de raio fixo ajustada.

6.8 COMPARAÇÃO DE TODOS OS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos nas avaliações previamente descritas foram compilados no gráfico de barras da figura 167. Os dados estão divididos em três grupos: 1. Erro aleatório ou de apalpação; 2. Desvio padrão dos erros sistemáticos e 3. Erros sistemáticos máximos. Nota-se que, de um

modo geral, a aproximação por modelo SVP foi suficiente para a compensação dos efeitos da refração, tendo resultados similares aos obtidos com o modelo físico de refração (Refra). Conforme ilustra a tabela 44, os resultados obtidos na água tendem a um aumento no erro.

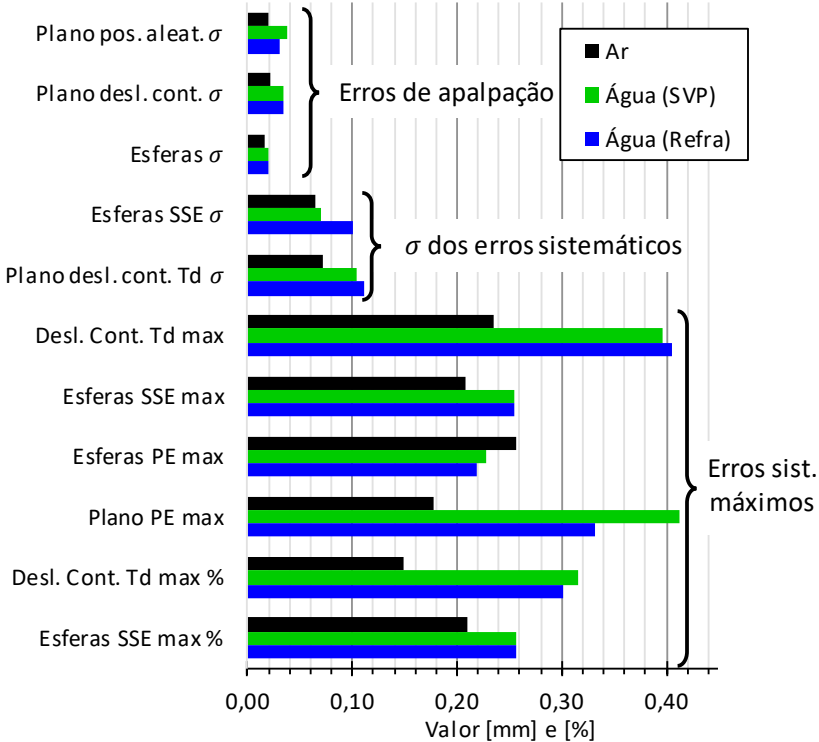


Figura 167 – Compilação dos resultados obtidos com a medição no ar, água (SVP) e água (Refra).

Tabela 44 – Compilação dos resultados (em milímetros e %) e comparação da diferença relativa entre Água (Refra) e Ar.

Item	Ar	Água (SVP)	Água (Refra)	Água (Refra)/Ar [%]
Plano pos. aleat. σ	0,019	0,037	0,031	63,2%
Plano desl. cont. σ	0,022	0,035	0,035	59,1%
Esferas σ	0,016	0,019	0,020	25,0%
Esferas SSE σ	0,065	0,070	0,100	55,0%
Plano desl. cont. Td σ	0,072	0,104	0,111	54,7%
Desl. Cont. Td max	0,235	0,396	0,404	72,3%
Esferas SSE max	0,208	0,255	0,255	22,8%
Esferas PE max	0,256	0,227	0,219	-14,5%
Plano PE max	0,178	0,413	0,331	86,0%
Desl. Cont. Td max %	0,15%	0,32 %	0,30%	103,1%
Esferas SSE max %	0,21%	0,26 %	0,26%	22,8%

6.9 BALANÇO DE INCERTEZAS

Existem diversos fatores que influenciam na incerteza de medição de um sistema de visão estéreo ativo com projeção de franjas no ar e na água. A tabela 45 faz uma compilação destes fatores, os quais foram divididos entre os com maior contribuição no erro sistemático/escala e no erro aleatório.

Tabela 45 – Principais fontes de incerteza de um sistema de visão estéreo ativo com projeção de franjas utilizado no ar e através de interfaces de refração (ex.: medição na água).

Meio	Erro sistemático ou de escala	Erro aleatório
Ar	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do padrão de calibração • Qualidade da lente • Ângulo e distância entre as câmeras • Método de calibração • Temperatura (alterações devido ao aquecimento do equipamento ou temperatura ambiente e do objeto mensurado) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruído no sensor da câmera • Resolução do sensor • Qualidade da lente • Resolução e potência do projetor • Vibração
Água	<ul style="list-style-type: none"> • Todos a cima • Alterações no índice de refração (temperatura, salinidade, pressão) • Imperfeições na janela • Aberrações cromáticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos a cima • Partículas em suspensão • Espalhamento • Influência de iluminação externa como o efeito caustico dinâmico na superfície da água (<i>flickering</i>)

Como o erro de medição sofre diretamente com o índice de refração da água, considerou-se uma variação de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Esta variação tem influência no índice de refração da água ($\Delta\mu_2 = 2 \times 10^{-4}$) e na dimensão dos objetos calibrados utilizados na avaliação do sistema. A seguir são descritas as fontes de incerteza o balanço resultante.

Componente sistemática - Erro de escala relativo (*EER* em %)

O erro de escala, ou erro sistemático do sistema, depende da distância entre pontos. Sendo assim, foi considerado separado do balanço de incertezas. O erro de escala foi definido com base no erro da distância

entre esferas (SSE). Apesar do erro relativo (%) máximo obtido nos deslocamentos controlados do padrão plano (0,33%) ser maior que o máximo SSE relativo (0,26%), optou-se pelo uso do SSE , uma vez que na avaliação do deslocamento relativo a distorção dos pontos devido ao erro sistemático pode alterar significativamente a posição do plano ajustado, influenciando negativamente o resultado.

Como a variação térmica altera o índice de refração e consequentemente o SSE , avaliou-se qual a sua variação com a mudança do índice de refração. As aquisições foram então reprocessadas com os diferentes índices de refração (índice obtido na calibração $\pm \Delta\mu_2$). A variação entre eles foi de $\pm 0,015\%$ (valor absoluto já em %). Por fim, o erro de escala relativo final foi considerado como a soma: $0,257\% + 0,015\%$, obtendo-se:

$EER = 0,272\%$ em relação à maior distância 3D do objeto medido.

A seguir são descritos os componentes aleatórios do balanço de incerteza.

1. Repetibilidade natural (v_{Re})

O erro aleatório do sistema foi considerado como o desvio padrão dos desvios obtidos na medição das esferas, onde foram medidos quase 7 milhões de pontos. Considerando o coeficiente de expansão de 2 para 95,45% de confiabilidade, tem-se:

$Re = 2 \times 0,020 = 0,040$ mm, em um total de 6.903.744 pontos. Como o número de graus de liberdade é muito alto, considerou-se como infinito. Dividindo Re pelo menor valor do coeficiente de *Student*, obtém-se a incerteza padrão:

$$v_{Re} = \frac{0,040}{2} = 0,020 \text{ mm.}$$

2. Variação de Re devido à variação do índice de refração (v_{TRE})

Os valores obtidos de repetibilidade podem variar com o índice de refração. Sendo assim, as aquisições das esferas foram reprocessadas com $\mu_2 = \mu_2 \pm \Delta\mu_2$. A variação na repetibilidade foi de 0,0020 mm, considerando distribuição retangular, então divide-se o valor por $\sqrt{3}$ para obter a incerteza padrão:

$$v_{TRE} = \frac{0,0020}{\sqrt{3}} = 0,0012 \text{ mm.}$$

3. Erro de forma do padrão de esferas (v_{DP})

O erro de forma das esferas combinada com a incerteza da máquina de medir por coordenadas (MMC) é de 0,055 mm. Como no cálculo do erro de apalpação utiliza-se o raio, a incerteza foi dividida pela metade. A incerteza padrão obtida foi de:

$$v_{DP} = \frac{0,0275}{\sqrt{3}} = 0,0159 \text{ mm.}$$

4. Deriva térmica do padrão – Distância entre esferas (v_{TLp})

A incerteza da distância das esferas utilizada no cálculo do SSE devido à variação de temperatura ($\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$) durante os experimentos foi considerada como uma fonte de incerteza aleatória. A equação da dilatação térmica linear é dada por:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (37)$$

sendo $L = L_p = 99,283$ mm a distância entre esferas; $\alpha = 22 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{m}}{\text{mK}}\right)$ o coeficiente de dilatação térmica do alumínio e $\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$ a variação de temperatura considerada. Tem-se então:

$$22 \cdot 10^6 \cdot 99,283 \cdot 2 = 0,0044 \text{ mm.}$$

A incerteza padrão obtida foi de:

$$v_{TLp} = \frac{0,0044}{\sqrt{3}} = 0,0025 \text{ mm.}$$

5. Deriva térmica do padrão – Diâmetro das esferas (v_{TLp})

No caso do erro aleatório de apalpação, considerou-se a variação do raio da esfera devido à temperatura. Utilizando a equação (47), sendo: $L = D_p/2 = 25,059$ mm e o coeficiente de dilatação térmica do aço $\alpha = 14 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{m}}{\text{mK}}\right)$ Chega-se a:

$$14 \cdot 10^6 \cdot 25,059 \cdot 2 = 0,0007 \text{ mm,}$$

A incerteza padrão obtida foi de:

$$v_{TLp} = \frac{0,0007}{\sqrt{3}} = 0,0004 \text{ mm.}$$

Balanco de incertezas do erro aleatório

Uma vez calculados os parâmetros de maior influência no erro aleatório (ou sistemático não relativo), realizou-se o balanço de incertezas exposto na tabela 46.

Tabela 46 – Balanço de incerteza da componente aleatória e erro sistemático não proporcional à distância medida.

Símbolo	Fonte de incerteza	Correção	a	Dist.	v	ν	Contrib. %
R_e	Repetibilidade natural	0	0,0400	Normal	0,0200	∞	60,6%
TRE	Varição de R_e ($\Delta T \rightarrow \Delta \mu$)	0	0,0020	Retangular	0,0012	∞	0,2%
DP	Esfericidade do padrão de esferas	0	0,0275	Retangular	0,0159	∞	38,2%
TL_P	Distância entre esferas (ΔT)	0	0,0044	Retangular	0,0025	∞	1,0%
TD_P	Diâmetro das esferas (ΔT)	0	0,0007	Retangular	0,0004	∞	0,0%
C	Incerteza combinada	0	0,05	-	0,0257	∞	-

A incerteza combinada expandida foi de $U_C = 0,05$ mm. De posse do erro de escala relativo (EER) e da incerteza combinada da componente aleatória (U_C) do sistema, pode-se dizer que o resultado de medição de um ponto 3D no espaço distante L de outro ponto é dado por:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{M} \pm [L \times E_{ER} + U_C]) \text{ mm} \quad \text{ou} \quad \mathbf{M} = (\mathbf{M} \pm [L \times 0,27\% + 0,05]) \text{ mm.}$$

A figura 168 mostra o gráfico de erro máximo obtido ($EER + U_C$). Fica claro que a componente sistemática é a maior influência no erro de medição do sistema.

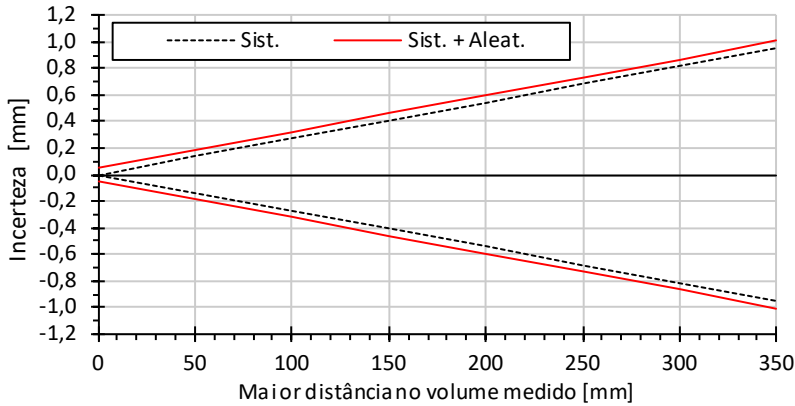


Figura 168 – Gráfico do erro máximo para medições na água com o modelo de refração (Refra). Nota-se que a componente aleatória é quase insignificativa se comparada ao erro sistemático relativo.

6.10 AVALIAÇÃO COM OBJETOS DE REFERÊNCIA

A seguir são comparados os resultados de medição com os objetos de referência (cabeça de manequim e cavidade preenchida com solda) obtidos com o sistema no ar, na água com o modelo SVP e com a modelagem física da refração (Refra). Conforme o balanço de incerteza realizado anteriormente, espera-se que 95% dos pontos medidos na água com o modelo de refração (Refra) estejam dentro do intervalo do gráfico de erro máximo da figura 168. As imagens e respectivos dados informativos utilizados na comparação seguem o padrão descrito na tabela 47. O desvio padrão é fornecido no *software* GOM sendo referente às distâncias (desvios ou erros) dos pontos medidos à superfície de referência (obtida na calibração da peça). O tempo de processamento está no formato “minutos:segundos” (mm:ss).

Tabela 47 – Padrão seguido nas figuras das comparações ar/água.

Ar	Água (SVP)	Água (Refra)
Malha de cor cinza	Malha de cor verde	Malha de cor azul
σ / N° de pontos / mm:ss	σ / N° de pontos / mm:ss	σ / N° de pontos / mm:ss

6.10.1 Cabeça de manequim

A cabeça de manequim foi medida tanto no ar quanto na água em três posições diferentes: frontal (face), lateral e traseira. A figura 169 mostra a configuração do experimento durante a medição da parte frontal na água. Na medição dentro da água, foi necessário inseri-la de cabeça para baixo devido ao comprimento do “pescoço” da peça. A figura 170 mostra a vista superior e um detalhe das franjas projetadas na face. Em ambas as figuras é possível ver claramente o trajeto do feixe de luz do projetor. A configuração das medições da parte lateral e traseira podem ser vistas na figura 171. A seguir os resultados obtidos são expostos.

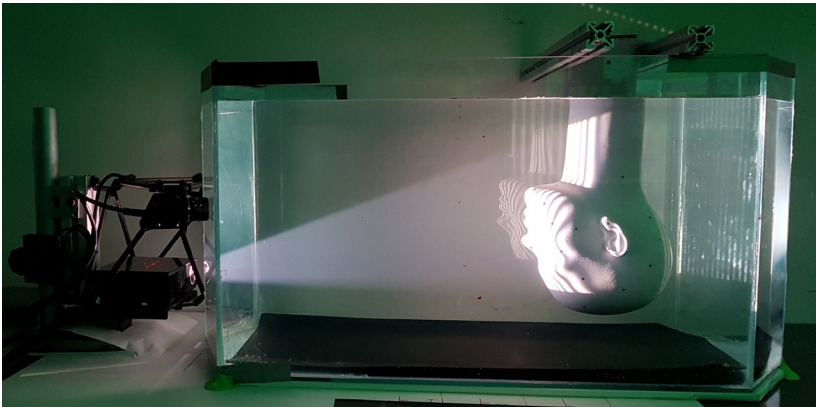


Figura 169 – Cabeça de manequim durante medição na água. É possível notar o trajeto da luz do projetor.

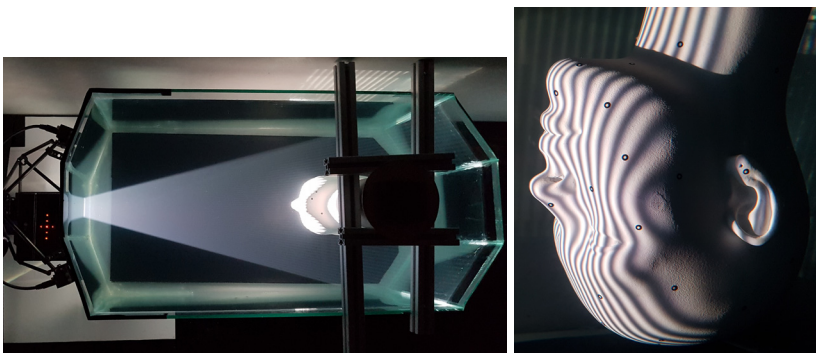


Figura 170 – Vista superior e detalhe de franjas projetadas sobre a face de manequim.

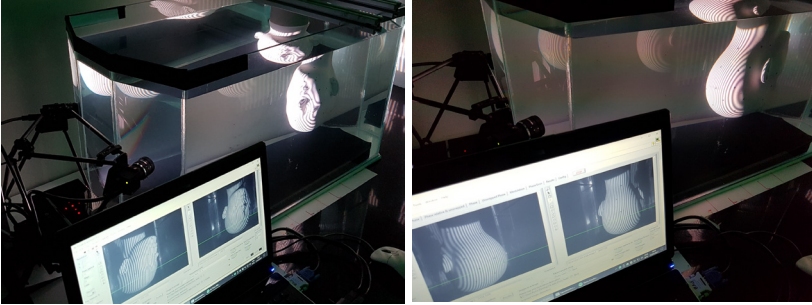


Figura 171 – Medição da parte lateral e posterior da cabeça de manequim.

Frontal (Face)

A figura 172 mostra as imagens obtidas pelo sistema durante a aquisição da parte frontal (face) da cabeça de manequim no ar e na água.

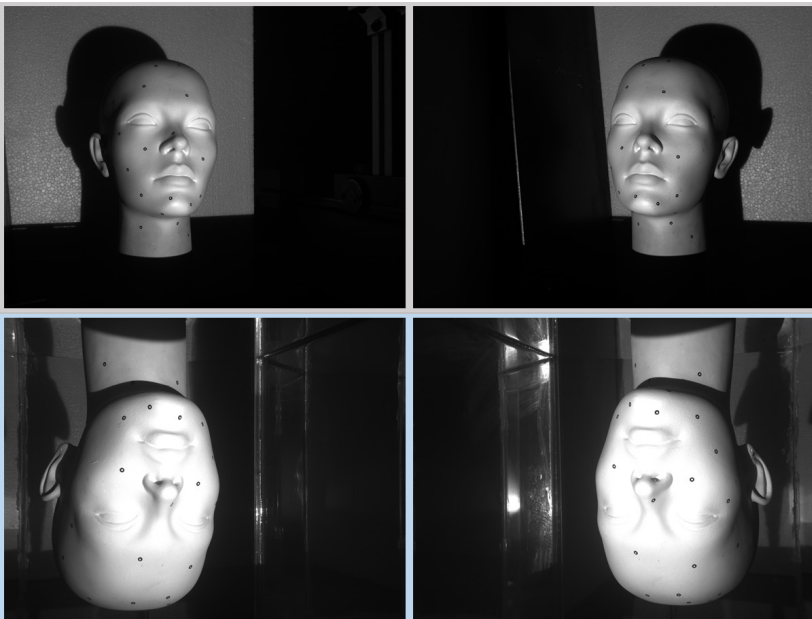


Figura 172 – Imagens adquiridas pelo sistema durante a medição da face no ar e na água (baixo).

O resultado obtido no ar e na água (Refra) são expostos na figura 173. O desvio obtido no ar (Figura 174) possui desvio padrão de 0,04 mm

contra 0,07 mm na água, para ambos os modelos (Figura 175). Nota-se (ver histograma) uma dispersão dos pontos um pouco maior no caso da modelagem Refra. A maior diferença entre as medições da face na água e no ar é o erro de escala que pode ser notado na região do pescoço, que fica em torno de 60 mm de distância da fase, sendo que as medições foram ajustadas à medição de referência pela região da face e não do pescoço, justamente com o intuito de verificar o erro de escala da face ao pescoço.

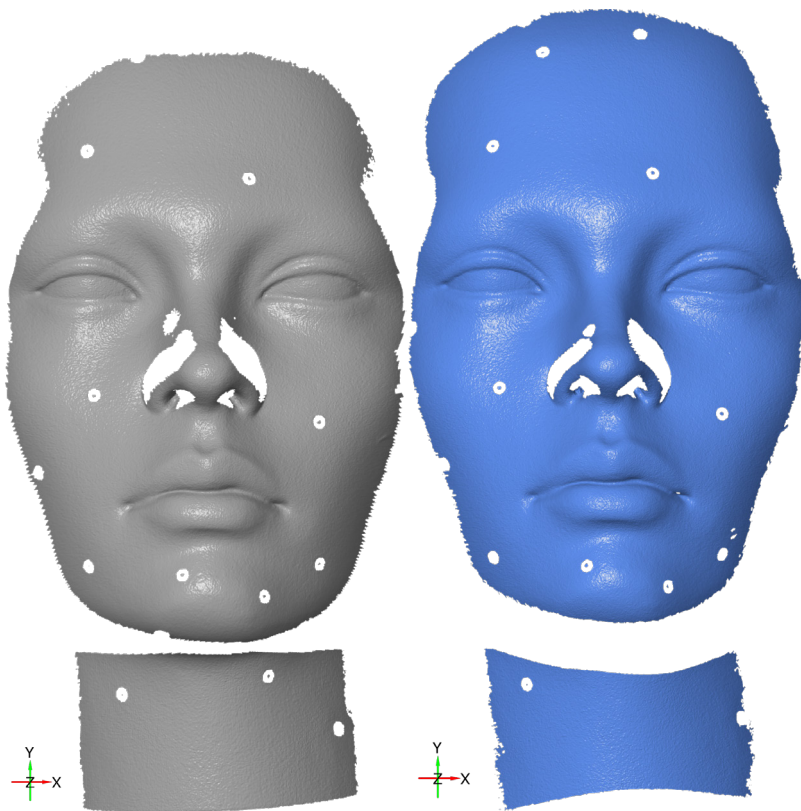
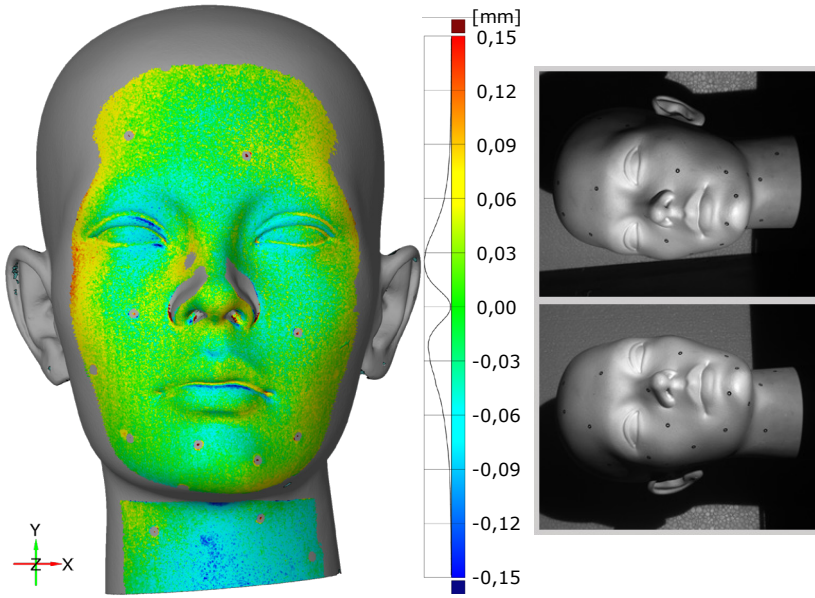


Figura 173 – Resultado de medição no ar e na água (Refra) da face de manequim.



0,04 / 1.765.551 / 00:29

Figura 174 – Desvio do resultado de medição frontal da cabeça de manequim no ar e visão (em recorte) do sistema durante aquisição.

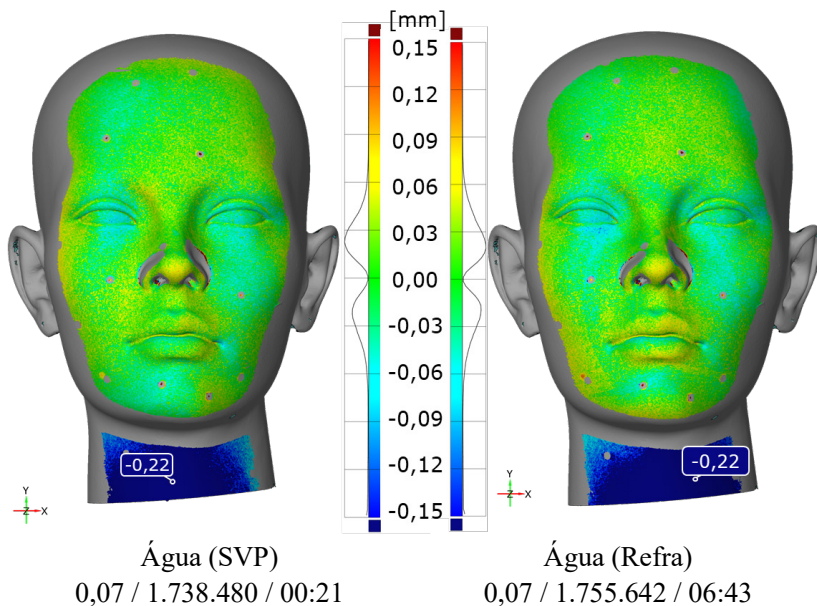


Figura 175 – Desvio do resultado de medição da face da cabeça de manequim na água com método SVP e Refra. Nota-se o maior tempo de processamento no método Refra devido a necessidade do cálculo do caminho da luz pelas interfaces de refração.

Lateral

A lateral da cabeça de manequim inclui a orelha, que é uma região complexa, com partes não visíveis (sombras) para uma das câmeras ou com obstrução da projeção. O resultado de medição na água (Refra) pode ser visto na figura 176 e os desvio no ar e água nas figuras 177 e 178.

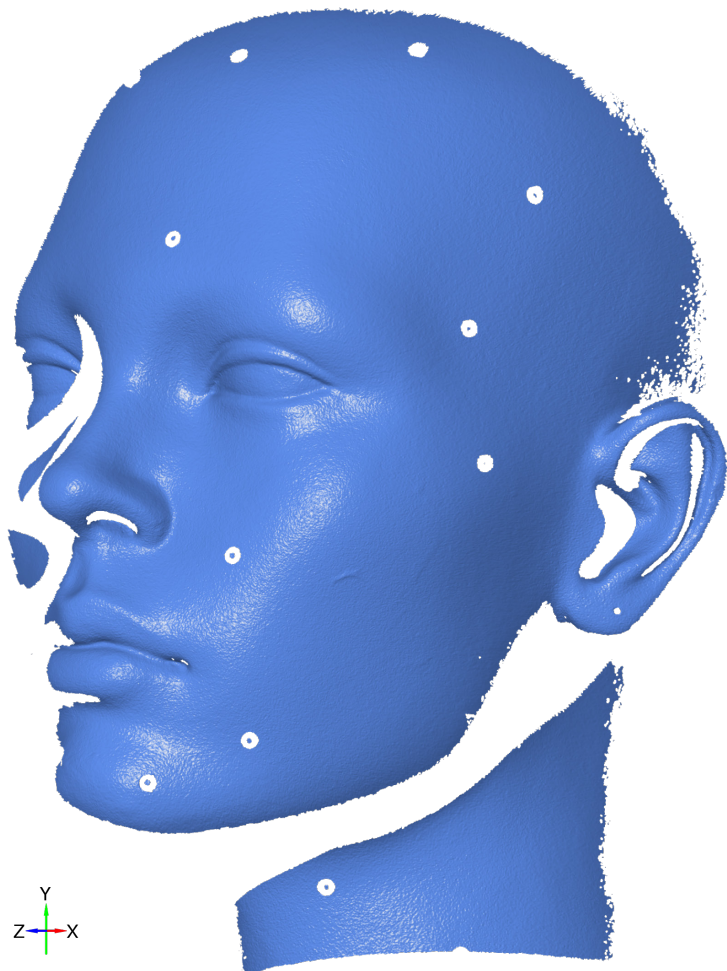
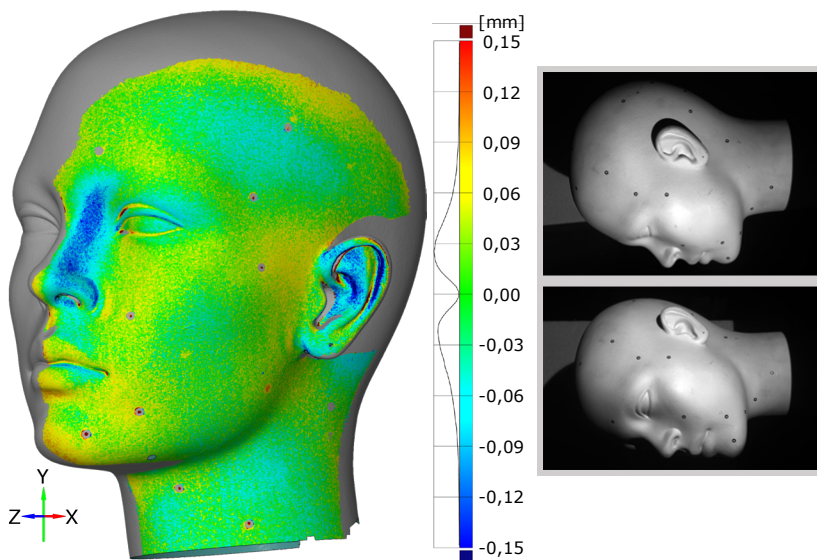


Figura 176 – Resultado de medição da parte lateral esquerda da face de manequim na água (Refra).



Ar

0,05 / 2.504.217 / 00:29

Figura 177 – Desvio do resultado de medição lateral da cabeça de manequim no ar e visão (em recorte) do sistema durante aquisição.

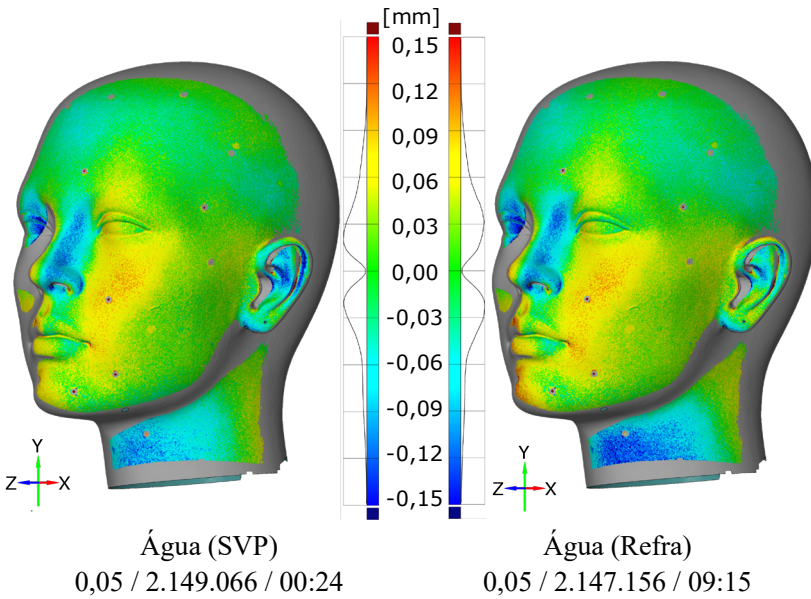


Figura 178 – Desvio do resultado de medição lateral da cabeça de manequim na água com método SVP e Refra (mesma da figura 176).

Posterior

A parte posterior da cabeça de manequim é uma região com variações suaves na superfície. O desvio do resultado obtido no ar e na água podem ser vistos nas figuras 179 e 180. Nota-se pouca variação no desvio padrão, que passa de 0,03 mm no ar para 0,04 mm na água.

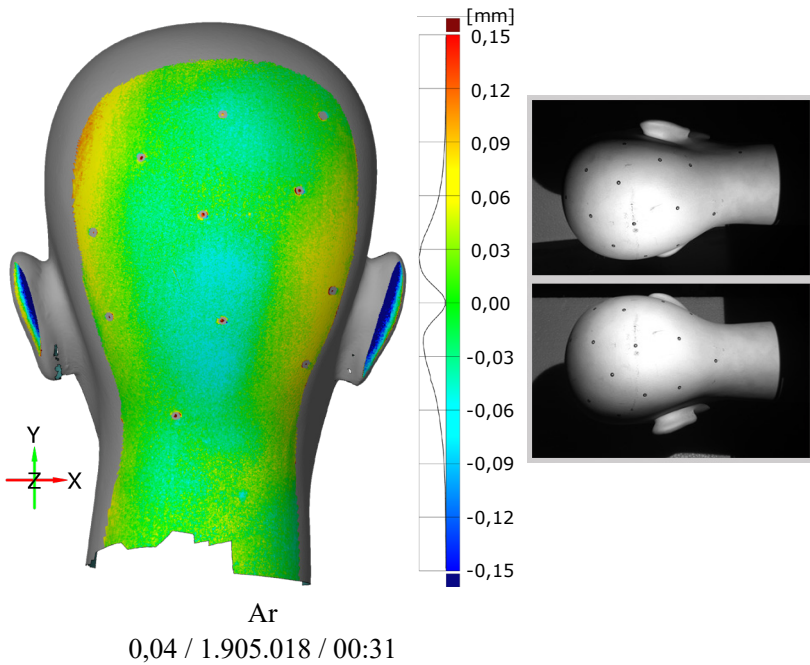


Figura 179 – Desvio do resultado de medição posterior da cabeça de manequim no ar e visão (em recorte) do sistema durante aquisição.

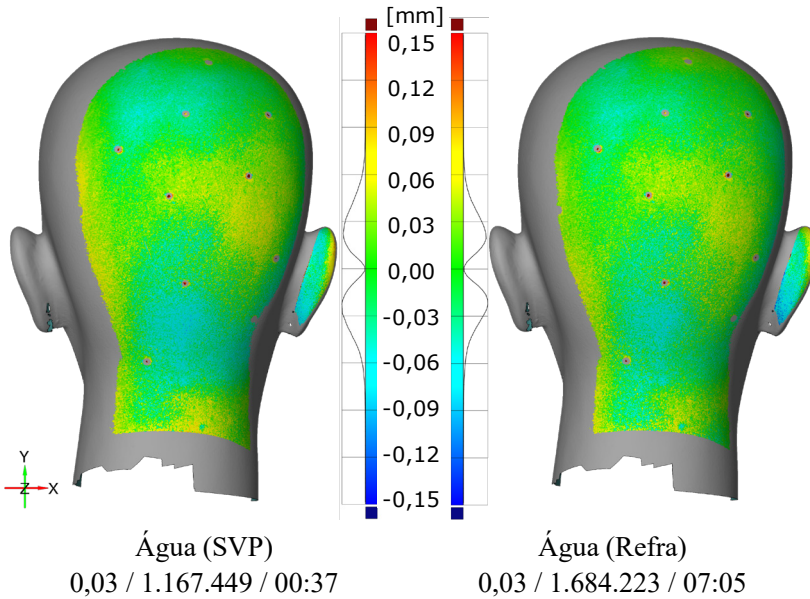


Figura 180 – Desvio do resultado de medição posterior da cabeça de manequim na água com método SVP e Refra.

6.10.2 Calibração SVP no ar utilizada para medições na água

A aquisição da face na água também foi processada utilizando a modelagem SVP com parâmetros obtidos no ar. A figura 181 expõe os resultados obtidos com esses parâmetros e também com a modelagem SVP na água e Refra. Na imagem fica claro que o uso do modelo SVP obtido no ar sem nenhum tipo de ajuste é inviável, pois a medição resultante sofre com um fator de escala (em torno de 1,33) e também com a perda da correspondência entre pontos na triangulação inversa, que causa o efeito de duplicação perpendicular à direção de maior sensibilidade do sistema (sentido de projeção das franjas). No caso, no eixo Y. Este efeito pode ser facilmente notado na duplicação dos alvos circulares no resultado de medição.

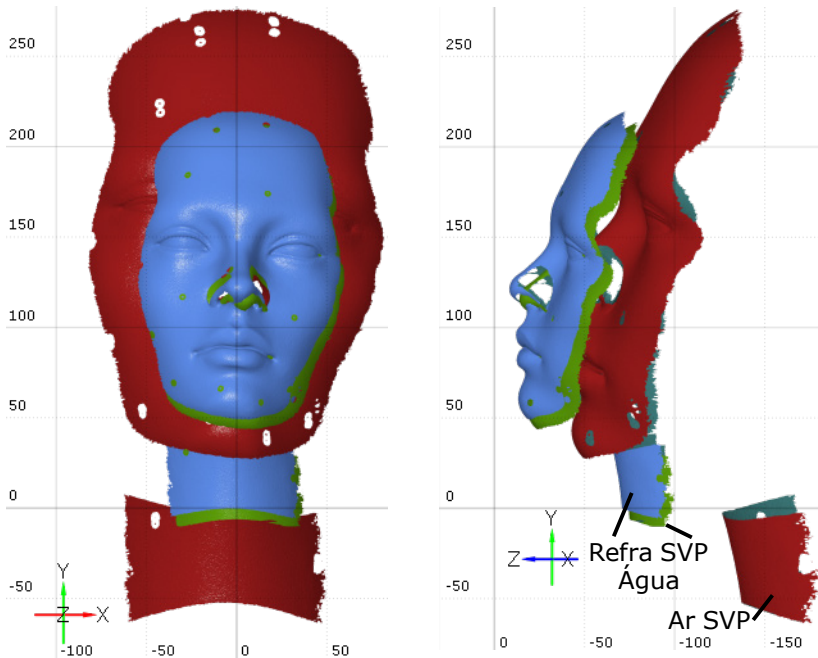


Figura 181 – Vista frontal e lateral dos resultados de medição da face de manequim na água utilizando o modelo SVP com parâmetros obtidos no ar (vermelho) e na água (verde) e com modelo de refração (Refra) obtido na água (azul).

6.10.3 Placa com cavidade preenchida com cordões de solda

A placa com réplica de defeito por cavitação preenchida com cordões de solda, foi medida tanto o ar quanto na água, conforme ilustram as figuras 182 e 183. A figura 184 mostra as imagens obtidas pelo sistema durante as aquisições em ambos os meios. Deve-se atentar que a peça não estava numa mesma distância do sistema.

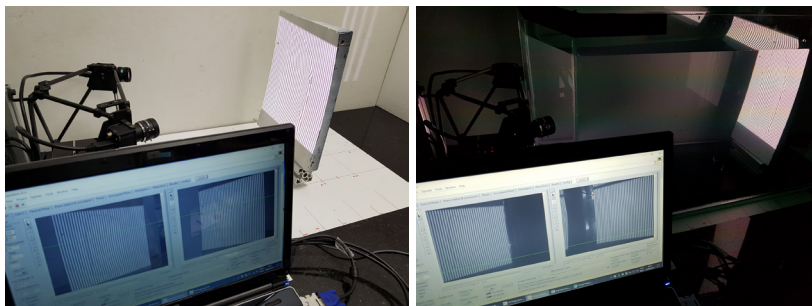


Figura 182 – Medição da cavidade preenchida com cordões de solda no ar e na água.

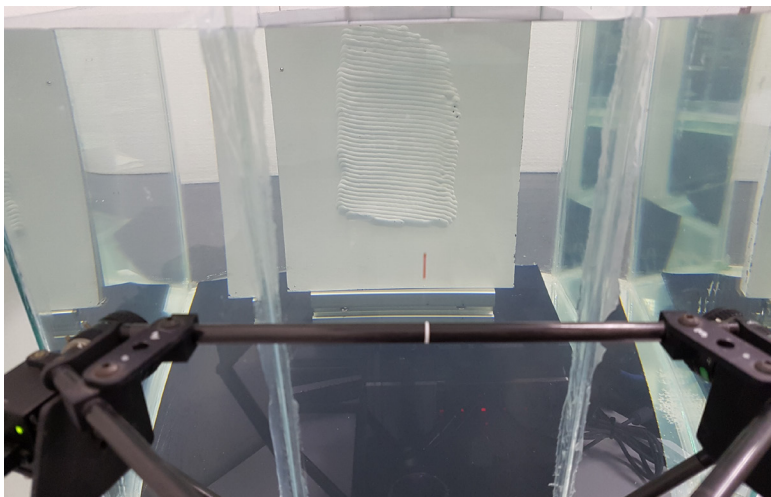


Figura 183 – Vista frontal da cavidade preenchida com cordões de solda posicionada no interior do tanque para a medição.

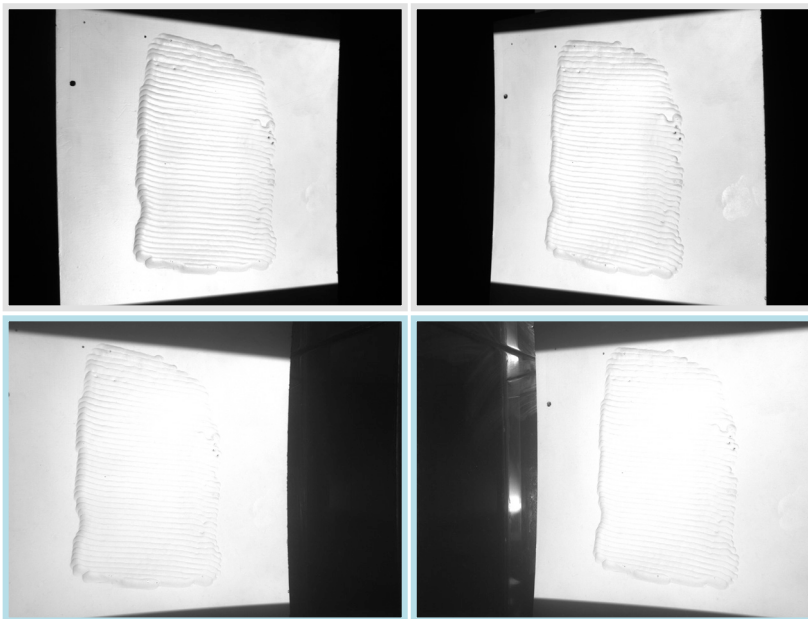


Figura 184 – Imagens adquiridas pela câmera esquerda e direita no ar e na água (baixo) em posições (Z) distintas.

A figura 185 mostra as nuvens de pontos obtidos no ar e na água e tem o intuito de mostrar o posicionamento da peça dentro do volume de medição no ar. Conforme pode-se notar na imagem, foi necessário posicionar a peça mais distante do sistema na água, pois devido à refração, a altura máxima (Y) é menor na água do que no ar (ver seção 6.5).

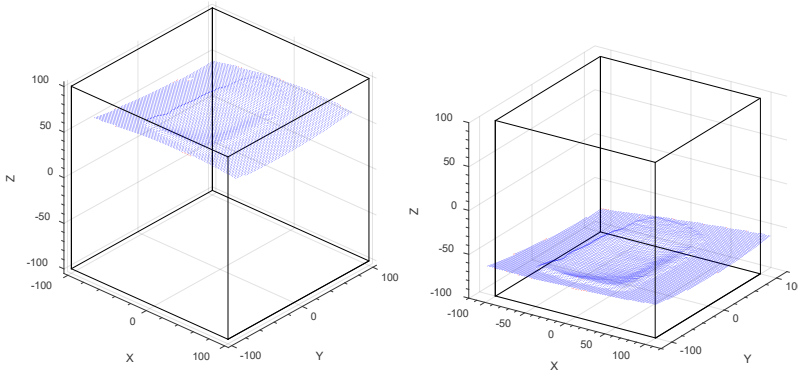


Figura 185 – Posicionamento da peça no ar (esq.) e na água (dir.) e cubo referente volume de medição no ar.

O resultado de medição no ar e na água podem ser vistos respectivamente nas figuras 186 e 187. Já a figura 188 mostra em detalhe uma parte das medições, onde pode-se notar que existe um maior ruído na medição na água. Para obter um valor quantitativo desse ruído, selecionou-se uma região das medições (triângulo na figura 186) onde foi ajustado um plano polinomial de 3ª ordem (análise feita no *software* GOM Inspect 2016). O desvio dos pontos desse plano ajustado é exposto na tabela 48. Nota-se que o erro na água se aproxima do dobro do erro no ar.

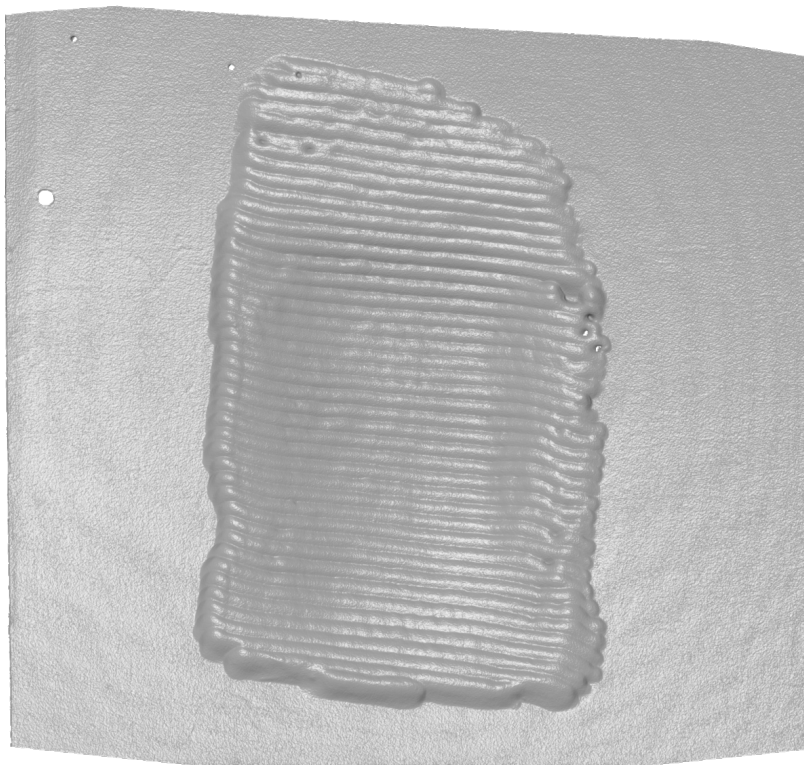


Figura 186 – Resultado de medição no ar - cavidade preenchida com cordões de solda.

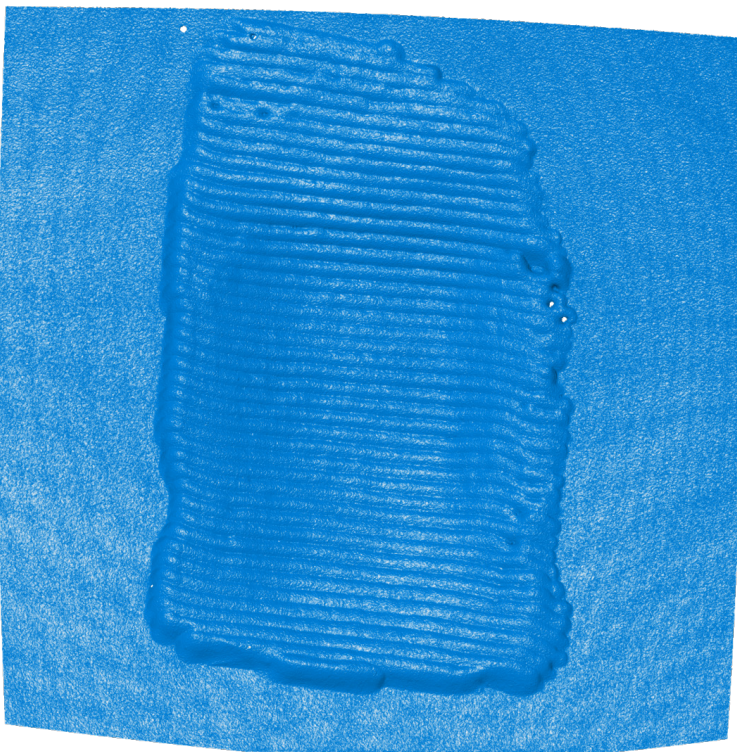


Figura 187 – Resultado de medição na água (Refra) – cavidade preenchida com cordões de solda.

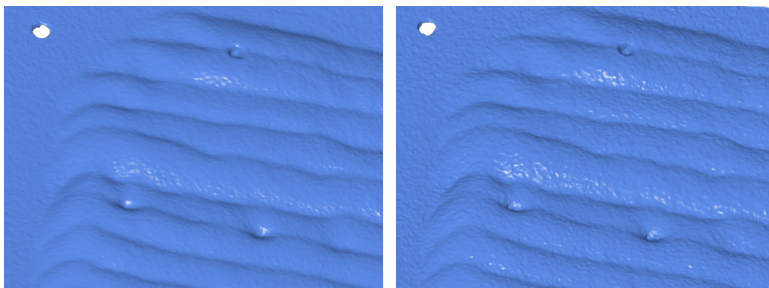
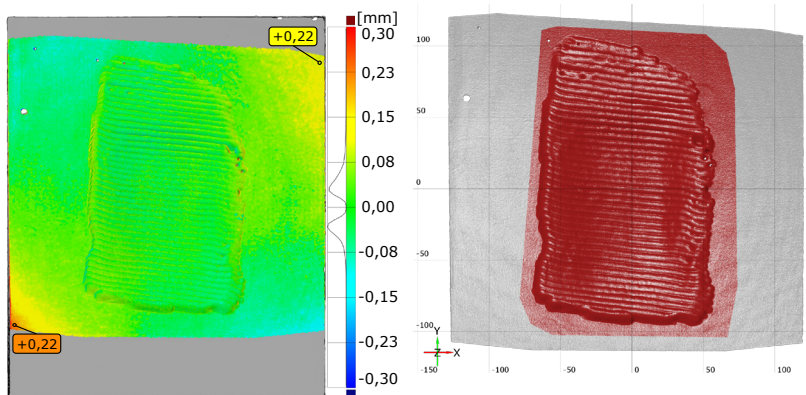


Figura 188 – Comparação de parte da medição no ar e na água (Refra) (direita). Nota-se maior ruído na medição na água.

Tabela 48 – Análise do ruído da medição na área indicada na figura 186. Valores em milímetros.

Erro	Ar	Água
Mínimo	-0,07	-0,12
Máximo	0,07	0,12
σ	0,016	0,025
Posição Z aproximada	70	-70

As malhas foram ajustadas à medição de referência. Para o ajuste, utilizou-se uma região que engloba os cordões de solda e aproximadamente 10 mm de seu entorno. Isso foi feito para permitir visualizar melhor os erros nas bordas das medições. O mapa de desvio obtido com a medição no ar, assim como a área utilizada para o ajuste das medições, pode ser visto na figura 189. Na figura 190 compara-se os desvios nas medições na água com o modelo SVP e Refra. Nota-se que a medição no ar possui uma área em XY um pouco maior do que o volume de medição em torno de ± 25 mm.



0,05 / 5.654.072 / 00:22

Figura 189 – Comparação entre medições obtidas no ar e região utilizada para o ajuste.

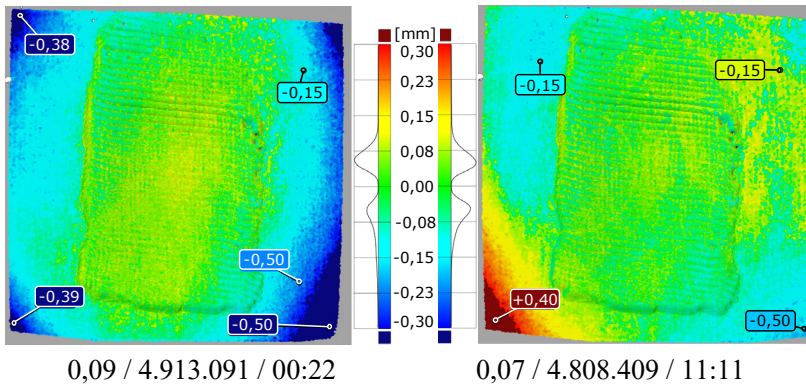


Figura 190 – Comparação entre medições obtidas na água com modelo SVP e Refra.

6.11 COMPARAÇÃO DA CALIBRAÇÃO COM E SEM OTIMIZAÇÃO

Conforme descrito anteriormente (seção 6.4), a calibração dos parâmetros de refração realiza a otimização das variáveis: \mathbf{A} , d_0 , μ_2 , sendo que os índices de refração (μ_n) são os mesmos para ambas. Estes parâmetros também foram obtidos indiretamente, sendo \mathbf{A} e d_0 extraído dos parâmetros extrínsecos de padrões colados nas duas janelas do tanque e μ_2 medido com um refratômetro.

Para avaliar o erro de medição obtido com a otimização completa contra os valores de referência, foram definidas mais duas calibrações de teste, uma otimizando somente o eixo das câmeras (\mathbf{A}) e outra sem otimização alguma, utilizando apenas os valores obtidos indiretamente. Para tal, optou-se por comparar os desvios obtidos na medição da placa preenchida com cordões de solda, uma vez que que abrange toda a área de medição do sistema na água, possui uma região complexa central (cordões de solda) e também região periférica com superfície suave. O ajuste das medições sobre a superfície de referência foi realizado da mesma forma do que na avaliação anterior com a peça, sendo utilizada apenas a região com solda somada a uma pequena parte periférica.

A figura 191 e a tabela 49 expõem os resultados obtidos com as três calibrações. Nota-se que a otimização completa obteve o melhor resultado, seguida pela otimização somente de \mathbf{A} e por último utilizando

somente os valores de referência, onde o erro máximo chega a quase 2 mm e o desvio padrão é quase cinco vezes maior do que com a otimização completa.

Realizou-se também a otimização somente de μ_2 (resultado não plotado na figura). O resultado obtido foi em torno de duas vezes pior do que com a otimização somente de **A**. Com base nos resultados aqui expostos, o uso dos parâmetros obtidos sem a realização de nenhuma otimização não é aconselhado. Deve-se atentar que os resultados obtidos aqui estão limitados pela resolução da câmera e qualidade do padrão colado na janela do tanque. É possível que, com uma câmera e padrão de alta qualidade se obtenha melhores resultados com a medição sem otimização.

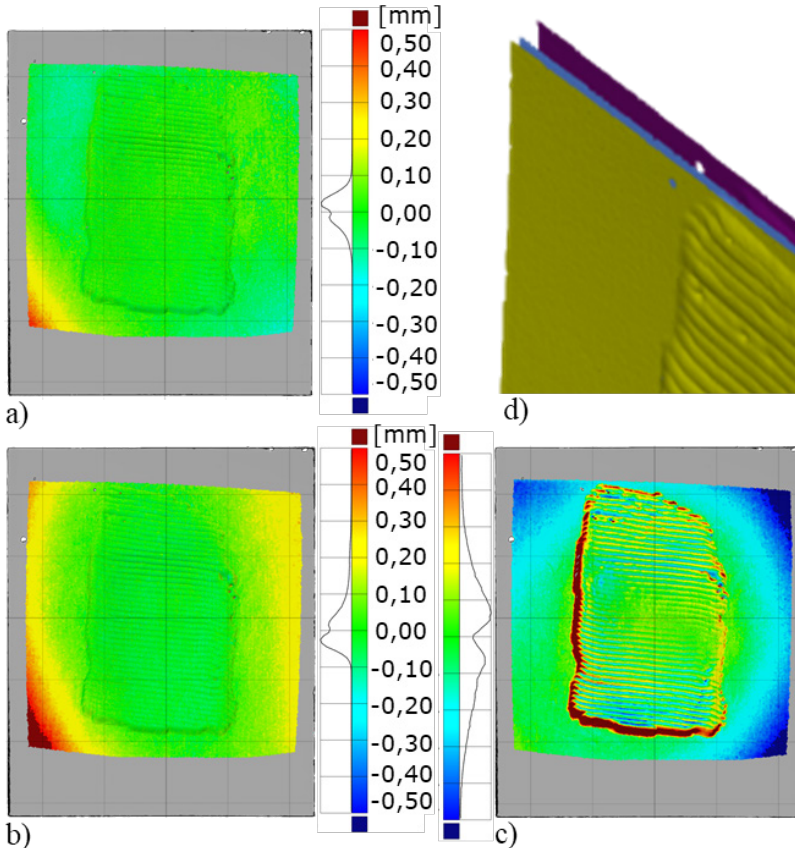


Figura 191 – Comparação dos desvios obtidos da medição da placa com cavidade preenchida com solda utilizando: **a)** Otimização completa (A, d_0, μ_2), **b)** Parcial (somente A) ou **c)** Nenhuma (valores de referência). Canto superior direito: detalhe da diferença de posição visível entre as medições, à frente resultado obtido com b), no meio a) e mais atrás com c).

Tabela 49 – Comparação dos desvios obtidos da medição da placa com cavidade preenchida com solda utilizando: **a)** Otimização completa (A, d_0, μ_2), **b)** Parcial (somente A) ou **c)** Nenhuma (valores de referência).

Otimização	a) (A, d_0, μ_2)	b) A	c) -
Max	0,57	0,74	1,97
Min	-0,26	-0,60	-1,84
σ	0,05	0,08	0,24

6.12 OUTROS EXEMPLOS DE MEDIÇÃO

A seguir são expostas as medições somente na água com o modelo de refração (Refra) de trechos de tubo PVC e de *riser*. Estas medições servem como exemplo de aplicação de um sistema óptico subaquático na medição de tubulações submersas na indústria do óleo & gás.

6.12.1 *Tubo de PVC amassado*

A figura 192 mostra a configuração do experimento durante a medição do tubo de PVC de 305 mm (12”) de diâmetro nominal. Imagens obtidas pelo sistema podem ser vistas na figura 193. Foram medidos um total de 3.325.575 pontos e o tempo de processamento foi de 8 min. O tubo possui sua região central amassada e marcas circulares causadas pela ferramenta durante seu amassamento. Estas marcas e seu resultado de medição podem ser vistas em detalhes na figura 194. Conforme ilustra a figura 195, mediu-se uma região em torno de 200×200 mm². Um cilindro foi ajustado ao resultado (Figura 197) para visualização da diferença em relação à medição em mapa de cores, o diâmetro obtido foi de 312 mm (12,3”). Deve-se notar que, devido à própria deformação da peça (falta de rigidez) não faz sentido comparar o diâmetro obtido com o nominal do tubo. O ruído da medição (Figura 196) ficou em torno de $\pm 0,1$ mm. Por fim, o mapa de distância da medição é exposto na figura 198.

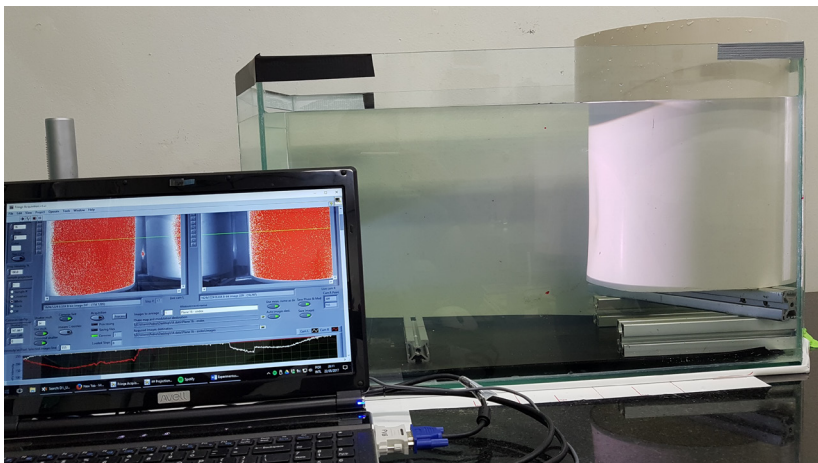


Figura 192 – Medição de trecho de tubo amassado de PVC de 305 mm (12”) de diâmetro.

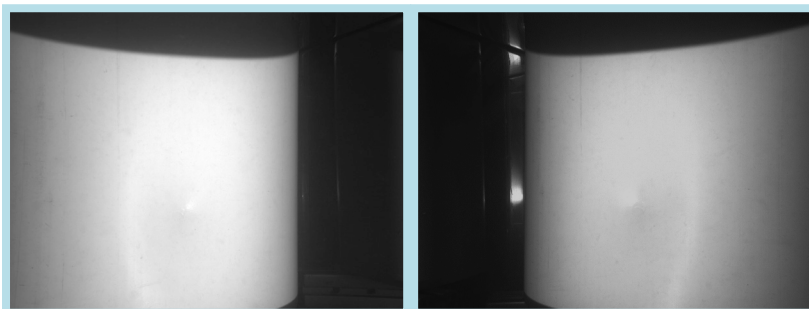


Figura 193 – Imagens do tubo de PVC obtida pelo sistema durante a medição na água.

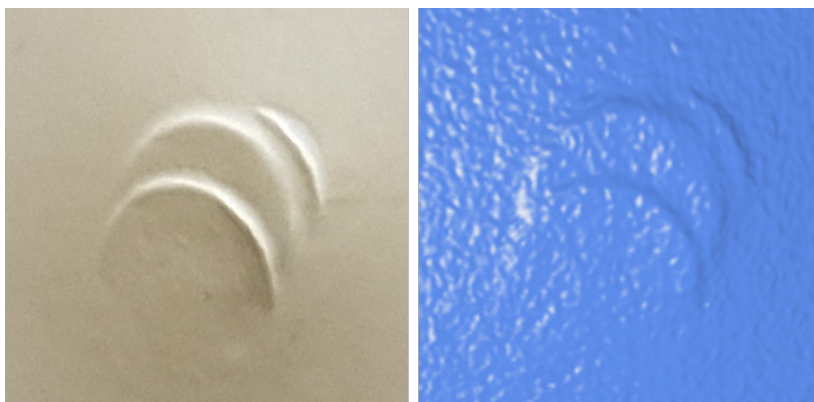


Figura 194 – Detalhe de artefato na região central do tubo medido. Foto V_s resultado de medição na água (Refra).

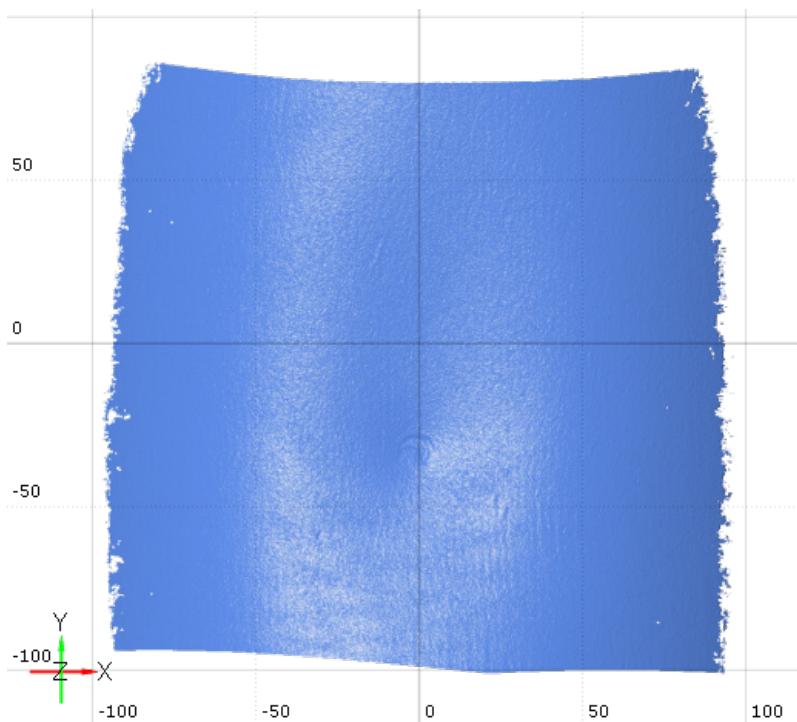


Figura 195 – Vista frontal do resultado de medição de tubo de PVC na água (Refra). Área em XY de quase $200 \times 200 \text{ mm}^2$.

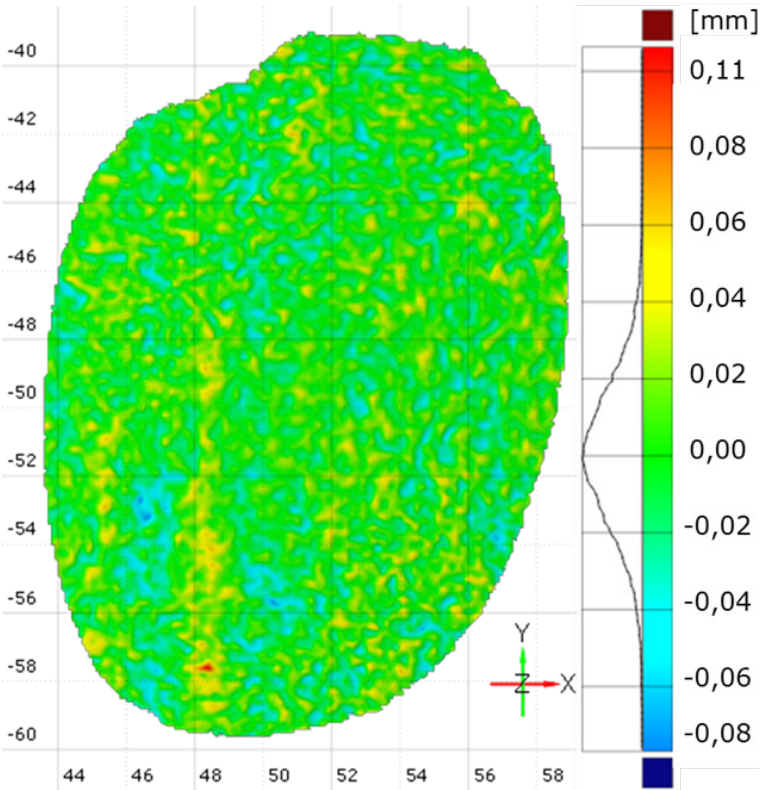


Figura 196 – Análise do ruído da medição no tubo de PVC na água (Refra). Ajustado plano polinomial de 3ª ordem e obtida a distância de cada ponto ao plano. Escala de cores representa todos os pontos. Nota-se um erro máximo em torno de $\pm 0,1$ mm.

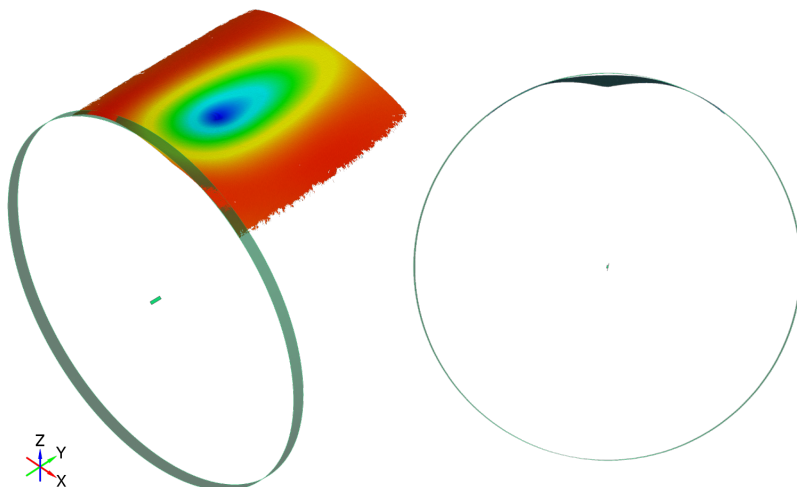


Figura 197 – Resultado de medição na água (Refra) de tubo de PVC e cilindro ajustado de 312,0 mm de diâmetro.

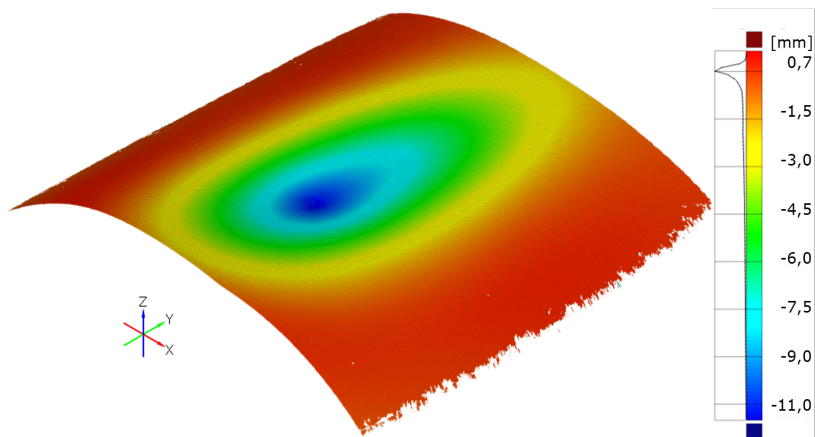


Figura 198 – Resultando de medição do tubo de PVC amassado de 305 mm (12”) de diâmetro. Total de pontos: 3.325.575. Tempo de processamento: 8 min. Tempo para criação da malha: 6 min. Diâmetro do cilindro ajustado: 312,0 mm. Medição na água (Refra).

6.12.2 *Trecho de riser de 6” (152 m) de diâmetro nominal interno*

Realizou-se a medição de um trecho de riser com 6” (154 mm) de diâmetro nominal interno (Figura 199). Imagens obtidas pelo sistema

podem ser vistas na figura 200, onde é possível notar a grande variação de tonalidade de cor da superfície (regiões muito escuras ou reflexivas) assim como o reflexo na parte central do tubo. Estes fatores dificultam a medição com projeção de franjas e, como consequência, pode-se perder pontos (regiões de falha) ou degradar o mapa de fase devido aos reflexos (regiões com maior ruído). Devido à cor escura da peça, utilizou-se um valor de modulação mínima menor (20 ao invés de 100). Uma seção do diâmetro externo do tubo foi medida em MMC, sendo obtido $169,1 \pm 0,7$ mm. A figura 201 mostra o resultado de medição e um cilindro ajustado, com diâmetro resultante de 169,2 mm, que está bem próximo do valor de referência obtido com a MMC. O resultado em detalhes pode ser visto na figura 202. O total de pontos medidos foi de 1.424.862 em 3 min e 20 s.

Deve-se notar que os problemas encontrados não estão relacionados com os efeitos da medição subaquática e sim a limitações da própria técnica de projeção de franjas, sendo que a amostra de *riser* possui todas as características indesejáveis, como regiões escuras e reflexivas. Todavia, com o uso de filtros passa banda, medições em diferentes ângulos e tempos de exposição pode ser possível melhorar a qualidade final da medição. Como alternativa, pode-se utilizar outras técnicas de identificação de pontos homólogos, como a projeção de padrões aleatórios com laser ou mesmo a correlação pela própria textura da peça.

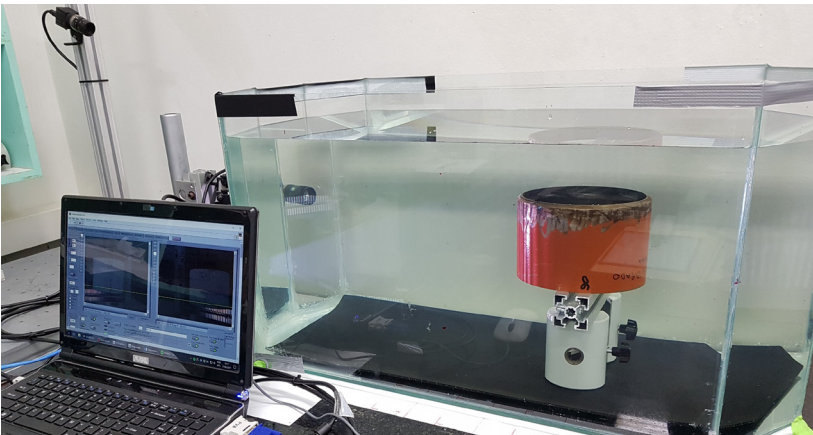


Figura 199 – Medição de seção de *riser* de 6" (154 mm) de diâmetro.

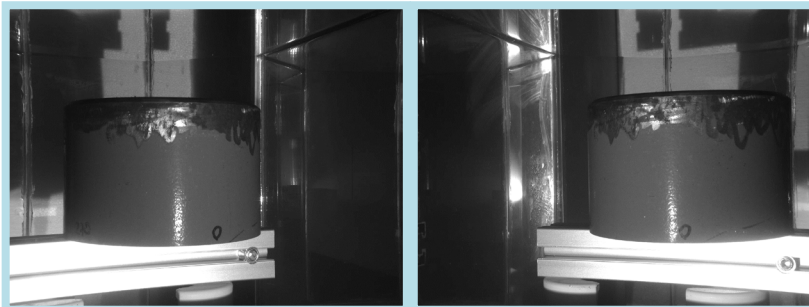


Figura 200 – Imagens obtidas pelo sistema estéreo durante medição de seção de riser de 6" (154 mm) de diâmetro. Pode-se notar reflexo na parte central do tubo.

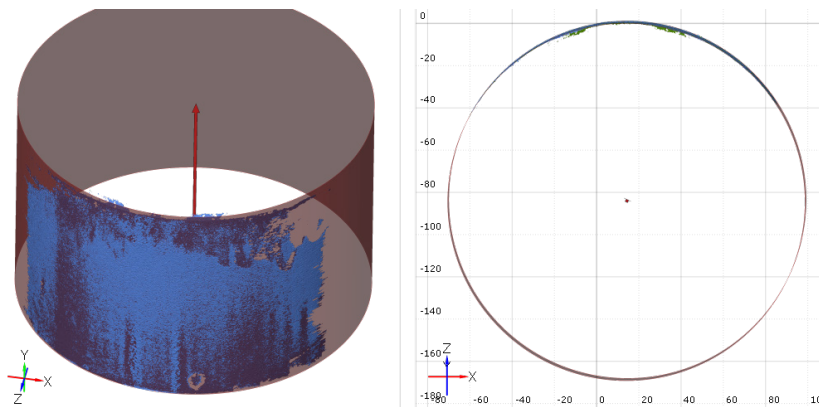


Figura 201 – Resultado de medição de riser de 6" (154 mm) de diâmetro na água (Refra). Cilindro ajustado ao resultado. Diâmetro médio obtido de 169 mm.

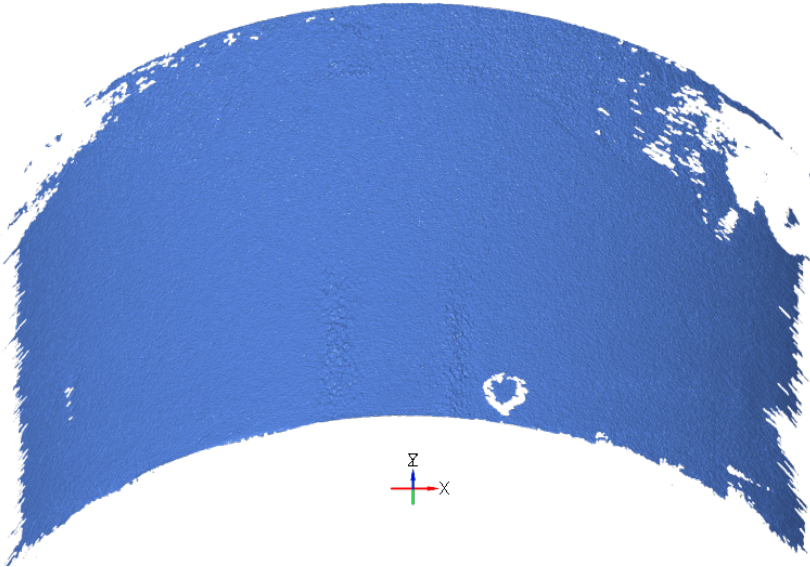


Figura 202 – Resultado de medição de riser de *riser* de 6” (154 mm) de diâmetro na água (Refra). Nota-se maior ruído devido ao reflexo (Figura 200) em duas faixas próximo a região central da medição e também falhas devido a regiões com cor escura ou reflexivas. Processamento: 3 min 38 s. Total de pontos: 1.424.862.

6.13 AVALIAÇÕES NÃO REALIZADAS

Em (PINTO, 2010) foi feita a avaliação da resolução Z do sistema estéreo aqui utilizado, sendo obtida uma resolução em Z de 0,1 mm, com erro de deslocamento de 11%. Já para deslocamentos de 0,01 mm o erro foi de 56%. No presente trabalho a resolução e o erro na medição de inclinação não foram avaliados, todavia os experimentos aqui descritos foram capazes de mostrar em detalhes a capacidade de medição do sistema no ar e na água. Para o balanço de incertezas considerou-se a resolução utilizada na varredura em Z de 0,01 mm.

6.14 PROBLEMAS ENCONTRADOS

Algumas das dificuldades/problemas encontrados são listados a seguir:

Reflexos

Dependendo do posicionamento da peça, seu reflexo pode ser visto na parede do tanque e/ou na superfície da água, conforme ilustra a figura 203. Como consequência, seu reflexo também pode ser “medido”. Para contornar esse problema, a área de medição pode ser definida de forma que a procura por valores válidos em Z não projete (ou projete muitos poucos) pontos na área com reflexo. Outra solução é a delimitação de uma região de interesse (ROI) no mapa de fase. Para medições fora do laboratório, o reflexo nas paredes do tanque pode ser descartado, todavia, ainda existe a possibilidade de interferência da medição com reflexo na superfície da água. Para tal, acredita-se que o uso de polarizadores pode reduzir ou até eliminar este efeito.

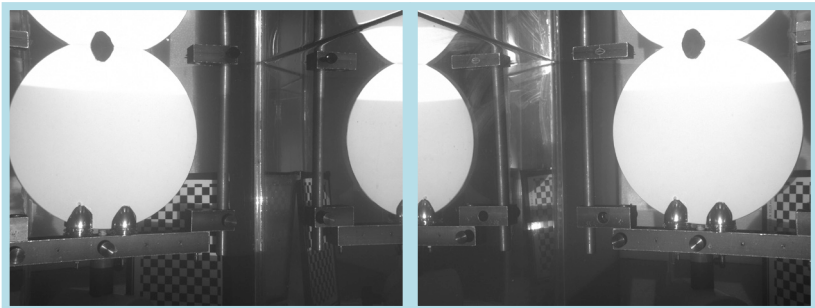


Figura 203 – Imagens adquiridas da câmera esquerda e direita durante medição do plano padrão. Nota-se o reflexo na parede do tanque e na superfície da água.

Tempo de exposição (*shutter*) da câmera

Quando o *shutter* foi ajustado para valores maiores do que 100 ms notou-se que o mapa de fase era degradado. Este problema está provavelmente ligado ao batimento entre a frequência da câmera e a de projeção. É necessário utilizar tempos de exposições mais altos devido a perda da intensidade da luz projetada na água. Como soluções futuras, pode-se utilizar um projetor mais potente, câmera com maior sensibilidade e realizar a sincronia da aquisição com a projeção.

6.15 DISCUSSÃO

A análise dos resultados mostra um aumento da incerteza de medição na água, o que é algo esperado, uma vez que mais variáveis são

adicionadas ao cálculo da triangulação, além de limitações físicas como o espalhamento (*scattering*) da luz na água, acarretando principalmente numa perda de nitidez. Ademais, como não se utilizou filtros passa-banda, existe o efeito do espalhamento do espectro de luz (aberrações cromáticas) devido à refração, o que também degrada a qualidade da imagem obtida pelo sistema.

Como o ângulo de visão da câmera não é muito grande (horizontal: $46,3^\circ$ vertical: $35,7^\circ$), a compensação dos efeitos da refração com o ajuste do comprimento focal e dos coeficientes de distorção da lente mostrou-se satisfatória, tendo resultados similares aos obtidos com a modelagem física da refração. Conforme mostrado em (TREIBITZ; SCHECHNER; SINGH, 2008) e detalhadamente em (KANG; WU; YANG, 2012), quanto maior o ângulo de visão, mais difícil é a compensação da refração utilizando o modelo SVP, todavia, dependendo do ângulo de visão e da distância entre o objeto e o sistema estéreo, a aproximação por SVP é adequada.

Em (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b) foi feita a avaliação de um sistema que utiliza os mesmos princípios de medição, sendo que a modelagem utilizada considera que o eixo da câmera está normal à janela de visão. Para compensar o efeito do desalinhamento, os autores utilizam um modelo de correção de distorções, o que realmente reduz os erros de forma significativa, conforme os resultados apresentados no artigo. Todavia, o autor do presente trabalho acredita que, com uma modelagem mais adequada, considerando a inclinação entre o eixo da câmera e a janela, possivelmente resultaria em resultados um pouco melhores. Devido à grande similaridade dos sistemas, pode-se utilizar os resultados obtidos em (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b) como base de comparação, a qual é exposta na tabela 50. Os erros aleatórios são bastante similares, assim como a piora ao utilizar o sistema na água, que foi em torno de 50%. No caso do erro de escala, note-se um grande aumento de 250% em relação ao erro no ar no sistema portátil. Em contraste, o aumento obtido no presente trabalho foi de 23%. Possivelmente, com uma melhor modelagem do sistema portátil, o aumento do erro relativo ao ar seria menor. Entretanto, deve-se atentar para outros fatores que podem ter influenciado o erro que não a modelagem, como por exemplo: movimento do protótipo durante a medição, uma vez que o mesmo é portátil; turbidez da água e outros fatores relacionados à operação fora do laboratório.

Tabela 50 – Comparação dos resultados obtidos na tese com sistema de medição similar.

Método	Erro de escala (esferas) [%]		Erro aleatório (σ) [mm]	
	Água	Relativo ao obtido no ar	Água	Relativo ao obtido no ar
Presente trabalho	0,26%	23%	0,04	59%
(BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b)	0,35%	250%	0,03	50%

Após a análise dos dados pode-se afirmar que os resultados obtidos estão condizentes com o estado da arte na medição com sistema de visão estéreo através de interfaces planas de refração (AIPR). Dá-se um passo além com as técnicas aqui desenvolvidas, que permitem a realização da triangulação inversa AIPR de forma adequada, com pequena incerteza e eficiência computacional. Somando-se a isso, realizou-se uma análise e comparação detalhada do uso da modelagem física e da aproximação por SVP na medição AIPR.

7 CONCLUSÕES

Na presente tese realizou-se o desenvolvimento e avaliação de técnicas que possibilitam a medição de formas 3D com alta densidade de pontos e pequena incerteza com sistema estéreo óptico ativo com projeção de franjas em meio subaquático utilizando a triangulação inversa. Para tal, desenvolveram-se técnicas inovadoras, incluindo métodos para a calibração dos parâmetros referentes à modelagem fisicamente correta da refração e algoritmos que possibilitam a realização da triangulação inversa através de múltiplas interfaces planas de refração. Para a validação dos conceitos desenvolvidos, além do desenvolvimento teórico e de uma detalhada avaliação metrológica do sistema, realizou-se a comparação da modelagem de refração fisicamente correta com o modelo de câmera *pinhole* (ou SVP) e distorção 2D e com a performance no ar.

Neste capítulo são sintetizadas as principais contribuições e resultados obtidos, as conclusões auferidas e também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

7.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A seguir são listadas as principais contribuições acadêmicas e inovações da tese.

Principais contribuições acadêmicas:

- Levantamento bibliográfico sobre o estado da arte da identificação de pontos correspondentes em imagens obtidas por sistemas estereoscópicos; técnicas de melhoria na obtenção de imagens subaquáticas; técnicas e equipamentos de medição subaquática, incluindo além de sistemas ópticos, sonares e sistemas híbridos (sonar e óptico).
- Levantamento bibliográfico sobre estado da arte de modelos fisicamente corretos de projeção e calibração de câmeras com visão através de interfaces planas de refração.
- Biblioteca de *software* (.dll) em C++ para o cálculo da triangulação inversa tanto no ar quanto através de interfaces planas de refração assim como muitos *scripts* em MATLAB organizados em pastas conforme sua função.

- Projeto e montagem de bancada de ensaio envolvendo um tanque de água com janelas inclinadas e de padrões calibrados, incluindo um par de esferas e um padrão plano. Estes itens estão agora disponíveis no laboratório para a realização de outros experimentos envolvendo principalmente a medição óptica de formas 3D e ensaios subaquáticos.
- Avaliação da influência da alteração de parâmetros de refração nas incertezas de medição nos algoritmos e sistema desenvolvidos. Foram avaliadas a influência da variação do índice de refração devido a mudança de temperatura e salinidade da água; alteração da distância entre câmera e janela (parede de vidro) do tanque; e alteração na espessura do vidro na janela do tanque.
- Avaliação do desempenho dos algoritmos desenvolvidos usando como referência objetos com geometria conhecida e medições no ar.
- Comparação da modelagem fisicamente correta da refração (Refra) com a aproximação por ajuste do comprimento focal e de distorções de lente (calibração SVP na água).

Principais contribuições inovadoras:

- Desenvolvimento de técnicas e algoritmos inéditos que possibilitam a realização da triangulação inversa (InvT) através de interfaces planas de refração:
- ***InvProjRefra***: Método para a Projeção Inversa Através de Interfaces Planas de Refração. Pode ser utilizado para n interfaces não necessariamente paralelas.
- ***IteraProjRefra***: Algoritmo inovador para o cálculo da projeção direta de forma iterativa a partir da minimização do erro da projeção inversa (realiza com o método *InvProjRefra*). O erro é dado pela distância mínima do último raio projetado inversamente ao ponto 3D em questão. O ponto projetado na imagem é corrigido com base no vetor erro até que seja atingido um erro máximo tolerado ou o número máximo de iterações. O método mostrou-se aproximadamente três vezes mais rápido do que a solução analítica com um polinômio de ordem 12.

- **ZScan2:** Aprimoração do método varredura em Z com melhoria da resolução de forma incremental (*ZScan*) (FANTIN; ALBERTAZZI; PINTO, 2007), proporcionando uma maior tolerância a descontinuidades no mapa de fase Detecta se os valores do módulo da diferença de fase discretizados vizinhos ao ponto de mínimo são válidos ou não. Caso não sejam, aumenta a faixa de procura para o próximo refino em até um número máximo de pontos discretizados (nos experimentos da tese utilizou-se 5) anteriores e posteriores ao ponto de mínima. Com este método foi possível reduzir (se não eliminar) a ocorrência de perda de pontos na medição devido a descontinuidades no mapa de fase, especialmente no caso de alvos de cor escura colados na superfície do objeto, conforme comprovado nos resultados práticos da tese.
- **Calibração de parâmetros de refração por correspondência estéreo 2D-3D:** Pares de pontos 2D correspondentes são projetados inversamente (método *InvProjRefra*) com uma estimativa inicial dos parâmetros de refração do sistema. Pontos 3D do padrão são ajustados aos pontos 3D obtidos da triangulação dos pares de pontos 2D. Os parâmetros de refração calibrados serão os que resultam num mínimo erro, definido por dois parâmetros: 1) distância entre pontos 3D triangulados e os referentes pontos 3D do padrão e 2) distância mínima entre os pares de feixes triangulados.

7.2 COMPARAÇÃO DAS TÉCNICAS DESENVOLVIDAS EM RELAÇÃO AO ESTADO DA ARTE

O algoritmo desenvolvido na tese (*IteraProjRefra*) possui uma série de aspectos positivos quando comparado com os outros métodos estudados:

- Pode ser utilizado para interfaces paralelas ou não paralelas.
- Aproximadamente três vezes mais rápido para $n = 3$ (três meios com índice de refração diferentes) (avaliado no MATLAB). Converte rapidamente (5 ± 3 iterações) mesmo para uma reduzida tolerância de 0,001 mm, referente à distância entre o caminho óptico obtido iterativamente e o ponto 3D em questão.

- Pode ser utilizado para qualquer número de meios, ao contrário das soluções analíticas onde não foram encontradas soluções para mais do que três meios. Deve-se lembrar que a solução analítica para $n = 2$ é uma equação de ordem 4 (GLAESER; SCHRÖCKER, 2000) e para $n = 3$ equação de ordem 12 (AGRAWAL et al., 2012).
- Equacionamento bem definido, vetorial e simples se comparado à solução iterativa de sistema não linear de equações (KOTOWSKI, 1988) e também a solução analítica (AGRAWAL et al., 2012), que possui extensas linhas de código de difícil análise/leitura descrevendo o polinômio para $n = 3$.

Como o algoritmo *IteraProjRefra* realiza o cálculo do caminho óptico através de interfaces planas de refração, seu custo computacional é maior do que a projeção no ar, que é simplesmente uma linha reta. Sendo assim, pode-se dizer que o tempo de processamento é uma das principais limitações do método, ficando em torno de 15 vezes mais lento do que a aproximação por SVP.

Existem diversos métodos de calibração dos parâmetros de refração, entretanto, procurou-se desenvolver na tese um método robusto, de simples implementação e que possa ser aplicado para n interfaces. Como resultado, chegou-se ao método de calibração que obtém os parâmetros de refração a partir da minimização do erro dos pontos triangulados em relação ao padrão e também na distância mínima entre feixes triangulados, melhorando a correspondência entre pontos. A tabela 51 faz uma breve síntese do estado da arte dos métodos de calibração dos parâmetros de refração.

Tabela 51 – Síntese comparativa dos métodos de calibração dos parâmetros de refração com suas principais limitação e aspectos positivos.

Método	Limitações	Aspectos Positivos
(AGRAWAL et al., 2012)	<p>Matemática envolvida extremamente complexa baseada em teoremas de álgebra linear.</p> <p>Difícil reprodução em laboratório dos resultados descritos.</p> <p>Considera apenas interfaces de refração paralelas.</p>	<p>Se beneficia da restrição matemática que todo o caminho óptico da refração se encontra em um mesmo plano de refração (POR) para o caso de interfaces paralelas.</p> <p>Utiliza conceitos de álgebra linear para obter solução ótima com apenas oito pontos.</p>
(JORDT-SEDLAZECK; KOCH, 2012)	<p>Limitada avaliação do erro 3D.</p>	<p>Otimização utilizando diferença entre pontos na imagem.</p> <p>Mais robustos a possíveis mínimos locais.</p>
(BRÄUER-BURCHARDT et al., 2015b)	<p>Requer correção da distorção extra pois considera eixo da lente normal à interface de refração.</p> <p>Requer objeto padrão calibrado, como par de esferas.</p> <p>Requer identificação de pontos correspondentes absoluta (ex.: mapa de fase horizontal e vertical).</p>	<p>Não requer identificação de pontos na imagem (utiliza mapas de fase, medição 3D).</p> <p>Utiliza uma própria medição como erro/custo para minimização.</p> <p>Amplos resultados práticos.</p>
(CHEN; YANG, 2014)	<p>Limitada avaliação do erro 3D.</p> <p>Considera interfaces de refração paralelas.</p>	<p>Não necessita conhecer a posição relativa 3D dos pontos do objeto, apenas a correspondência entre pontos 2D, pois se beneficia de restrição matemática inerente da refração em sistemas estéreos AIPR paralelas mostrada pelos autores.</p>
BUSCHINELLI, 2017 (Presente tese)	<p>Necessita conhecer a posição relativa dos pontos 3D do padrão.</p>	<p>Simple implementação.</p> <p>Pode ser utilizado para interfaces paralelas e não paralelas.</p> <p>Avaliação prática comprova uma boa estimativa dos parâmetros de refração.</p>

7.3 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO TRABALHO

A triangulação inversa (InvT) possui uma série de vantagens em relação à triangulação convencional, uma vez que é orientada ao objeto ao invés do sensor da câmera, possibilitando assim a definição prévia do volume de medição e resolução, sendo obtida uma nuvem de pontos com malha regular. No melhor conhecimento do autor da presente tese não existe outro trabalho que realize a medição óptica subaquática de qualquer espécie (interfaces planas ou não) utilizando a triangulação inversa. A principal desvantagem da InvT é seu custo computacional elevado devido ao maior número de projeções necessárias para a procura por pontos válidos. Esta desvantagem se agrava no caso da projeção através de interfaces de refração devido à maior complexidade do cálculo do caminho óptico, que não é trivial e segue o princípio de Fermat, não sendo mais uma única multiplicação de matrizes. Sendo assim procurou-se estudar e desenvolver métodos para realizar essa projeção de forma eficiente, culminando com o algoritmo iterativo *IteraProjRefra*, que faz a projeção *direta* através de n interfaces não necessariamente paralelas de refração, reduzindo o erro de maneira iterativa da projeção *inversa*, a qual é obtida com o método *InvProjRefra*. Além destes algoritmos inovadores, também se aprimorou o método de refino em Z (*ZScan*) concedendo-o uma maior tolerância a descontinuidades nos mapas de fase, sendo o método resultante nomeado de *ZScan2*.

O uso do sistema calibrado no ar para medições na água sem nenhum tipo de compensação é inviável. Apesar deste tipo de comparação ser realizada em alguns artigos, na presente tese foi feita apenas para demonstração no caso da medição da face do manequim, uma vez que o erro é muito grande ($\sim 33\%$), obtendo um resultado em posição incorreta, visivelmente maior e com perda da geometria epipolar.

Na análise da medição do padrão de esferas note-se uma maior componente de erro sistemático no eixo Z do sistema de coordenadas do objeto (SCO), sendo ainda mais perceptível no mapa de desvios da face do manequim na região do pescoço. Todavia, deve-se considerar que existe a possibilidade que parte desse erro seja devido à deformação da peça causada pela água em seu interior ou posição de aquisição (ponta cabeça), que foram necessárias para possibilitar sua medição no tanque.

De uma maneira geral a compensação da refração por SVP teve erros semelhantes ao modelo fisicamente correto de refração (Refra).

Dentre as diferenças observadas entre os modelos, pode-se destacar a medição da placa com cavidade preenchida com solda, onde os erros nas bordas da medição com modelo SVP foram bem maiores do que os com modelo Refra, sendo em torno de -0,3 mm a -0,5 mm em todas as quatro bordas contra +0,4 mm apenas na borda inferior esquerda com o modelo Refra. Este efeito é esperado uma vez que o erro da aproximação por SVP é diretamente proporcional ao ângulo de visão (TREIBITZ et al., 2012).

Sucederam-se extensos experimentos comparando os resultados obtidos com o sistema, realizando medições no ar e na água utilizando as técnicas desenvolvidas, assim como a aproximação por modelo SVP. A tabela 52 compila os principais resultados obtidos na avaliação do sistema no ar e na água.

Tabela 52 – Resumo da avaliação do sistema no ar e água.

Parâmetro	Ar	Água SVP	Água Refra	Aumento relativo Refra/Ar
Erro de escala (<i>SSE</i>)	0,21%	0,26%	0,26%	23%
Ruído (σ desvio esfera)	0,016 mm	0,019 mm	0,020 mm	25%
Tempo de processamento ²⁸ típico (ex: face manequim)	30 s	30 s	6 min	1.100%

Os resultados mostram um aumento da ordem de 25% na incerteza de medição na água em relação ao ar. Este efeito já era esperado, uma vez que a medição na água insere mais parâmetros a serem considerados para o cálculo dos pontos 3D. Além disto, existe a degradação do sinal devido a efeitos como o espalhamento (*scattering*) na água e aberrações cromáticas em consequência da refração da luz branca projetada. Apesar dos resultados utilizando a aproximação por SVP serem similares aos obtidos com a modelagem física (Refra) deve-se notar que a última é válida para qualquer configuração do sistema, sendo que o mesmo não pode ser dito para a aproximação por SVP, que pode apresenta erros

²⁸ Testes realizados em um computador com: processador Intel i7 4770 @ 3,4 GHz; RAM 8 GB; placa de vídeo NVIDIA GTX 770; Windows 10 64 bits.

significativos comparado com a modelagem física, como por exemplo, quando o ângulo de visão é maior.

As análises da variação dos parâmetros de refração após a calibração mostram que a alteração do índice de refração na água devido à variação de temperatura em torno de $\pm 5^\circ\text{C}$ não é problemática. Todavia, a alteração da salinidade (de água doce para salgada) tem grande impacto no índice de refração, aumentando muito a incerteza de medição ($\sim 370\%$). Concluiu-se também que não existe a necessidade da medição da espessura do vidro para realizar a calibração, mesmo se este valor não for otimizado (caso do presente trabalho), podendo-se utilizar simplesmente o valor nominal, uma vez que o erro será compensado com a variação dos outros parâmetros otimizados. Além disto, a alteração de ± 1 mm da espessura do vidro após a otimização influencia menos que 3% no erro residual de calibração.

O tempo de processamento é a principal limitação da técnica aqui desenvolvida. No entanto, a mesma pode ser superada com o uso do processamento paralelo em placa de vídeo (GPU) em conjunto com outras técnicas de minimização da quantidade de pontos testados, como a melhoria incremental de resolução não apenas em Z , mas também em X e Y e com limites de procura de forma livre ao invés de um paralelepípedo.

7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o conhecimento adquirido durante o desenvolvimento da tese e com os resultados obtidos sugere-se aqui possíveis trabalhos futuros:

- Avaliação com pequena incerteza da posição real da primeira interface de refração (janela do tanque) com o uso por exemplo de câmera e lente de alta resolução e padrão de alta qualidade, braço de medição (referenciado por uma peça medida também com o sistema estéreo) ou outro sistema que possua incerteza 3D desprezível para a aplicação ($\leq 0,01$ mm).
- Comparação prática entre a aproximação por SVP e modelo físico de refração com lentes de menor comprimento focal e com as janelas em diferentes distâncias e inclinações em relação ao eixo da câmera.
- Implementação e avaliação do método de calibração descrito em (CHEN; YANG, 2014) para interfaces planas de refração,

que não requer conhecimento da posição relativa dos pontos 3D de um padrão, apenas a correspondência 2D nos pares de imagens.

- Desenvolvimento de código para processamento em placa de vídeo (GPU) da triangulação inversa através de interfaces planas de refração.
- Implementação da melhoria gradual da resolução nos outros eixos (*XYZScan*) com limites de procura de forma livre.
- Calibração do projetor através de interfaces planas de refração para auxílio na medição e também para sinalização, da mesma forma realizada no ar por (PINTO, 2010).
- Sincronização entre câmeras e projetor, possibilitando uma aquisição muito mais rápida e de qualidade, o que é praticamente indispensável para o uso de um sistema portátil para uso subaquático.
- Adição de filtros passa-banda nas câmeras e projetor monocromático, diminuindo a influência de iluminação externa (incluindo o efeito cáustico que ocorre em águas rasas) e aberrações cromáticas devido à refração.
- Estudo do uso de polarizadores para diminuir/eliminar problemas de reflexo em superfícies espelhadas, por exemplo em risers com revestimento reflexivo.
- Desenvolvimento de sistema com mais câmeras, diminuindo o problema de regiões com sombra e melhorando a identificação de pontos correspondentes.
- Desenvolvimento de protótipo portátil, possibilitando medições em campo.
- Avaliação do sistema com diferentes níveis de turbidez, simulando medições em campo.
- Avaliação do sistema em água salgada.

REFERÊNCIAS

2G Robotics. . Disponível em: <<http://www.2grobotics.com>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

ABBATE, G.; BERNINI, U. The temperature dependence of the refractive index of water. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 11, p. 1167–1172, 1978.

AGRAWAL, A. et al. **A theory of multi-layer flat refractive geometry**. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. **Anais...IEEE**, jun. 2012.

ALBERTAZZI G., JR., A. et al. **An endoscopic optical system for inner cylindrical measurement using fringe projection**. (C. Quan, A. Asundi, Eds.)Proc. SPIE 7155, Ninth International Symposium on Laser Metrology, 715514. **Anais...Singapore**: 29 set. 2008.

ALBERTAZZI G., JR., A. et al. **Development and application of a photogrammetric endoscopic system for measurement of misalignment and internal profile of welded joints in pipelines**. (P. H. Lehmann, Ed.)Proc. SPIE 7389, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, 73891W. **Anais...15 jun.** 2009.

ALLEY, D.; MULLEN, L.; LAUX, A. **Compact, Dual-Wavelength, Non-Line-of-Sight (NLOS) Underwater Imager**. OCEANS 2011. **Anais...2011**.

ALLEY, D.; MULLEN, L.; LAUX, A. **Compact optical system for imaging underwater and through the air/sea interface**. (W. W. Hou, R. Arnone, Eds.)1 jun. 2012.

ARETE. **Streak Tube Imaging LIDAR (STIL)**. . Disponível em: <http://www.arete.com/arete_innovation/streak_tube_imaging_lidar_stil.aspx>. Acesso em: 12 nov. 2013.

ASUNDI, A.; WENSEN, Z. Fast Phase-Unwrapping Algorithm Based on a Gray-Scale Mask and Flood Fill. **Applied Optics**, v. 37, n. 23, p. 5416, 10 ago. 1998.

AUSTRALIA, N. **Nauticam Australia - Underwater Housings for Digital SLR cameras - Innovation Underwater**. . Disponível em: <<http://www.nauticam.com.au/products/sl-r-accessories/ports/index.html>>. Acesso em: 5 set. 2013.

BASHKATOV, A. N.; GENINA, E. A. **Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation**.

(V. V. Tuchin, Ed.) Proc. SPIE 5068, Saratov Fall Meeting 2002: Optical Technologies in Biophysics and Medicine IV, 393 (October 14, 2003). **Anais...**14 out. 2003.

BASS, M. et al. Handbook of optics: Volume 1 - Fundamentals, techniques, and design. **Choice Reviews Online**, v. 32, n. 10, p. 32-5715-32-5715, 1 jun. 1995.

BAY, H.; TUYTELAARS, T.; VAN GOOL, L. SURF: Speeded Up Robust Features. In: LEONARDIS, A.; BISCHOF, H.; PINZ, A. (Eds.). . **Computer Vision – ECCV 2006 Lecture Notes in Computer Science**. [s.l: s.n.]. v. 3951p. 404–417.

BELCHER, E.; HANOT, W.; BURCH, J. **Dual-Frequency identification Sonar (DIDSON)**. Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology. **Anais...**2002.

BENNETT, S.; LASENBY, J. ChESS – Quick and robust detection of chess-board features. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 118, p. 197–210, jan. 2014.

BIANCO, G. et al. A comparative analysis between active and passive techniques for underwater 3D reconstruction of close-range objects. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 8, p. 11007–31, jan. 2013.

BOUGUET, J.-Y. **Camera Calibration Toolbox for Matlab**. . Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html>. Acesso em: 7 nov. 2013.

BRÄUER-BURCHARDT, C. et al. **Handheld underwater 3D sensor based on fringe projection technique**. (F. Remondino, M. R. Shortis, Eds.)21 jun. 2015.a.

BRÄUER-BURCHARDT, C. et al. Underwater 3D Surface Measurement Using Fringe Projection Based Scanning Devices. **Sensors**, v. 16, n. 1, p. 13, 23 dez. 2015.b.

BRÄUER-BURCHARDT, C.; KÜHMSTEDT, P.; NOTNI, G. Combination of Air- and Water-Calibration for a Fringe Projection Based Underwater 3D-Scanner. In: **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. [s.l: s.n.]. v. 9257p. 49–60.

BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering**, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.

BRUCE. **Camera obscura photo - Abandoned East Baltimore Rowhomes**. . Disponível em:

<<https://www.flickr.com/photos/stealw0rker/6798504017/>>. Acesso em: 1

out. 2015.

BRUNO, F. et al. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 4, p. 508–518, jul. 2011.

BUSCHINELLI, P. D. V et al. **Underwater 3D shape measurement using inverse triangulation through two flat refractive surfaces**. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. **Anais...IEEE**, set. 2016.

CAIN, C.; LEONESSA, A. **Laser based rangefinder for underwater applications**. 2012 American Control Conference (ACC). **Anais...IEEE**, jun. 2012.

CAMPOS, R. et al. Trinocular system for 3D motion and dense structure estimation. **Instrumentation viewpoint**, v. 36, n. 8, p. 45, 2009.

CAMPOS, R. G. **AREM's Project Homepage**. . Disponível em: <<http://arem.udg.edu>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

CHEN, M.; HE, Z.; AO, F. **Study and implementation for range-gated underwater laser imaging system**. (L. Zhou, Ed.)Proc. SPIE 6625, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007. **Anais...26** set. 2007.

CHEN, X.; YANG, Y.-H. **Two-View Camera Housing Parameters Calibration for Multi-layer Flat Refractive Interface**. 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. **Anais...IEEE**, jun. 2014.

CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. **Experimental Mechanics**, v. 25, n. 3, p. 232–244, set. 1985.

CODAOCTOPUS. **CodaOctopus**. . Disponível em: <<http://www.codaoctopus.com/>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

COMPUTAR. **M0814-MP2 : Manual Iris: Megapixel Monofocal Lenses: Products**. . Disponível em: <<https://computar.com/product/552/M0814-MP2>>. Acesso em: 1 maio. 2017.a.

COMPUTAR. **M0814-MP2 Specifications**, 2017.b. . Disponível em: <<https://computar.com/file?id=161>>

DA SILVA MACIEL, L.; ALBERTAZZI, A. G. Swarm-based algorithm for phase unwrapping. **Applied Optics**, v. 53, n. 24, p. 5502, 20 ago. 2014.

DE FRANÇA, J. A. et al. Revisiting Zhang's 1D calibration algorithm. **Pattern Recognition**, v. 43, n. 3, p. 1180–1187, mar. 2010.

DOLEREIT, T.; KUIJPER, A. Converting Underwater Imaging into Imaging in Air. **Proceedings of the 9th International Conference on Computer Vision Theory and Applications**, v. 1, p. 96–103, 2014.

DRAP, P. et al. The ROV 3D Project: Deep-Sea Underwater Survey Using Photogrammetry: Applications for Underwater Archaeology. **ACM Journal on Computing and Cultural Heritage**, v. 8, n. 4, p. 21:1-21:23, 2015.

EBAY. **Hasselblad Biogen 4.5/38 Super Wide Lens Carl Zeiss Unterwasservorsatz II - ebay item**. . Disponível em:

<http://www.ebay.com/itm/Hasselblad-Biogen-4-5-38-Super-Wide-Lens-Carl-Zeiss-Unterwasservorsatz-II-/151093249984?pt=Camera_Lenses&hash=item232ddc07c0&nma=true&si=JvjpuAh3HgCnV2lQOOI2XG1ZUMk%3D&orig_cvip=true&rt=nc&_trksid=p2047675.l2557>. Acesso em: 28 ago. 2013.

EKSTRAND, L. et al. High-resolution, High-speed, Three-dimensional Video Imaging with Digital Fringe Projection Techniques. **Journal of Visualized Experiments**, n. 82, p. 50421, 3 dez. 2013.

EL-MELEGY, M. T. Nonmetric lens distortion calibration: closed-form solutions, robust estimation and model selection. **Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision**, p. 554–559 vol.1, 2003.

EMBRY, C. et al. **SS MTS: Subsea Monitoring - High Resolution 3D Laser Imaging for Inspection, Maintenance, Repair, and Operations**. Proceedings of Offshore Technology Conference. **Anais...The Offshore Technology Conference**, abr. 2012.

FANTIN, A. V. **Medição de Formas Livres por Topogrametria**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

FANTIN, A. V. et al. **Measurement and stitching of regular cloud of points**. (P. S. Huang, T. Yoshizawa, K. G. Harding, Eds.)SPIE 7066, Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI. **Anais...28 ago. 2008**.

FANTIN, A. V.; ALBERTAZZI, A.; PINTO, T. L. **Efficient mesh oriented algorithm for 3D measurement in multiple camera fringe projection**. (W. Osten, C. Gorecki, E. L. Novak, Eds.)Proc. SPIE 6616, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V. **Anais...18 jun. 2007**.

FENG, S. et al. High-speed real-time 3-D coordinates measurement based on fringe projection profilometry considering camera lens distortion. **Optics Communications**, v. 329, p. 44–56, out. 2014.

FN Diving webpage - Inspection. . Disponível em:

- <<http://www.fndiving.com/inspection>>. Acesso em: 21 nov. 2013.
- FRANÇA, J. A. DE et al. Calibração binocular com gabaritos 1D sem restrição de movimentos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 22, n. 3, p. 229–237, jun. 2011.
- GENESIS. **Riser Analysis**. . Disponível em: <http://www.genesisoilandgas.com/assets/images/pictures/services/pic_riser_analysis.jpg>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- GENG, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. **Advances in Optics and Photonics**, v. 3, n. 2, p. 128, 31 mar. 2011.
- GLAESER, G.; SCHRÖCKER, H.-P. Reflections on Refractions. **Journal for Geometry and Graphics**, v. 4, n. 1, p. 1–18, 2000.
- GLASSNER, A. S. **An introduction to ray tracing**. 1. ed. [s.l.] Academic Press, 1989.
- GODDIO, F. **Sunken Civilizations: Alexandria**. . Disponível em: <<http://www.franckgoddio.org/projects/sunken-civilizations/alexandria.html>>. Acesso em: 18 ago. 2015.
- GOM. **GOM - ATOS Compact Scan**. . Disponível em: <<http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-compact-scan.html>>. Acesso em: 29 jul. 2015.
- GROSSBERG, M. D.; NAYAR, S. K. The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration. **International Journal of Computer Vision**, v. 61, n. 2, p. 119–137, fev. 2005.
- GUI, L. et al. Reconstruction with Underwater Stereo Vision. **Proceedings of the International Conference on Logistics, Engineering, Management and Computer Science**, n. MAY 2014, p. 0–5, 2014.
- GUIMARÃES, P. **Flat vs. Dome port test on wide focal length lens for 3D applications**. . Disponível em: <<http://stead3d.com/flat-vs-dome-port-test-on-wide-focal-length-lens-for-3d-applications/>>. Acesso em: 12 ago. 2015.
- HAERTEL, M. E. M. **Perfilômetro óptico externo para dutos expostos a corrosão**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- HAERTEL, M. E. M. et al. **Development of an optical system for geometric inspection of external surface of pipelines**. (A. A. S. Awwal, K. M. Iftkharuddin, Eds.)Proc. SPIE 8498, Optics and Photonics for Information Processing VI. **Anais...**15 out. 2012.
- HAERTEL, M. E. M. **Sistema trinocular baseado em triangulação inversa para aquisição simultânea da geometria e textura da superfície**

- interna de dutos.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- HAERTEL, M. E. M.; PINTO, T. L. F. DA C.; ALBERTAZZI, A. Trinocular stereo system with object space oriented correlation for inner pipe inspection. **Measurement**, v. 73, p. 162–170, set. 2015.
- HAMZAH, R. A.; HAMID, A. M. A.; SALIM, S. I. M. **The Solution of Stereo Correspondence Problem Using Block Matching Algorithm in Stereo Vision Mobile Robot.** 2010 Second International Conference on Computer Research and Development. **Anais...IEEE**, 2010.
- HANER, S. et al. **Joint Under and Over Water Calibration of a Swimmer Tracking System.** Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. **Anais...SCITEPRESS - Science and and Technology Publications**, 2015.
- HANER, S.; ASTR, K. **Absolute Pose for Cameras Under Flat Refractive Interfaces.** The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). **Anais...2015**.
- HANNAH, M. J. **Computer Matching of Areas in Stereo Images.** [s.l.] Stanford University, 1974.
- HARRIS, C.; STEPHENS, M. **A Combined Corner and Edge Detector.** Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988. **Anais...Alvey Vision Club**, 1988.
- HARTLEY, R. I. **An algorithm for self calibration from several views.** Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94. **Anais...IEEE Comput. Soc. Press**, 1994.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision.** 2. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2004.
- HECHT, E. **Optics.** 4. ed. [s.l.] Addison-Wesley, 2001.
- HEIKKILA, J.; SILVEN, O. **A four-step camera calibration procedure with implicit image correction.** Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. **Anais...IEEE Comput. Soc.**, [s.d.]
- HOANG, T. et al. Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry. **Optics Letters**, v. 35, n. 12, p. 1992, 15 jun. 2010.
- HOFMANN, A. C. H. **Sistema Endoscópico Estereoscópico para Medição Geométrica de Uniões Soldadas de Dutos.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- HORN, B. K. P. Closed-form solution of absolute orientation using unit

quaternions. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 4, n. 4, p. 629, 1987.

HURTOS, N.; CUFI, X.; SALVI, J. **Calibration of optical camera coupled to acoustic multibeam for underwater 3D scene reconstruction**. OCEANS'10 IEEE SYDNEY. **Anais...IEEE**, maio 2010.

HydroOptix. . Disponível em: <<http://www.hydrooptix.com>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

IVANOFF, A.; LE GRAND, Y.; CUVIER, P. **Optical System for Distortionless Underwater Vision** Paris, France, 1952. . Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US2730014>>

JACOBSON, M. **Absolute Orientation - Horn's method**. . Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26186-absolute-orientation-horn-s-method>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

JAFFE, J. et al. Underwater Optical Imaging: Status and Prospects. **Oceanography**, v. 14, n. 3, p. 64–75, 2001.

JORDT-SEDLAZECK, A.; KOCH, R. Refractive Calibration of Underwater Cameras. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 7576, n. ECCV (5), p. 846–859, 2012.

JORDT, A.; KÖSER, K.; KOCH, R. Refractive 3D reconstruction on underwater images. **Methods in Oceanography**, v. 15–16, p. 90–113, abr. 2016.

KANG, L.; WU, L.; YANG, Y. Y.-H. Experimental study of the influence of refraction on underwater three-dimensional reconstruction using the SVP camera model. **Applied Optics**, v. 51, n. 31, p. 7591–7603, 1 dez. 2012.

KAWAHARA, R.; NOBUHARA, S.; MATSUYAMA, T. Underwater 3D Surface Capture Using Multi-view Projectors and Cameras with Flat Housings. **IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications**, v. 6, n. 0, p. 43–47, 2014.

KNIGHT, D. W. **Optical characteristics of the flat underwater lens port**. . Disponível em: <<http://www.camerasunderwater.info/optics/flat-port-theory>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

KOCAK, D. et al. **Remote sensing using laser projection photogrammetry for underwater surveys**. IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004. **Anais...IEEE**, 2004.

KOTOWSKI, R. Phototriangulation in Multi-Media Photogrammetry. **Int'l Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, XXVII, 1988.

KRANHOUSE, J.; ROGERS, J. R. **Panoramic reverse Galilean telescope optics for an underwater diving mask**, 2003. . Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US6612693>>

LEICA. **Leica ScanStation P20 Datasheet**, 2013. . Disponível em: <http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation_P20/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_P20_DAT_us.pdf>

LEONE, A.; DIRACO, G.; DISTANTE, C. A Stereo Vision Framework for 3-D Underwater Mosaicking. In: **Stereo Vision**. [s.l.] InTech, 2008.

LG. **LG HS101 Pocket Projector**, 2007. . Disponível em: <http://www.projectorcentral.com/pdf/projector_spec_3774.pdf>

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2004.

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, nov. 2004.

LUHMANN, T. Close range photogrammetry for industrial applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 558–569, nov. 2010.

MARQUÉS, R.; MARTÍN, F.; SOROLLA, M. **Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications**. [s.l.: s.n.].

MELLISH, B. **Principle of a pinhole camera**. . Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinhole-camera.png>>. Acesso em: 1 out. 2015.

METRIC, S. **Sound Metric webpage**. . Disponível em: <<http://www.didson.com>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

MILLARD, R. C. AND SEAVE, G. An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density, and wavelength. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 37, n. 12, p. 1909–1926, 1990.

MIRALLÈS, F. et al. Laser scanning system for inspecting large underwater hydroelectric structures. **Journal of Electronic Imaging**, v. 19, n. 2, p. 23015, 1 abr. 2010.

MUTTO, C. D. et al. **Current Advancements in Stereo Vision**. [s.l.] InTech, 2012.

NEGAHDARIPOUR, S. Epipolar Geometry of Opti-Acoustic Stereo Imaging. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 29, n. 10, p. 1776–1788, out. 2007.

NEGAHDARIPOUR, S.; FIROOZFAM, P. An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 31, n. 3, p. 551–564, jul. 2006.

New Nexus Glass Dome Ports | **Underwater Photography Guide**. .

Disponível em: <<http://www.uwphotographyguide.com/nexus-glass-dome-ports>>. Acesso em: 5 set. 2013.

NEWTON, I.; BALDWIN, R. A.; FRYER, J. G. Underwater Photogrammetry. In: **Non-Topographic Photogrammetry**. 2. ed. [s.l.] Asprs Pubns, 1989. p. 147–166.

NGUYEN, H. et al. Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement. **Applied Optics**, v. 54, n. 1, p. 9–17, 2015.

NICOSEVICI, T. et al. Efficient three-dimensional scene modeling and mosaicing. **Journal of Field Robotics**, v. 26, n. 10, p. 759–788, 2009.

NISTER, D. An efficient solution to the five-point relative pose problem. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 26, n. 6, p. 756–770, jun. 2004.

PINTO, C.; JR, A. A. G. **3D active stereo measurement in a regular mesh with random pattern and laser speckle projection**. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). **Anais...2013**.

PINTO, T.; KOHLER, C.; ALBERTAZZI, A. Regular mesh measurement of large free form surfaces using stereo vision and fringe projection. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, n. 7, p. 910–916, jul. 2012.

PINTO, T. L. F. DA C. **Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

POINTGREY (FLIR). **Flea2 2.0 MP Mono FireWire 1394b (Sony ICX274)**. . Disponível em: <<https://www.ptgrey.com/flea2-2-mp-mono-firewire-1394b-sony-icx274-camera>>. Acesso em: 1 maio. 2017.

QUAN, X.; FRY, E. S. Empirical equation for the index of refraction of seawater. **Applied optics**, v. 34, n. 18, p. 3477–80, 20 jun. 1995.

RAMALINGAM, S.; STURM, P.; LODHA, S. K. Theory and Calibration for Axial Cameras. In: **Computer Vision–ACCV 2006**. [s.l.: s.n.]. v. 3851p. 704–713.

RICHARDSON, D. et al. **High-Resolution 3D Laser Imaging for**

Inspection, Maintenance, Repair, and Operations. Offshore Technology Conference. **Anais...**Offshore Technology Conference, 6 maio 2013.

SABATER, N.; ALMANSA, A.; MOREL, J.-M. Meaningful Matches in Stereovision. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 34, n. 5, p. 930–942, maio 2012.

SALVI, J.; PAGÈS, J.; BATLLE, J. Pattern codification strategies in structured light systems. **Pattern Recognition**, v. 37, n. 4, p. 827–849, abr. 2004.

SANSONI, G.; CAROCCI, M.; RODELLA, R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors. **Applied Optics**, v. 38, n. 31, p. 6565, 1 nov. 1999.

Savante. . Disponível em: <<http://www.savante.co.uk/>>. Acesso em: 29 set. 2015.

SCHAFFER, M. et al. **Fast 3D shape measurements using laser speckle projection.** (P. H. Lehmann, W. Osten, K. Gastinger, Eds.)**Measurement. Anais...**23 maio 2011.

SCHAFFER, M. et al. Statistical patterns: an approach for high-speed and high-accuracy shape measurements. **Optical Engineering**, v. 53, n. 11, p. 112205, 29 abr. 2014.

SCHARSTEIN, D. et al. High-Resolution Stereo Datasets with Subpixel-Accurate Ground Truth. In: JIANG, X.; HORNEGGER, J.; KOCH, R. (Eds.). . **GCPR 2014: Pattern Recognition.** [s.l.] Springer Link, 2014. p. 31–42.

SCHARSTEIN, D.; SZELISKI, R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. **International Journal of Computer Vision**, v. 47, n. 1/3, p. 7–42, 2002.

SCHECHNER, Y. Y.; KARPEL, N. Recovery of Underwater Visibility and Structure by Polarization Analysis. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 30, n. 3, p. 570–587, jul. 2005.

SCHREIER, H.; ORTEU, J.-J.; SUTTON, M. A. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements.** Boston, MA: Springer US, 2009. v. 1

SCOPOS. **Scopos webpage - Investigator.** . Disponível em: <<http://www.scopos.no>>. Acesso em: 21 nov. 2013.

SEDLAZECK, A. J.; KOCH, R. Perspective and Non-perspective Camera Models in Underwater Imaging—Overview and Error Analysis. **Lecture**

Notes in Computer Science, v. 7474, p. 212–242, 2012.

SWAMINATHAN, R.; GROSSBERG, M. D.; NAYAR, S. K. A perspective on distortions. **2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings.**, v. 2, p. II-594-601, 2003.

SWIRSKI, Y. et al. **Stereo from flickering caustics**. 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. **Anais...IEEE**, set. 2009.

SWIRSKI, Y. et al. **Underwater stereo using natural flickering illumination**. OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. **Anais...IEEE**, set. 2010.

SWIRSKI, Y. et al. CauStereo: Range from light in nature. **Applied Optics**, v. 50, n. 28, p. F89, 1 out. 2011.

SWIRSKI, Y.; SCHECHNER, Y. Y. **CauStereo: structure from underwater flickering illumination**. (R. Liang, Ed.)Proc. SPIE 8480, The Nature of Light: Light in Nature IV. **Anais...IEEE**, 11 out. 2012.

SWIRSKI, Y.; SCHECHNER, Y. Y. **3Deflicker from motion**. IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). **Anais...IEEE**, abr. 2013.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 1. ed. London: Springer London, 2011.

TAN, C. et al. **Range gated imaging system for underwater robotic vehicle**. OCEANS 2006-Asia Pacific. **Anais...IEEE**, 2007.

TELEDYNE BlueView. . Disponível em: <<http://blueview.com>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

TREIBITZ, T. et al. Flat Refractive Geometry. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 34, n. 1, p. 51–65, 13 jan. 2012.

TREIBITZ, T.; SCHECHNER, Y. Y. Turbid scene enhancement using multi-directional illumination fusion. **IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society**, v. 21, n. 11, p. 4662–7, nov. 2012.

TREIBITZ, T.; SCHECHNER, Y. Y.; SINGH, H. **Flat refractive geometry**. 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. **Anais...IEEE**, jun. 2008.

TRIGGS, B. et al. **Bundle Adjustment — A Modern Synthesis 1 Introduction**. 2010.

VDI/VDE-2634. Optical 3D-measuring systems VDI. In: **VDI/VDE guidelines**. [s.l.] VDI/VDE guidelines, 2008. p. 1–3.

VILARNAU, N. H. **Integration of optical and acoustic sensor data for 3D underwater scene reconstruction**. [s.l.] University of Girona, 2009.

WALDRON, D.; MULLEN, L. **Underwater optical ranging: A hybrid LIDAR-RADAR approach**. OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. **Anais...Biloxi**, MS: IEEE, 2009.

WANG, Y.; ZHANG, S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing: reply to comment. **Optics Letters**, v. 35, n. 24, p. 4121–4123, 15 mar. 2010.

WANG, Y.; ZHANG, S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation. **Optics Express**, v. 19, n. 6, p. 5149, 14 mar. 2011.

WOZNIAK, B.; DERA, J. **Light Absorption and Absorbents**. 1. ed. [s.l.: s.n.].

YAU, T.; GONG, M.; YANG, Y.-H. Y. Underwater Camera Calibration Using Wavelength Triangulation. **cv-foundation.org**, p. 2499–2506, 2013.

YPMA, T. J. Historical Development of the Newton–Raphson Method. **SIAM Review**, v. 37, n. 4, p. 531–551, dez. 1995.

YU, S. et al. **Development of High-Resolution Acoustic Camera based Real-Time Object Recognition System by using Autonomous Underwater Vehicles**. OCEANS 2006. **Anais...IEEE**, set. 2006.

ZHANG, S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 48, n. 2, p. 149–158, fev. 2010.

ZHANG, Z. Camera Calibration. In: HALL, P. (Ed.). **Emerging Topics in Computer Vision**, Prentice Hall Professional Technical Reference. [s.l.: s.n.]. p. 4–43.

ZHENGYOU ZHANG. **Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations**. Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. **Anais...Kerkyra: IEEE**, 1999.

ZHENGYOU ZHANG. Camera calibration with one-dimensional objects. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 26, n. 7, p. 892–899, jul. 2004.

ZUCHELLI, M. **Optical flow based structure from motion**. [s.l.] Royal

Institute of Technology, 2002.

ZUMBRUNN, R. **Automated fast shape determination of diffuse reflecting objects at close range by means of structured light and digital phase measurement**. Proc. ISPRS Intercommission Conference on Fast Proc. of Photogrammetric Data. **Anais...**Interlaken, Switzerland: 1987.

ZUO, C. et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiply objects with complex shapes. **Optics Express**, v. 20, n. 17, p. 19493, 2012.

ZUO, C. et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 51, n. 8, p. 953–960, ago. 2013.

APÊNDICE A – PRINCÍPIO DE FERMAT E PROJEÇÃO DIRETA PARA TRÊS MEIO

A.1 PRINCÍPIO DE FERMAT

A forma moderna do princípio de Fermat diz que: “um feixe de luz indo do ponto *A* ao ponto *B* deve percorrer o caminho óptico (OPL, *optical path length*) que é estacionário em respeito a variações do caminho”. Em suma, o OPL é um extremo, podendo ser tanto um mínimo quanto um máximo e as vizinhanças desse ponto pouco variam (HECHT, 2001). Um exemplo de quando o OPL é um máximo é no caso da reflexão interna em um espelho elíptico causada por uma fonte de luz pontual em seu centro, a luz irá percorrer tanto o menor quanto o maior caminho óptico. Existem materiais com índice de refração negativo (metamaterial), nesse caso o OPL adotado pela luz pode ter valores nulos ou negativos (MARQUÉS; MARTÍN; SOROLLA, 2007). Nos casos práticos de refração de interesse da presente proposta de tese, pode-se considerar que o OPL será sempre um mínimo.

A figura 204 ilustra três casos diferentes para a luz percorrer do ponto **A** ao **B**. A equação geral para o OPL em um meio que varia seu índice de refração com a distância para a luz percorrer do ponto **A** ao **B** é dada por (38) (caso (a) da figura 204), que é uma integral de linha. Conforme o princípio de Fermat, nos pontos em que sua derivada é igual a zero, obtém-se o OPL para percorrer entre os pontos **A** e **B**.

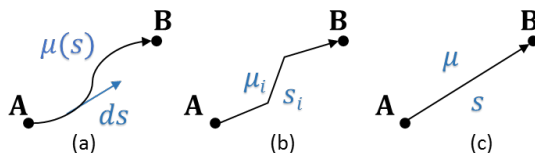


Figura 204 – Caminho óptico da luz para: (a) o índice de refração é diferente em cada posição (caso genérico); (b) índice de refração é diferente em “i-ésimos” discretos meios e (c) em um único meio.

$$L = \int_A^B \mu(s) ds. \quad (38)$$

Em um sistema com meios de refração discretos (figura 205 e caso (b) e (c) da figura 204), pode-se reescrever (38) como:

$$L = \sum_{i=0}^n \mu_i s_i. \quad (39)$$

A.2 DEDUÇÃO DA LEI DE SNELL

A figura 205 ilustra o caminho óptico traçado pela luz ao passar por três meios de propagação diferentes, no caso, ar, vidro e água. A câmera é representada pelo triângulo na imagem, onde é indicado seu centro de projeção \mathbf{C} , comprimento focal f , plano imagem (base do triângulo) e eixo Z . O vetor obtido pelo ponto central da câmera e o ponto \mathbf{m} no plano imagem possui direção \mathbf{v}_0 e faz a interseção com a primeira interface de refração no ponto \mathbf{q}_1 . A direção do feixe seguinte (\mathbf{v}_1) é dada pela lei de Snell. O processo se repete até a obtenção do último feixe.

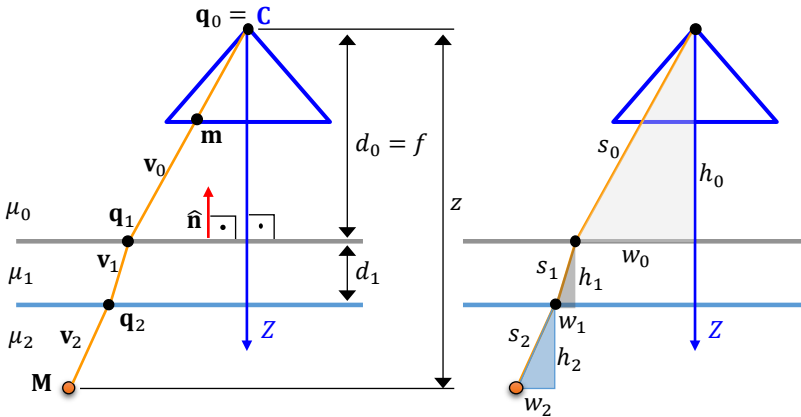


Figura 205 – Modelagem bidimensional do caminho óptico entre o ponto \mathbf{m} no sensor da câmera e \mathbf{M} (ponto de interesse) (esquerda). Parametrização do caminho óptico em triângulos de altura h_i , base w_i e hipotenusa s_i (direita).

No caso da projeção direta (objeto \rightarrow imagem), em contraste com a projeção inversa, onde se conhece a direção do primeiro feixe (\mathbf{v}_0), é necessário realizar o cálculo do caminho de menor tempo percorrido pela luz entre \mathbf{M} e \mathbf{m} , conforme o princípio de Fermat descrito na seção

anterior. Para uma melhor visualização dos componentes do caminho óptico, para cada meio i , pode-se definir triângulos de altura h_i , base w_i e hipotenusa s_i , conforme a imagem da direita na figura 205.

Para obter o comprimento do caminho óptico deve-se minimizar a equação (39):

$$L = \min_{w_i \in \mathbb{R}_+} \sum_{i=0}^n \mu_i s_i = \min_{w_i \in \mathbb{R}_+} \sum_{i=0}^n \mu_i \sqrt{w_i^2 + d_i^2}. \quad (40)$$

Utilizando a equação (39) para dois meios (1 e 2):

$$L = \mu_1 \sqrt{w_1^2 + d_1^2} + \mu_2 \sqrt{w_2^2 + d_2^2},$$

derivando L em relação a w_1 e igualando a zero, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dw_1} = 0 &\Rightarrow \mu_1 \frac{w_1}{\sqrt{w_1^2 + d_1^2}} - \mu_2 \frac{w_2}{\sqrt{w_2^2 + d_2^2}} = 0, \\ \frac{w_1}{\sqrt{w_1^2 + d_1^2}} \mu_1 &= \frac{w_2}{\sqrt{w_2^2 + d_2^2}} \mu_2, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\text{como } w_2 = w - w_1: \quad \frac{w_1}{\sqrt{w_1^2 + d_1^2}} n_1 = \frac{w - w_1}{\sqrt{(w - w_1)^2 + d_2^2}} n_2, \quad (42)$$

$$\text{e como:} \quad \text{sen}(\theta_i) = \frac{w_i}{\sqrt{w_i^2 + d_i^2}}, \quad (43)$$

obtem-se a lei de Snell (14): $\text{sen}(\theta_1)\mu_1 = \text{sen}(\theta_2)\mu_2$.

De forma alternativa, expandindo a equação (42) obtém-se um polinômio de ordem 4:

$$f(y) = Gy^4 - 2Gwy^3 + \left(Gw + d_1^2 - \frac{d_1^2}{r^2}\right)y^2 + 2d_1^2wy - d_1^2w^2 = 0, \quad (44)$$

sendo, $y = w_1$, $r = \mu_2/\mu_1$ e $G = \frac{1}{r^2} - 1$. Das quatro possíveis soluções para (44), a de interesse está no intervalo $[0, w]$. Dedução baseada em (GLAESER; SCHRÖCKER, 2000).

É interessante notar que como o índice de refração é dado pela velocidade da luz no vácuo dividida pela velocidade da luz no meio ($\mu_i = c/\tilde{v}_i$), dividindo L pela velocidade da luz, obtém-se o tempo de propagação. Sendo assim, dividindo (39) por c :

$$t_{OPL} = \frac{L}{c} \rightarrow \frac{c}{c} \sum_{i=0}^n \frac{1}{\tilde{v}_i} S_i \rightarrow \sum_{i=0}^n \frac{S_i}{\tilde{v}_i}$$

$$t_{OPL} = \frac{L}{c}. \quad (45)$$

A.3 MENOR CAMINHO ÓPTICO PARA TRÊS MEIOS DE PROPAGAÇÃO

Para três meios de propagação (duas interfaces de refração), tem-se duas incógnitas. Conforme a equação (41) obtém-se o seguinte sistema de duas equações:

$$\begin{cases} \frac{w_2}{\sqrt{w_2^2 + d_2^2}} \mu_2 = \frac{w - w_0 - w_2}{\sqrt{(w - w_0 - w_2)^2 + d_1^2}} \mu_1 & \text{Meio 2 para o 1} \\ \frac{w - w_0 - w_2}{\sqrt{(w - w_0 - w_2)^2 + d_1^2}} \mu_1 = \frac{w_1}{\sqrt{w_0^2 + d_0^2}} \mu_0 & \text{Meio 1 para o 0} \end{cases} \quad (46)$$

Sendo que: $w = w_0 + w_1 + w_2$ e $w_0, w_1, w_2 \in \mathbb{R}_+$.

Expandindo a equação (46) obtém-se uma equação de ordem 12 (YAU; GONG; YANG, 2013) (AGRAWAL et al., 2012), sendo possível realizar a projeção direta (objeto \rightarrow imagem) em uma câmera através de duas interfaces placas de refração (três meios).

APÊNDICE B – PARÂMETROS DO SISTEMA ÓPTICO ESTÉREO

As câmeras, lentes e projetor que compõe o sistema óptico estéreo ativo utilizado nos experimentos da tese são expostos nas figuras 206, 207 e 208 e suas respectivas especificações nas tabelas 53, 54 e 55. Esse sistema foi desenvolvido anteriormente na tese (PINTO, 2010).

Câmeras



Figura 206 – Câmera Flea 2 da antiga Point Grey (comprada pela Flir) do sistema estéreo.

Tabela 53 – Principais especificações das câmeras do sistema estéreo (POINTGREY (FLIR), 2017).

Fabricante	Point Grey (Flir)
Modelo	FL2-20S4M-C
Sensor	CCD
Cor	Mono
Obturador (shutter)	Global
Interface	Firewire B
Formato do sensor	1/1,8"
Resolução espacial	1624 × 1224 pixel ²
ADC (análogo para digital)	12 bits
Centro da imagem	812, 612
Tamanho do pixel	4,4 × 4,4 μm ²
Frequência máxima na resolução nativa	15 Hz
Tempo de exposição	0,02 ms a > 10 s
Acoplamento da lente	C-Mount

Lentes



Figura 207 – Lente de 8 mm da Computar utilizada no sistema estéreo (COMPUTAR, 2017a).

Projektor

Tabela 54 – Especificações da lente de 8 mm da Computar utilizada no sistema estéreo (COMPUTAR, 2017b).

Fabricante	Computar	
Modelo	M0814-MP2	
Comprimento focal	8 mm	
Formato de sensor máximo	(8,8 × 6,6) mm ² φ 11 mm	
Abertura máxima	1:1,4	
Tamanho para filtro	M30.5 P = 0,5 mm	
Dimensão	φ33,5 mm × 28,2 mm	
Ângulo de visão (formato de sensor ½)	Diagonal	51,9°
	Horizontal	42,5°
	Vertical	32,4°



Figura 208 – Projetor LG / HS101 do sistema estéreo (LG, 2007).

Tabela 55 – Especificações do projetor LG / HS101 (LG, 2007).

Fabricante / Modelo	LG / HS101
Resolução	(800 × 600) pixels
Tipo de lâmpada	RGB LED
Brilho	100 ANSI lumen
Contraste	2 000:1
Dimensões	(154 × 117 × 50) mm ³

APÊNDICE C – OBTENÇÃO DA POSIÇÃO DAS JANELAS DO TANQUE POR PARÂMETROS EXTRÍNSECOS

Com o intuito de conhecer a posição e orientação das janelas em relação às câmeras do sistema ($d_0^L, d_0^R, \mathbf{A}_L, \mathbf{A}_R$) e compara-los com os valores obtidos durante a calibração, utilizou-se a terceira câmera para calcular os parâmetros extrínsecos de padrões de círculos colados sobre a superfícies das janelas (Figura 209). Para tal, é necessário calibrar a terceira câmera e também adquirir uma foto com todas as câmeras de uma mesma pose “ x ” do padrão de calibração, que torna possível relacionar os sistemas de coordenadas (SC) das três câmeras. A figura 210 ilustra as transformações de SC necessárias para obtenção das matrizes Rt . Os procedimentos para obtenção dos valores de referência da primeira interface de calibração foram:

- Posicionamento de uma terceira câmera com visão a ambas as janelas do tanque.
- Calibração da terceira câmera (ou central).
- Obtenção da imagem do padrão (pose “ x ”) vista com as três câmeras ao mesmo tempo.
- Cálculo de Rt_r^L, Rt_r^R e Rt_r^C : Matriz de parâmetros extrínsecos da imagem obtida anteriormente para as três câmeras.
- Cálculo de Rt_{1L}^C e Rt_{1R}^C : Matriz de parâmetros extrínsecos da imagem do padrão na parede esquerda e direita (L e R) do tanque para o sistema de coordenadas da terceira câmera.
- Cálculo de Rt_{1L}^L e Rt_{1R}^R : Matrizes que relacionam o sistema de coordenadas do padrão na parede esquerda e direita do tanque para o SC das respectivas câmeras. Para obter essas matrizes são realizadas as seguintes conversões de SC (Figura 210):
- Rt_{1R}^C : Sistema de coordenadas do padrão na parede do tanque direito (R) para o da terceira câmera.
- $(Rt_x^C)^{-1}$: Sistema de coordenadas da terceira câmera para o da pose de referência.
- Rt_x^R : Sistema de coordenadas da pose de referência para o da câmera direita.

O mesmo procedimento é feito para a janela esquerda (L). As equações resultantes são:

$$Rt_{1L}^L = Rt_x^L (Rt_x^C)^{-1} Rt_{1L}^C, \quad (47)$$

$$Rt_{1R}^R = Rt_x^R (Rt_x^C)^{-1} Rt_{1R}^C. \quad (48)$$

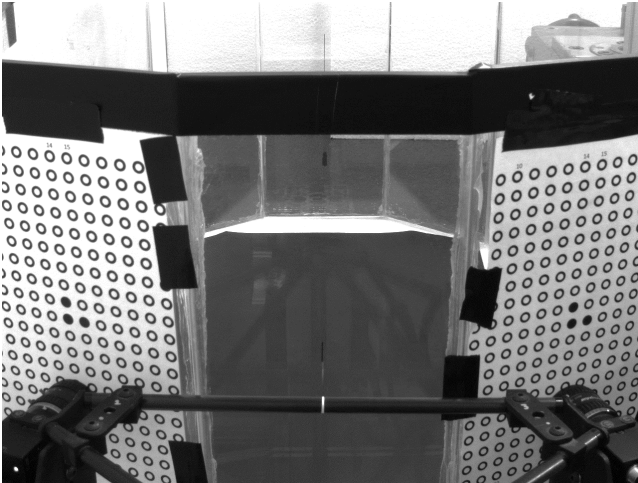


Figura 209 – Imagem obtida pela terceira câmera dos padrões de círculos colados nas janelas (pose 1L e pose 1R) do tanque utilizada para a obtenção da orientação e distância de referência.

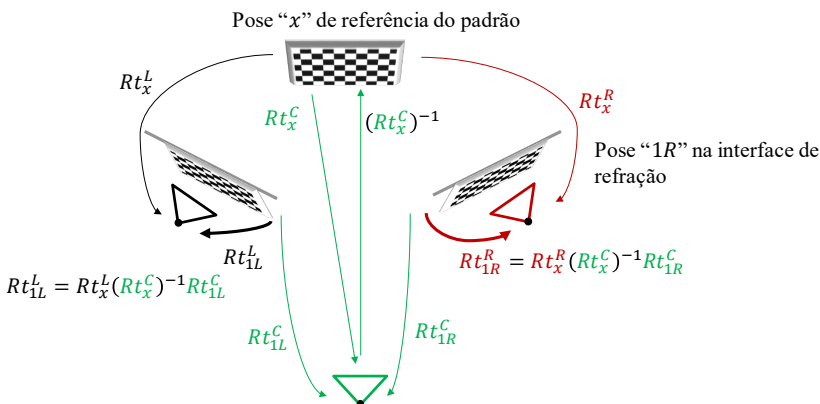


Figura 210 – Esquemático da transformação de coordenadas para a obtenção da posições e orientação das janelas no tanque.

De posse das matrizes de transformação do SC do padrão nas janelas, a distância (d_0) e orientação (\mathbf{A}) da primeira interface de refração pode ser obtida para cada uma das câmeras. Por definição, o eixo da câmera (\mathbf{A}) possui direção inversa ao vetor normal à superfície. O vetor normal pode ser obtido pela multiplicação da matriz de rotação [$R = Rt(1:3,1:3)$] pelo ponto $[0 \ 0 \ 1]^T$, que é o mesmo que a última coluna da matriz de rotação. A distância do centro de projeção à interface de refração (d_0) é o comprimento do vetor com direção \mathbf{A} , com início no centro de coordenadas e fim na interseção com a interface de refração, ou o vetor translação \mathbf{t} projetado em \mathbf{A} ($d_0 = \mathbf{t} \cdot \mathbf{A}$).

A tabela 56 compara as orientações das janelas do tanque obtidas na calibração dos parâmetros de refração (seção 6.4) e com os parâmetros extrínsecos do padrão colado nas mesmas.

Deve-se notar que as pequenas diferenças de ângulos ($0,04^\circ$ e $-0,20^\circ$) expostos na tabela 56 não indicam necessariamente que os vetores possuem direções semelhantes, mas sim que possuem ângulos semelhantes em relação ao eixo Z .

Tabela 56 – Comparação entre eixos e distâncias as janelas de referência e os obtidos na calibração. Dimensões em milímetros.

Símbolo	Referência		Valor após minimização		Diferença	
	Câmera L	Câmera R	Câmera L	Câmera R	Câmera L	Câmera R
\mathbf{A}	$\begin{bmatrix} -0,01406 \\ 0,00382 \\ 0,99989 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00773 \\ 0,01160 \\ 0,99990 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,01504 \\ 0,00278 \\ 0,99988 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,00995 \\ 0,00334 \\ 0,99994 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,00098 \\ -0,00659 \\ -0,00001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,01768 \\ -0,00827 \\ 0,00004 \end{bmatrix}$
$\mathbf{A} \angle Z$	$0,83^\circ$	$0,80^\circ$	$0,88^\circ$	$0,60^\circ$	$0,05^\circ$	$-0,20^\circ$
d_0	18,608	18,763	16,938	16,496	-1,670	-2,267

Tese

Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático Através de Interfaces Planas de Refração Utilizando Triangulação Inversa

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PósMEC

Orientador: prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

Coorientador: prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.

Pedro de Deus Vieira Buschinelli - pvb@labmetro.ufsc.br

Florianópolis, 11 de outubro de 2017



Tópicos

1. Introdução

2. Medição Óptica de Formas 3D

3. Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático

4. Triangulação Inversa em Meio Subaquático

- Modelagem dos parâmetros de refração (PR)
- Projeção inversa
- Calibração dos PR
- Medição com triangulação inversa / Projeção direta

5. Resultados Experimentais

6. Conclusões

Medição geométrica subaquática – Áreas de aplicação

Diversas áreas de interesse:

- Arqueologia: medição de artefatos, naufrágios



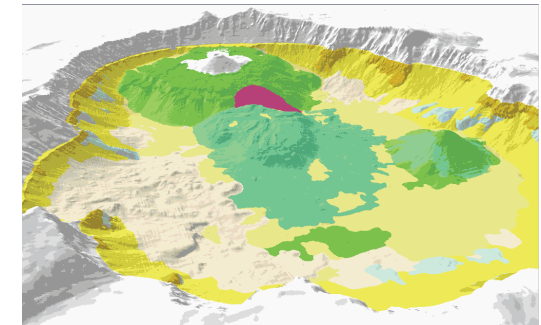
Esfinge de granito



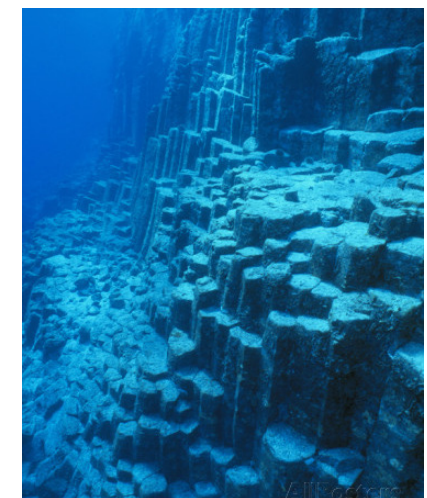
Vasos de um naufrágio

Civilização submersa de Alexandria (GODDIO, 2004)

- Geologia: mapeamento do fundo do oceano



- Biologia: mapeamento de corais, medição de peixes



Formação geológica em Galápagos

Medição geométrica subaquática – Áreas de aplicação e motivação

- Indústria do óleo & gás e naval

Inúmeros equipamentos, estruturas, tubulações, propulsores...



Motivações:

- Diversas áreas de aplicação incluindo O&G
- Desafios da medição em meio subaquático
- O Labmetro desenvolve projetos na área de O&G em parceria com a Petrobras há quase 20 anos

Objetivo Geral

Desenvolver e validar técnicas para realizar a calibração e medição com um sistema óptico estéreo ativo através de interfaces planas de refração utilizando a triangulação inversa

Objetivos Específicos

- Levantamento bibliográfico (incluindo: medição óptica subaquática e modelagem da refração)
- Desenvolvimento de algoritmo para calibração dos parâmetros de refração
- Desenvolvimento de triangulação inversa através de interfaces planas de refração
- Avaliação metrológica do sistema
- Avaliação do desvio de medição de objetos de forma complexa calibrados

Tópicos

1. Introdução

2. Medição Óptica de Formas 3D

3. Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático

4. Triangulação Inversa em Meio Subaquático

- Modelagem dos parâmetros de refração (PR)
- Projeção inversa
- Calibração dos PR
- Medição com triangulação inversa / Projeção direta

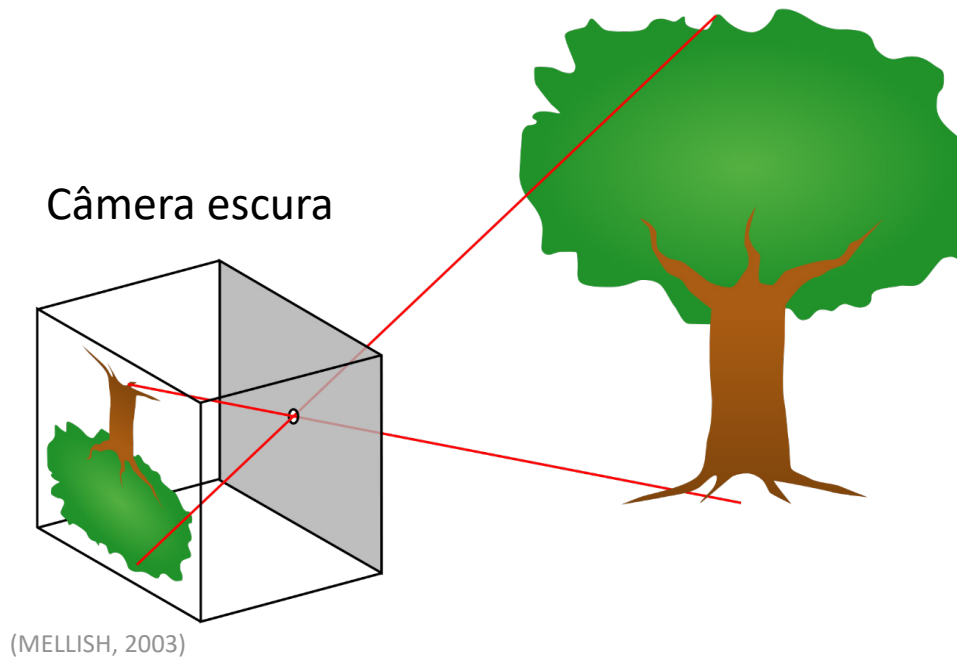
5. Resultados Experimentais

6. Conclusões

Modelo *Pinhole* (SVP)

Nomenclaturas comuns:

Pinhole – *Single View Point* (SVP) – Câmera central

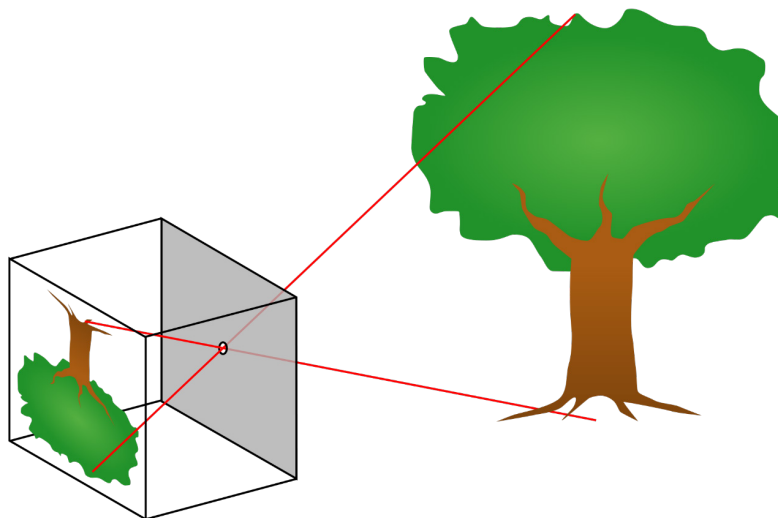


Modelo *Pinhole* (SVP)

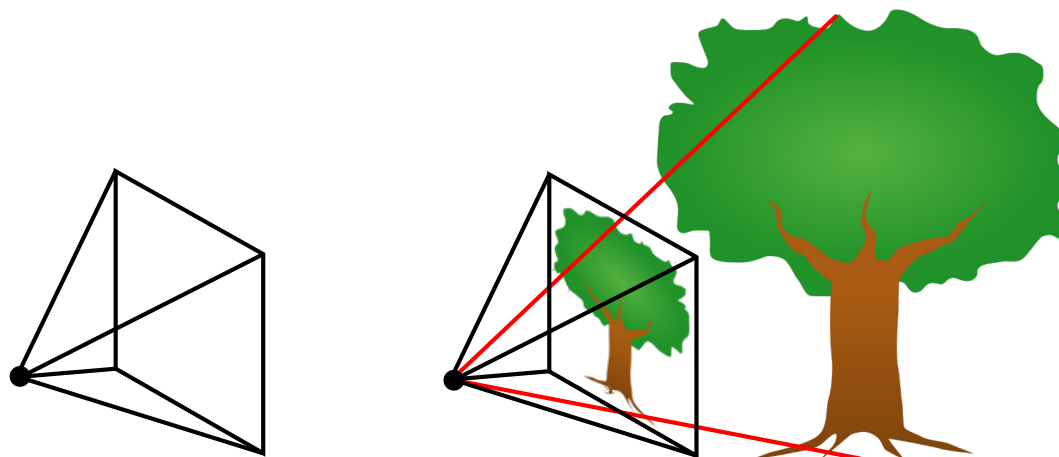


(BRUCE, 2012)

Modelo *Pinhole* (SVP)

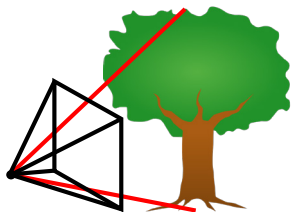


Modelo físico

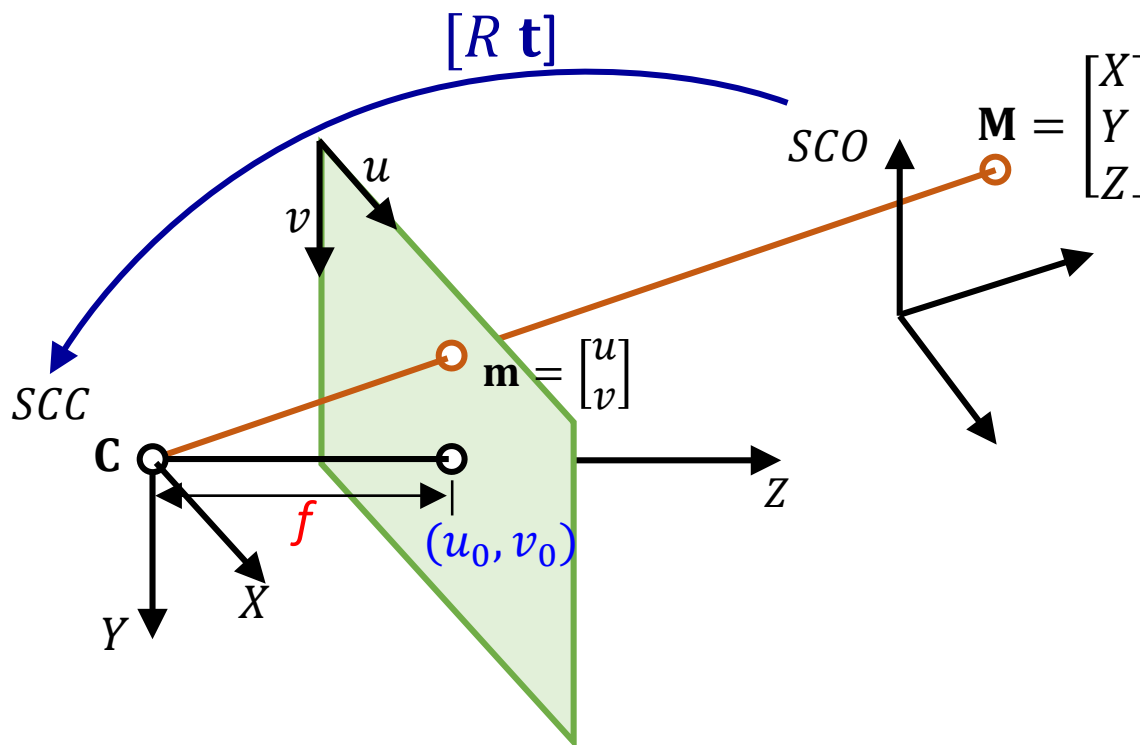


Modelo
computacional

Modelo *Pinhole* (SVP)



Projeção → Semelhança de triângulos



Adaptado de (ZHANG, 2004)

1. $SCO \rightarrow SCC$

Rotação e translação

$$\begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix}$$

Parâmetros extrínsecos

2. Projeção

Matriz de calibração

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Parâmetros intrínsecos

$$\mathbf{m} \xleftarrow{\text{Projeção}} \mathbf{M}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{m} = K \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \end{bmatrix} \mathbf{M}$$

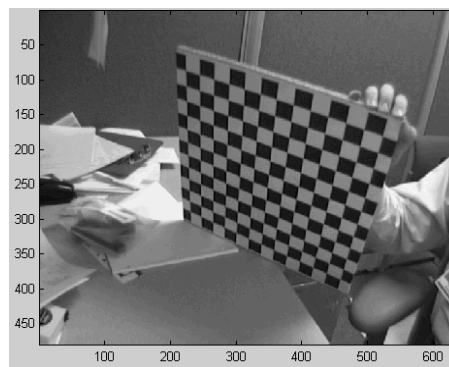
Modelo *Pinhole* + distorção de lente (SVP) – Calibração

Obter:

- Parâmetros intrínsecos (f, u_0, v_0), extrínsecos (Rt)
- Parâmetros de distorção da lente

Calibração baseada em objeto 2D (plano) – Tipo tabuleiro de xadrez

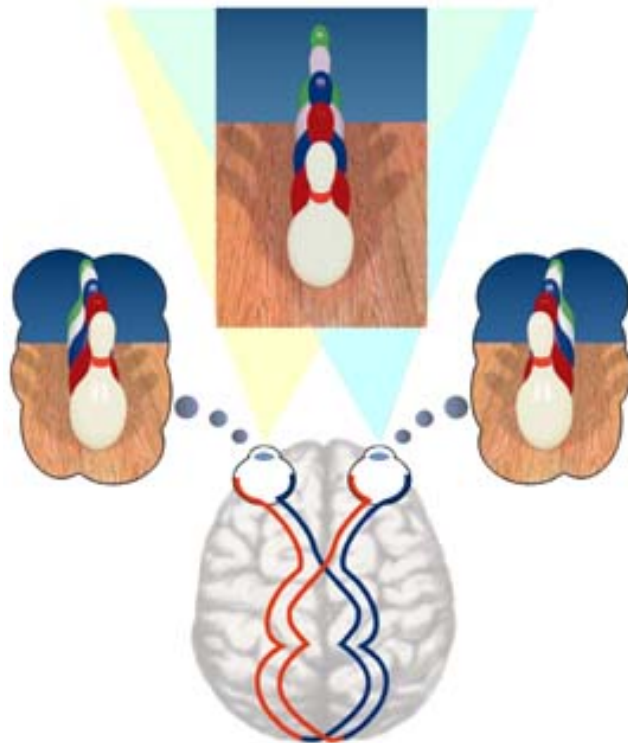
- A partir de uma série de imagens é possível calibrar a câmera (ZHENGYOU ZHANG, 1999)
- Não é necessário conhecer a posição do plano
- Padrão pode ser feito de maneira simples
- Toolbox para Matlab www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (BOUGUET, 2013)



(BOUGUET, 2013)

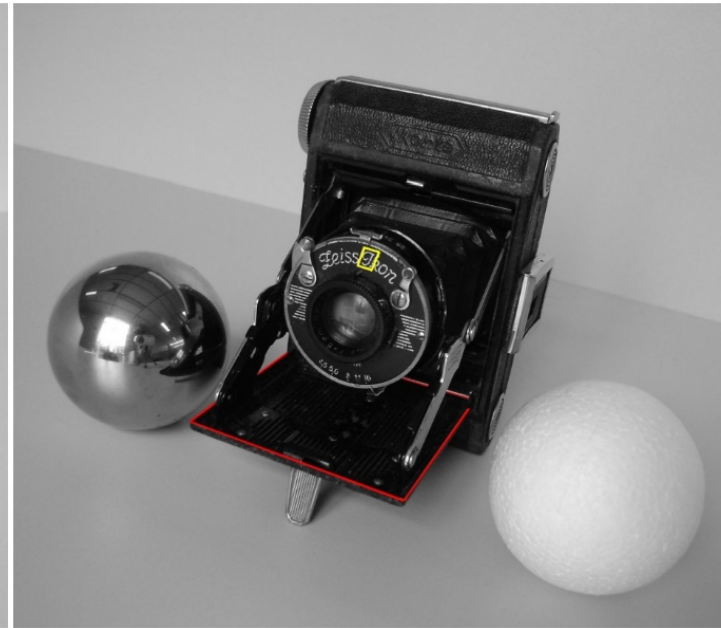
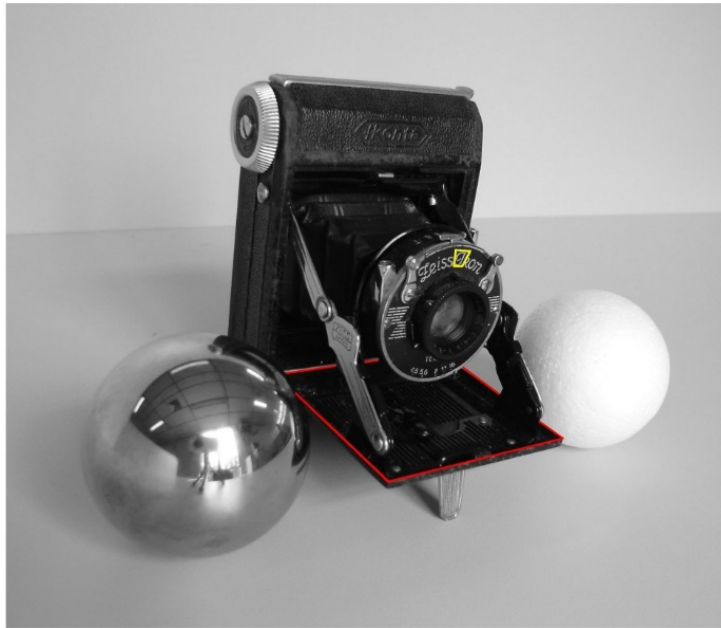
Sistemas de visão estéreo

- Percepção 3D → Visão da mesma cena por ao menos dois pontos de visão diferente (visão estéreo)
- **Passivo** → Duas câmeras (ou mais)
- **Ativo** → Utiliza **sistema de projeção**
Sistema de projeção → Auxilia na identificação de pontos correspondentes (homólogos)



(GOM, 2015)

Identificação de pontos correspondentes (homólogos)



Adaptado de (HOFMANN, 2006)

Identificação sem projeção (**passiva**)

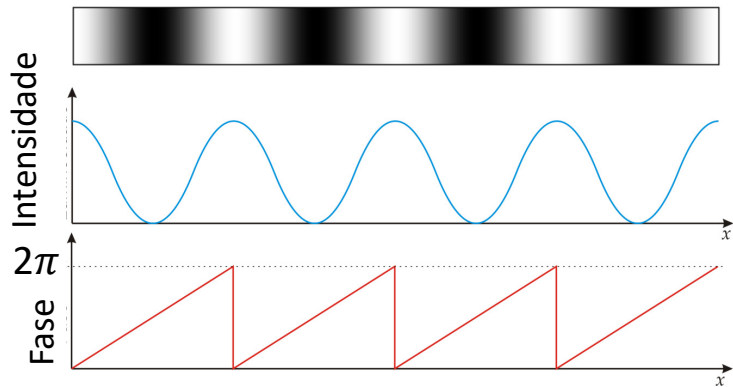
- Detecção de bordas
- Correlação espacial

Identificação com projeção (**ativa**)

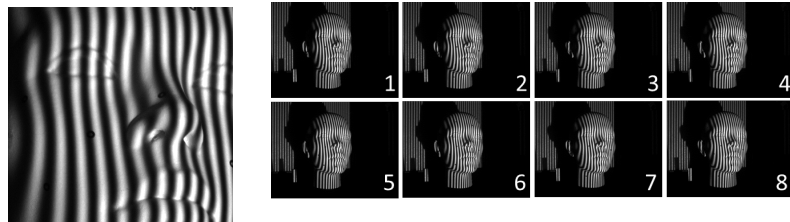
- Correlação espacial, temporal, espaçotemporal, outros...
- **Projeção de franjas** ← Utilizada no trabalho

Projeção de franjas

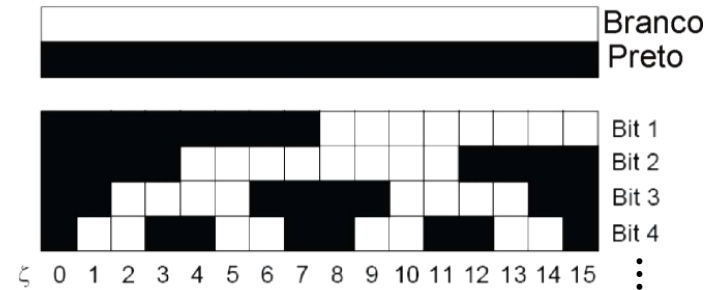
Projeção de franjas senoidais



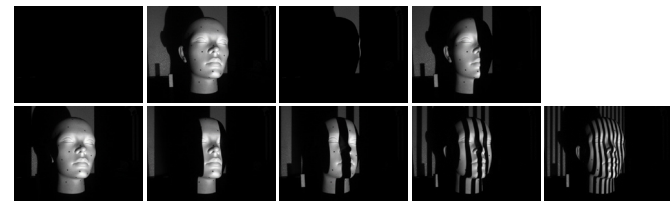
ex.: 8 passos



Projeção *Graycode*

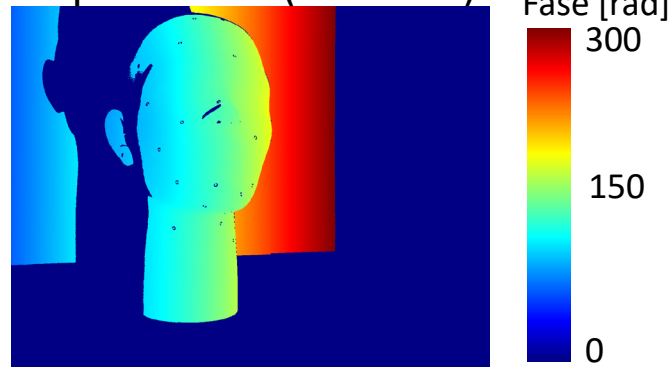


→ Remove ambiguidades de fase



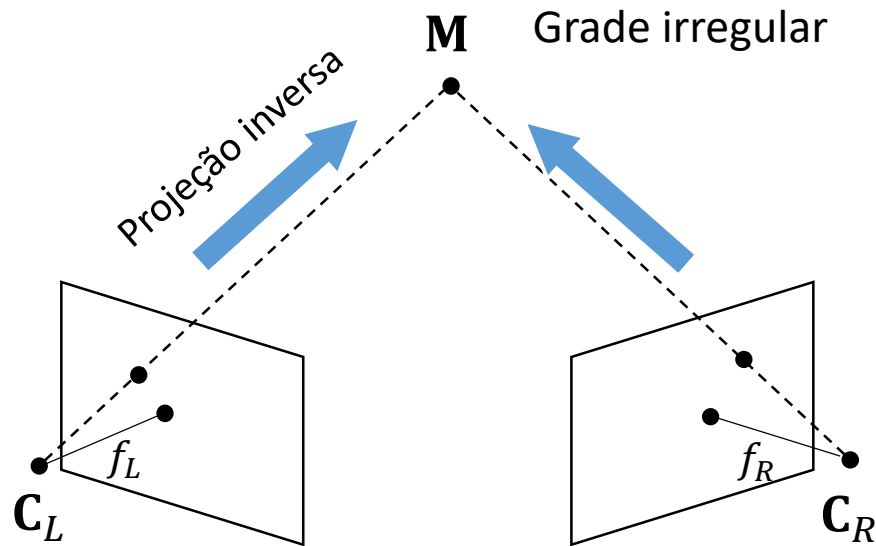
Mapa de fase (absoluta)

=

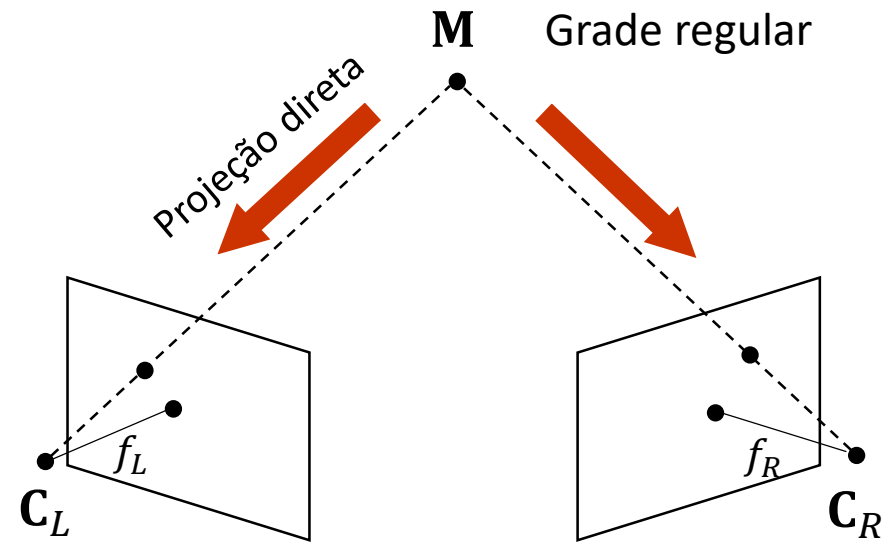


Triangulação – Direta Vs Inversa

Triangulação direta ou convencional



Triangulação Inversa



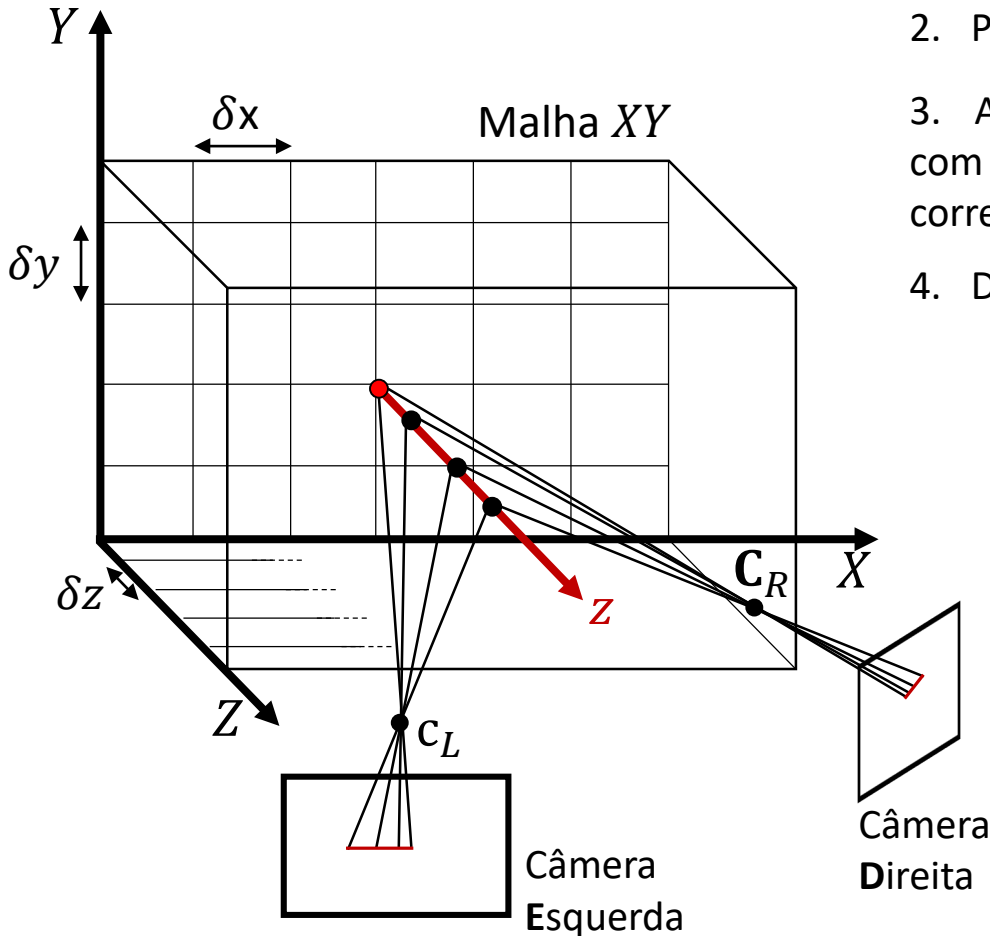
Triangulação Inversa

Configuração:

- Define-se volume de medição
- Define-se resoluções δx , δy e δz

Medição:

1. Selecionado um ponto na malha XY
2. Pontos 3D são projetados varrendo a coordenada Z
3. Avaliação de correspondência: O ponto com cota Z com melhor correspondência é selecionado. Se correspondência $>$ limiar \rightarrow ponto 3D válido
4. Decisão:
 - Se toda malha XY foi varrida, finaliza.
 - Se não, volta a "1" (outro ponto na malha XY é varrido em Z)



Triangulação Inversa

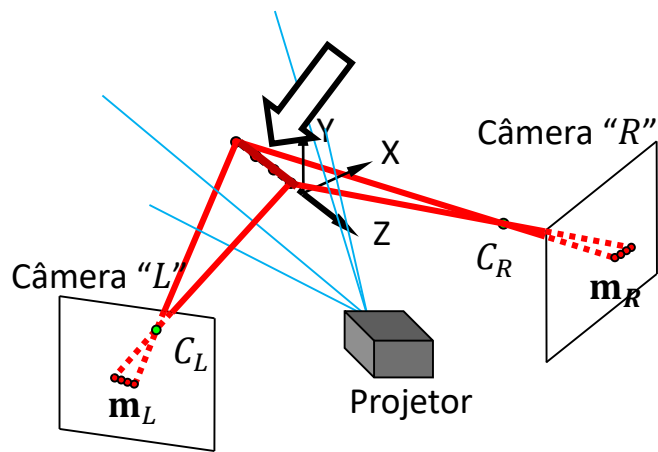
Principais vantagens

- Volume de medição e resolução pré-definidos
- Grade e distribuição dos pontos regular
- Facilidade na definição do nível de detalhamento na medição

Principal limitação

- Tempo de processamento → Número de pontos 3D a serem testados se válidos ou não

Triangulação inversa – Identificação de ponto 3D válido



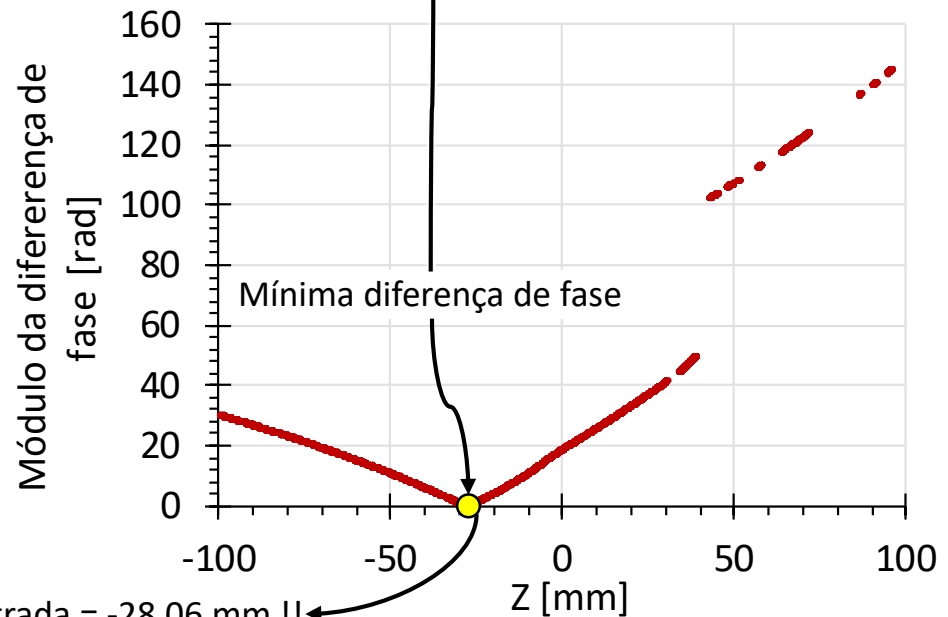
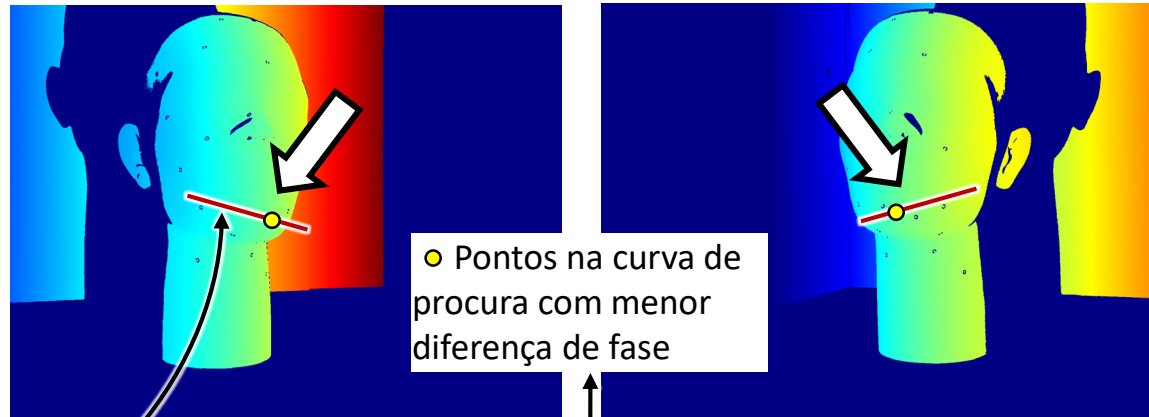
Pontos de procura em Z para $[X \ Y] = [0 \ 0]$ projetados nas imagens

Ponto 3D definido $[0,0 \ 0,0 \ -28,06]$

Processo se repete para toda grade XY

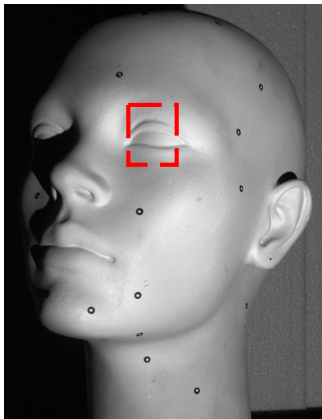
Cota Z válida encontrada = -28,06 mm !!

Mapas de fase das duas câmeras



Triangulação Inversa - Resultado típico

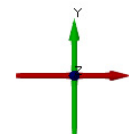
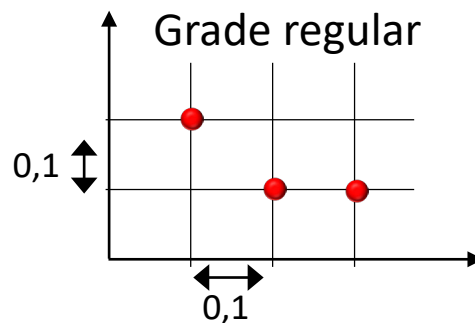
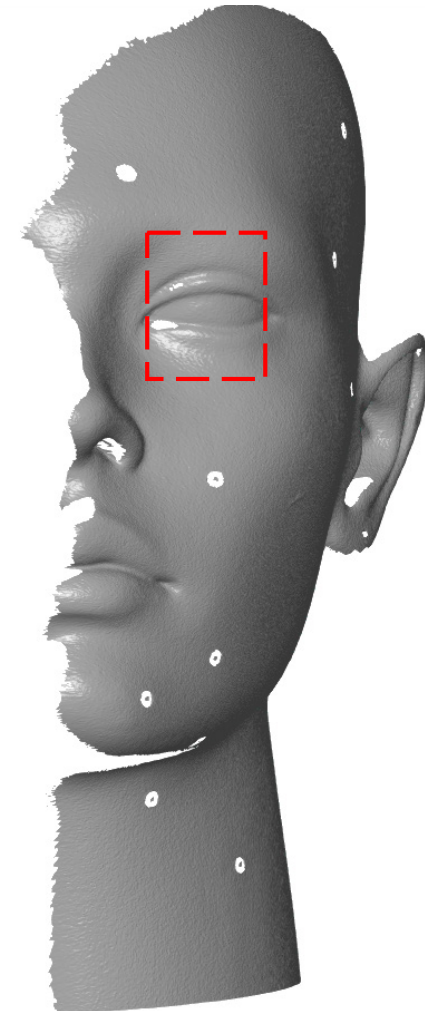
Objeto



Nuvem de pontos (detalhe)



Malha



Resultado de medição no ar obtido na tese

Tópicos

1. Introdução

2. Medição Óptica de Formas 3D

3. Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático

4. Triangulação Inversa em Meio Subaquático

- Modelagem dos parâmetros de refração (PR)
- Projeção inversa
- Calibração dos PR
- Medição com triangulação inversa / Projeção direta

5. Resultados Experimentais

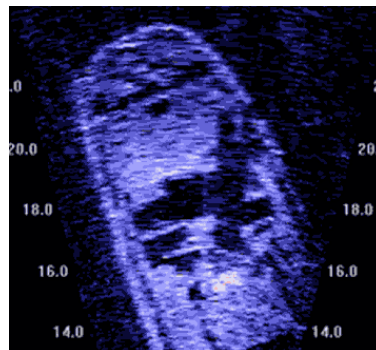
6. Conclusões

Técnicas típicas de medição subaquática

Manual

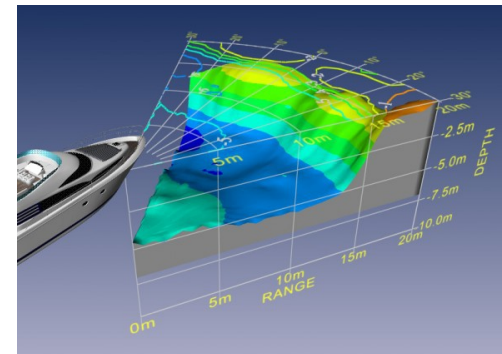


Sonar típico



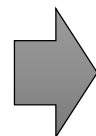
Sonar

Sonar 3D



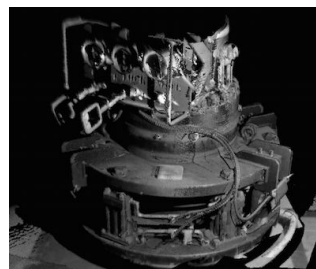
(EchoPilot, 2016)

Óptico



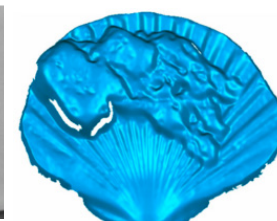
Mais detalhes, menor incerteza
 Aplicação: distâncias menores (visibilidade/absorção)

Triangulação laser



(2G Robotics, 2016)

Visão estéreo



(Bräuer-Burchardt, et. al, 2015)

Propagação da luz na água

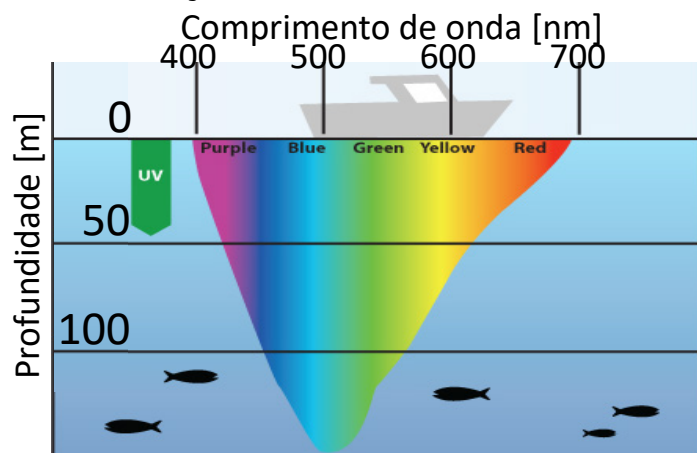
Desafios

Degradação do sinal

- Difusão ou dispersão (*scattering*)

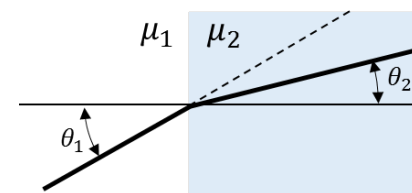


- Absorção



Absorção Vs comprimento de onda (Sea Grant, 2012)

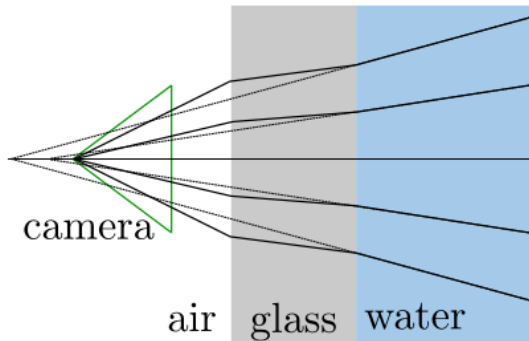
Refração



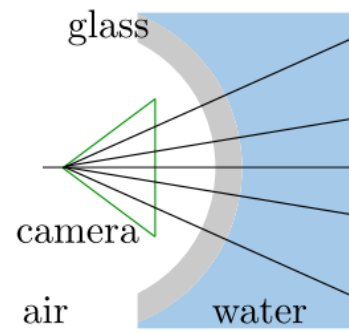
- Lei de Snell** (HECHT, 2001)
 $\text{sen}(\theta_1)\mu_1 = \text{sen}(\theta_2)\mu_2$
- Princípio de Fermat**
Caminho óptico de menor tempo

Tipos de janela de visão

Plana

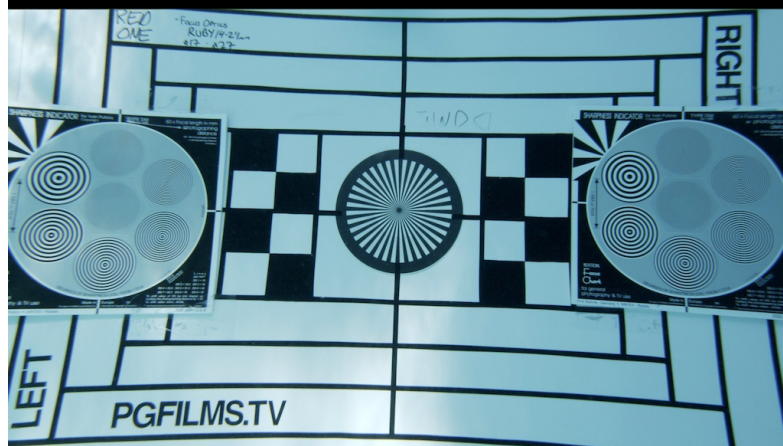


Domo

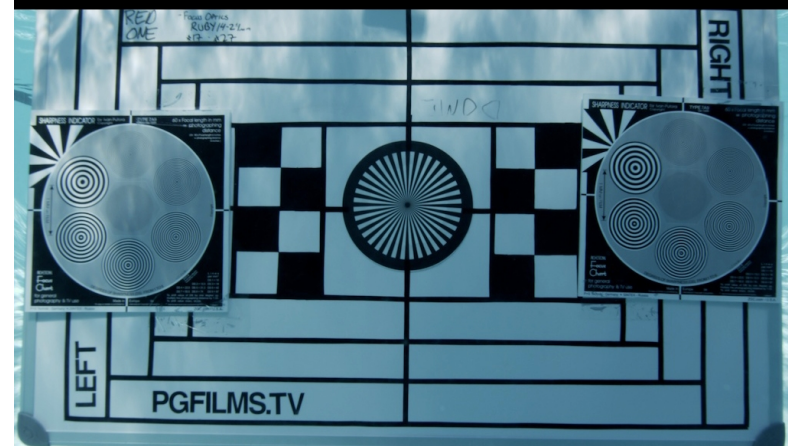


(SEDLAZECK; KOCH, 2012)

Flat Port 14mm - Distortion ex.1



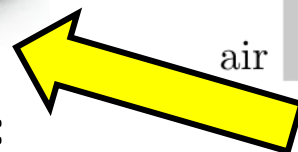
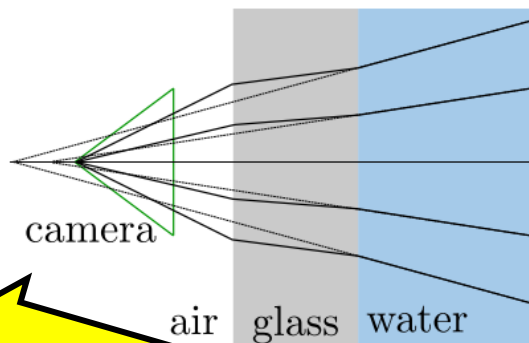
Dome Port 14mm



(GUIMARÃES, 2012)

Tipos de janela de visão

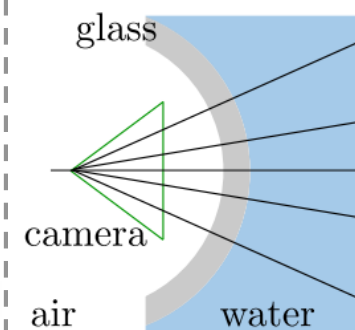
Plana



Características:

- Fácil fabricação
- Grande disponibilidade
- Visão através de um aquário
- Imagem mais próxima (magnificação)
Ex.: ar/água, magnificação de ~ 33%

Domo



(SEDLAZECK; KOCH, 2012)



- Possibilita o uso de grande angulares
- Menor distorção
- Difícil alinhamento
- Mais frágil (a choques)
- Imagem virtual **curvada** e mais próxima

Geometria plana de refração – Distorção devido a refração

Podemos modelar a refração como **distorção radial**?

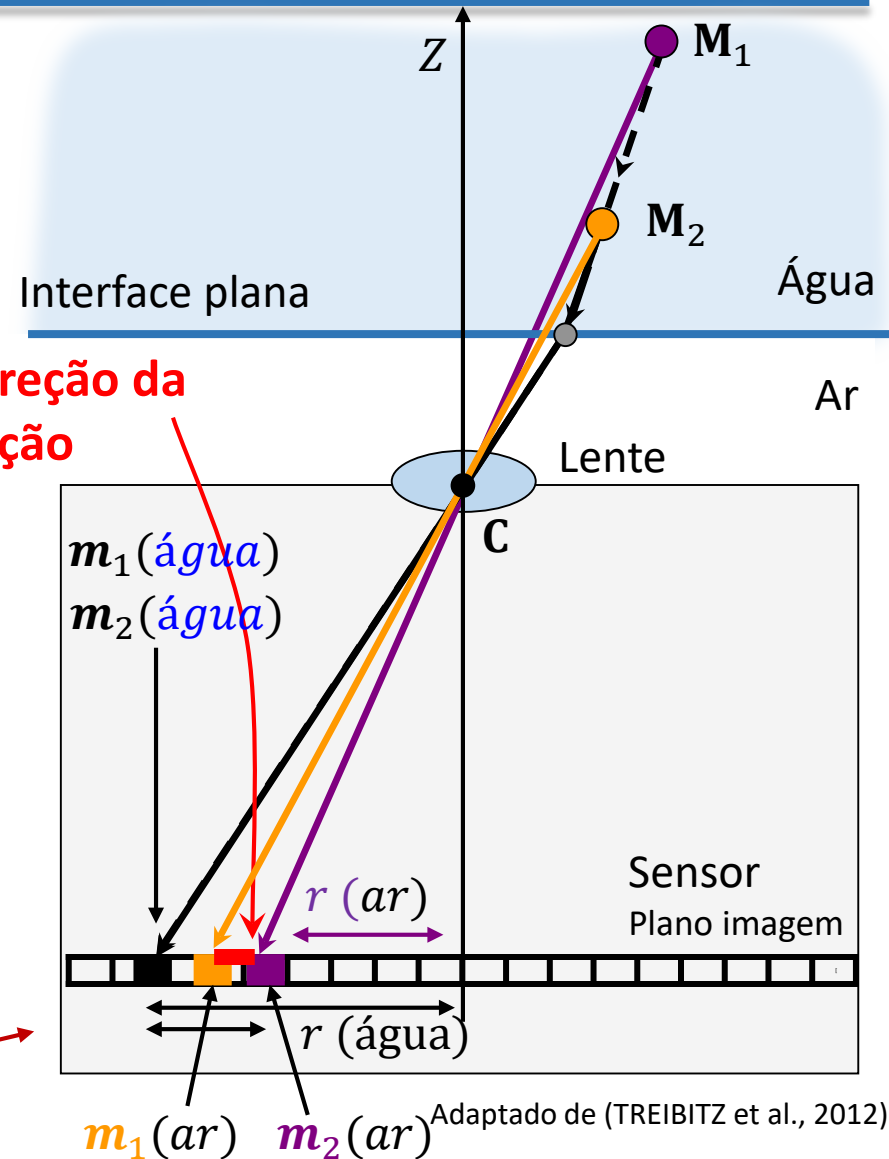
- Não pode ser 100% corrigida por correção radial (2D) → Distorção 3D!
- Objetos visíveis no ar são oclusos na água e vice-versa

Erro da correção da distorção

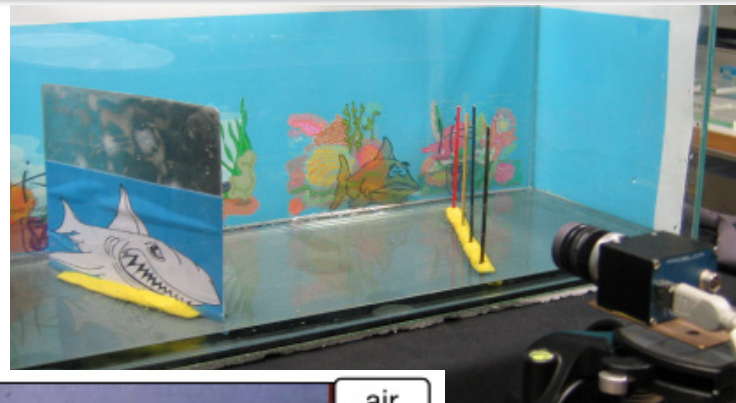


Função correção distorção radial

$$(\mathbf{m}_{\text{água}} \xrightarrow{\text{correção}} \mathbf{m}_{\text{ar}})$$



Geometria plana de refração – Distorção devido a refração



Experimento



Visão da câmera



(TREIBITZ *et al.*, 2012)

Aproximação pelo modelo SVP

Quando é válida a aproximação por SVP (*pinhole* + distorção 2D)?

Fatores que favorecem a aproximação por SVP:

- Pequeno ângulo de visão
- Objetos distantes
- Alinhamento (perpendicular) do eixo da câmera com a interface
- Distância do objeto não varia, objeto perpendicular à câmera

(TREIBITZ et al., 2012)

(AGRAWAL et al., 2012)

Tópicos

1. Introdução

2. Medição Óptica de Formas 3D

3. Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático

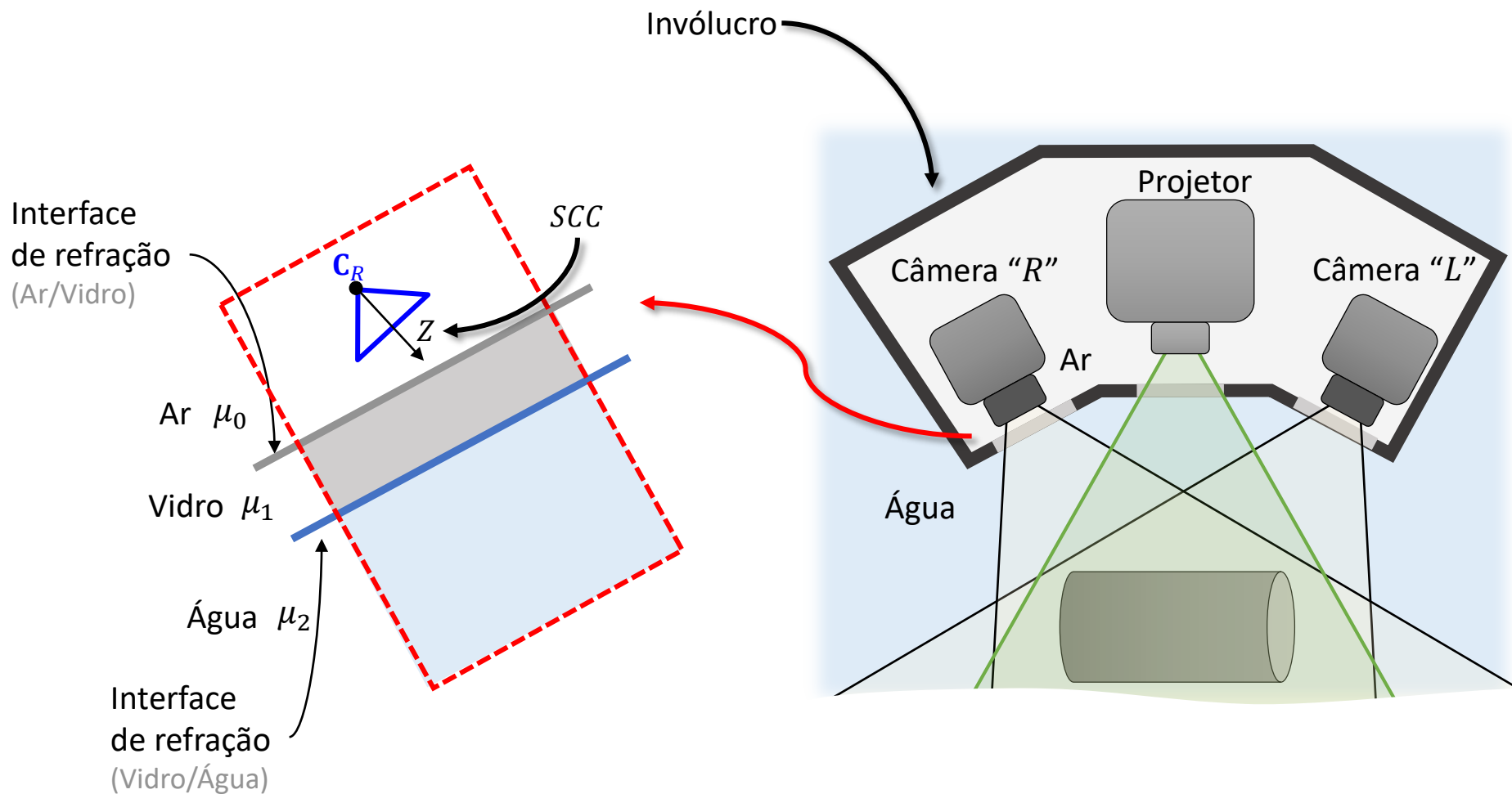
4. Triangulação Inversa em Meio Subaquático

- Modelagem dos parâmetros de refração (PR)
- Projeção inversa
- Calibração dos PR
- Medição com triangulação inversa / Projeção direta

5. Resultados Experimentais

6. Conclusões

Representação da câmera e interfaces de refração



Modelagem da refração (fisicamente correta) (**Refra**)

Modelagem da refração através de interfaces planas

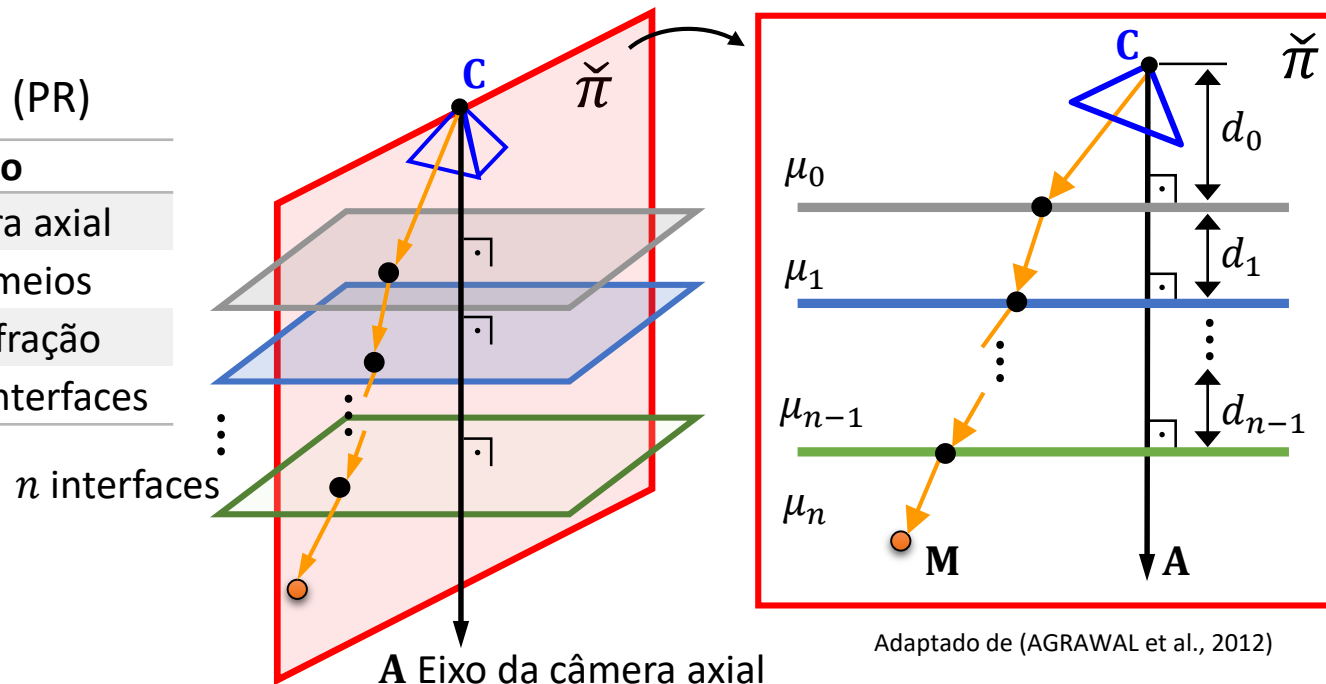
Se todas interfaces são paralelas

- Feixes (visão aparente) cruzam num mesmo eixo $A \rightarrow$ Câmera axial
- Eixo "A" é normal às interfaces e inicia no centro de projeção (C)
- Caminho óptico (para qualquer ponto na imagem) é contido em um mesmo plano

(AGRAWAL *et al.*, 2012)

Parâmetros de Refração (PR)

Símbolo	Descrição
A	Eixo da câmera axial
n	Número de meios
μ_0, \dots, μ_n	Índices de refração
d_0, \dots, d_{n-1}	Distâncias das interfaces



Adaptado de (AGRAWAL *et al.*, 2012)

Método para a Projeção Inversa Através de Interfaces Planas de Refração (*InvProjRefra*)

Método de *raytracing* desenvolvido (MATLAB e C++)

Procedimento:

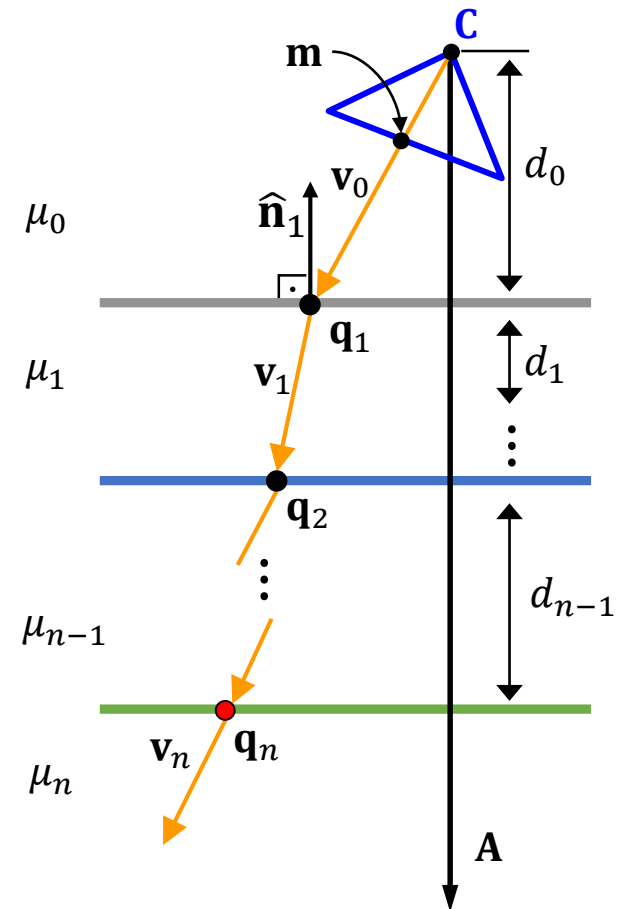
1. \mathbf{v}_0 : $\overline{\mathbf{Cm}}$, mesmo que: $\mathbf{v}_0 = K^{-1}\mathbf{m}$
2. \mathbf{q}_1 : Interseção \mathbf{v}_0 e 1ª interface
3. \mathbf{v}_1 : Forma vetorial da Lei de Snell (GLASSNER, 1989)
4. Processo é repetido até obter \mathbf{q}_n e \mathbf{v}_n

Método desenvolvido pode ser utilizado para n interfaces não necessariamente paralelas

Se as interfaces são paralelas

- $\hat{\mathbf{n}}_1 = \hat{\mathbf{n}}_2 = \dots = \hat{\mathbf{n}}_n = -\mathbf{A}$
(Normal de todos planos)

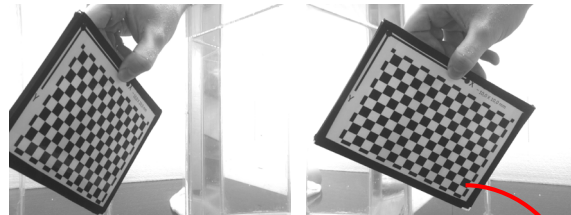
- Ponto no plano $i = \sum_{j=0}^i d_j \mathbf{A} \quad (32)$



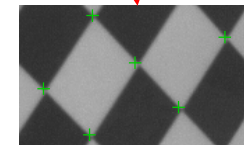
Calibração dos parâmetros de refração (PR)

1. Calibração no ar: *pinhole* + distorção (SVP)
2. Aquisição de pares de imagens do padrão na água

Padrão com pontos conhecidos e facilmente identificáveis (ex.: tabuleiro de xadrez)



3. Correção da distorção da lente (calib. ar) e identificação dos pontos 2D



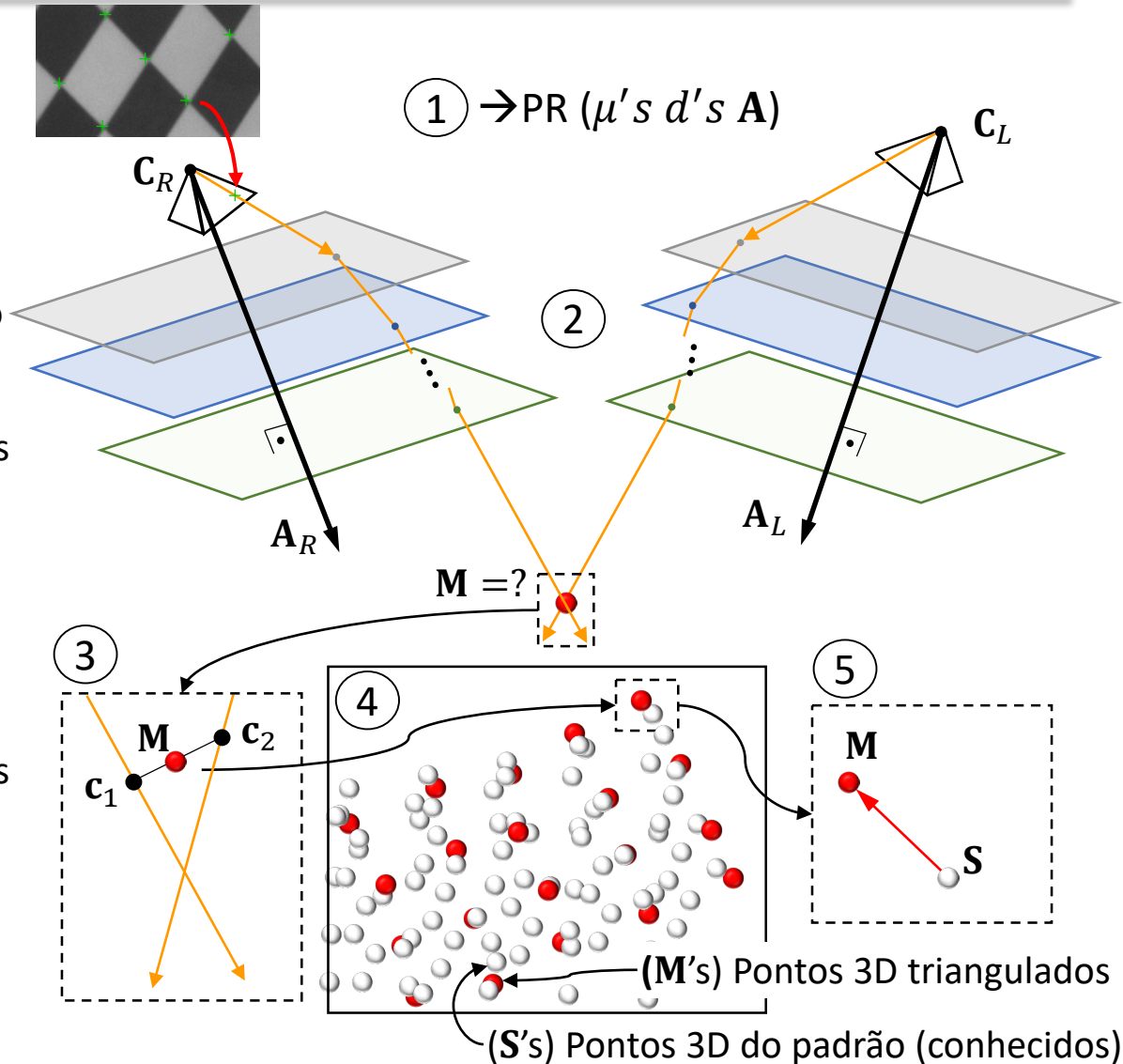
4. Os Parâmetros de Refração (PR) serão os que minimizam o erro do algoritmo de *Calibração por Correspondência Estéreo 2D-3D* desenvolvido...

Calibração de parâmetros de refração por correspondência estéreo 2D-3D

Método de calibração desenvolvido:

1. Estimativa inicial PR
2. Projeção inversa
3. Obtenção dos pontos de mínima distância entre feixes (c_1 e c_2) e ponto médio M
4. Os pontos do padrão são ajustados aos triangulados (HORN, 1987)
5. Cálculo das distâncias entre os pontos obtidos e os do padrão

- Processo se repete até encontrar os PR que resultem num mínimo erro
- Erro: Distância entre feixes ($\overline{c_1 c_2}$) e distância dos pontos triangulados aos pontos do padrão



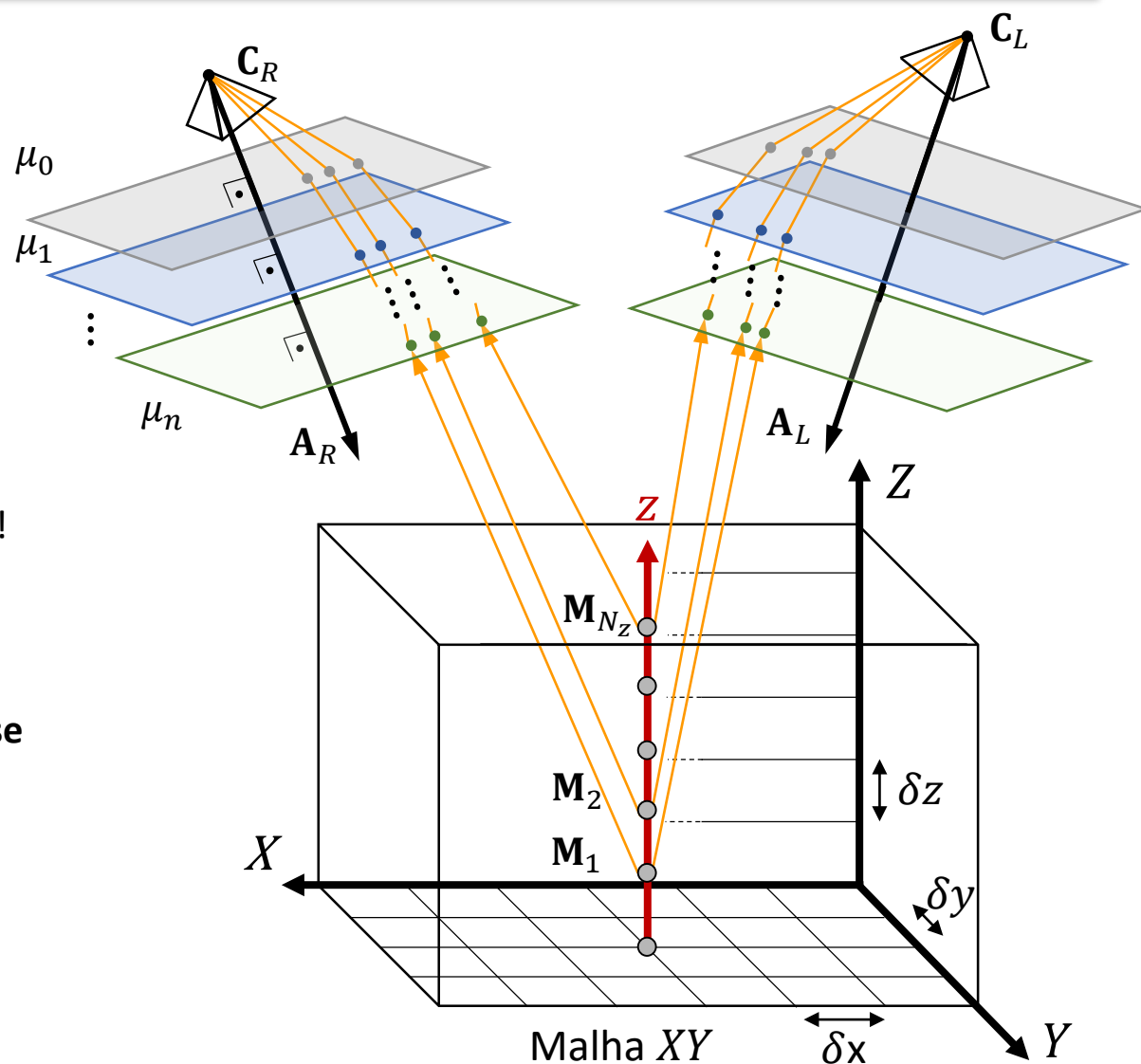
Modelo para medição com Triangulação Inversa

Projeção direta – Princípio de Fermat

Soluções analíticas:

- 2 Meios \rightarrow Polinômio de ordem 4
(GLAESER; SCHRÖCKER, 2000)
- 3 Meios \rightarrow Polinômio de ordem 12!
(AGRAWAL et al., 2012)
- Mais de 3 meios = ???

Método iterativo desenvolvido na tese



Algoritmo iterativo desenvolvido na tese

Algoritmo Iterativo para a Projeção Através de Interfaces Planas de Refração (*IteraProjRefra*)

1. Estimativa inicial: Projeção direta no ar (\mathbf{m}_1)
2. Projeção inversa do ponto estimado
3. Cálculo do vetor de erro 3D \mathbf{V}_e : Distância \mathbf{M} ao raio projetado
4. Verificação do erro e iterações
 $\|\mathbf{V}_e\| \leq \text{Tolerância}$ OU $\text{Iterações} \geq \text{Itera}_{\text{Máx}}$
 - Se **sim**: **Finaliza**. Retorna o ponto \mathbf{m} na imagem
 - Se **não**: Incrementa o número de iterações e continua
5. Cálculo do vetor de correção 2D \mathbf{m}_c

$$\mathbf{m}_c = f \frac{1}{\mathbf{V}_{ez}} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ex} \\ \mathbf{V}_{ey} \end{bmatrix} \tau \quad (36)$$

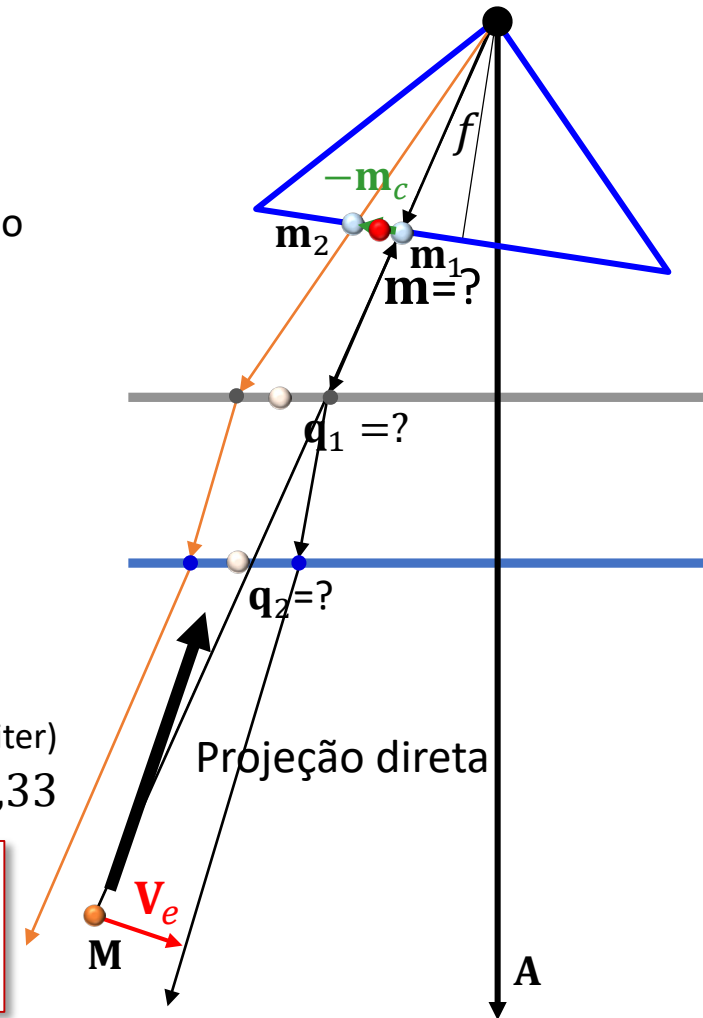
Projeção

Fator de escala (reduz nº iter)
Caso Med. Água: $\tau = 1,33$

6. Retorna à 2.

Comparação no MATLAB
Caso de 3 meios
i7 4770K

- $\sim 3 \times$ mais rápido que a solução analítica
- Converge geralmente em 5 ± 3 iterações (Tolerância utilizada = 0,001 mm)



Tópicos

1. Introdução
2. Medição Óptica de Formas 3D
3. Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático

4. Triangulação Inversa em Meio Subaquático

- Modelagem dos parâmetros de refração (PR)
- Projeção inversa
- Calibração dos PR
- Medição com triangulação inversa / Projeção direta

5. Resultados Experimentais

6. Conclusões

Avaliação Prática → Objetivos

Até onde o sistema estéreo ativo utilizado pode chegar ?

- Calibrar e avaliar no **ar** com modelo *pinhole* (SVP)

A aproximação dos efeitos da refração por modelo SVP é adequada ?

- Calibrar e avaliar na **água** com modelo *pinhole* (SVP)

Modelo geral de refração e técnicas desenvolvidas na tese funcionam bem ?

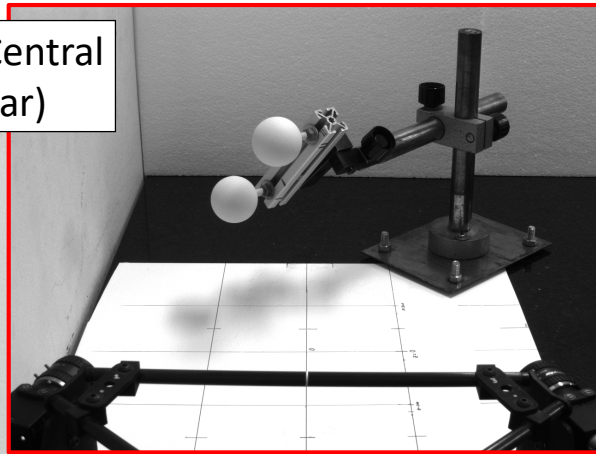
- Calibrar e avaliar na **água** com modelo fisicamente correto de refração (Refra)

Exemplos de aplicação

- Medição de trecho de *riser* e tubo como exemplo de aplicação na indústria de O&G

Setup - Sistema estéreo utilizado e montagem

Câmera Central
(auxiliar)



Resolução típica:

δ_x : 0,1 mm

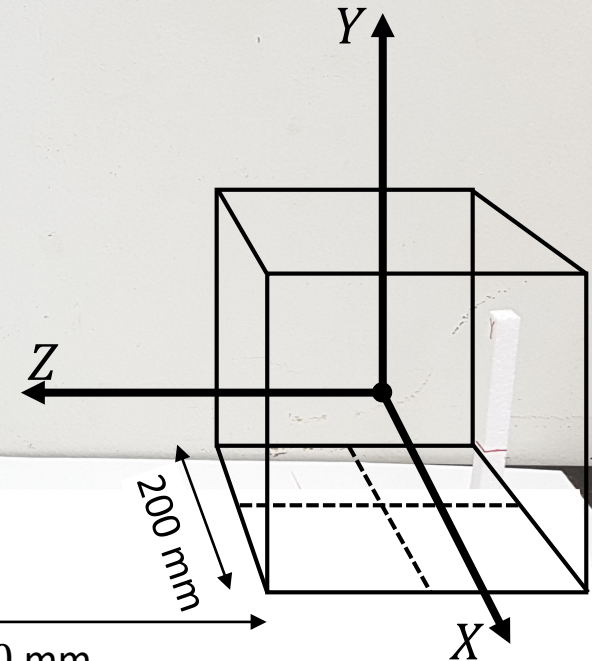
δ_y : 0,1 mm

δ_z : 0,01 mm

Câmera L

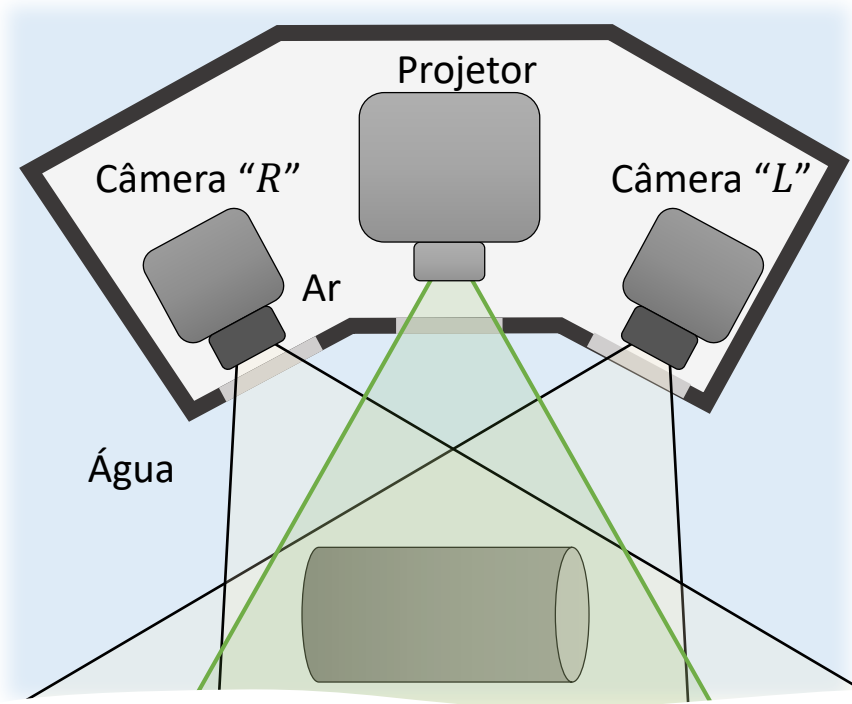
Câmera R

Projetor

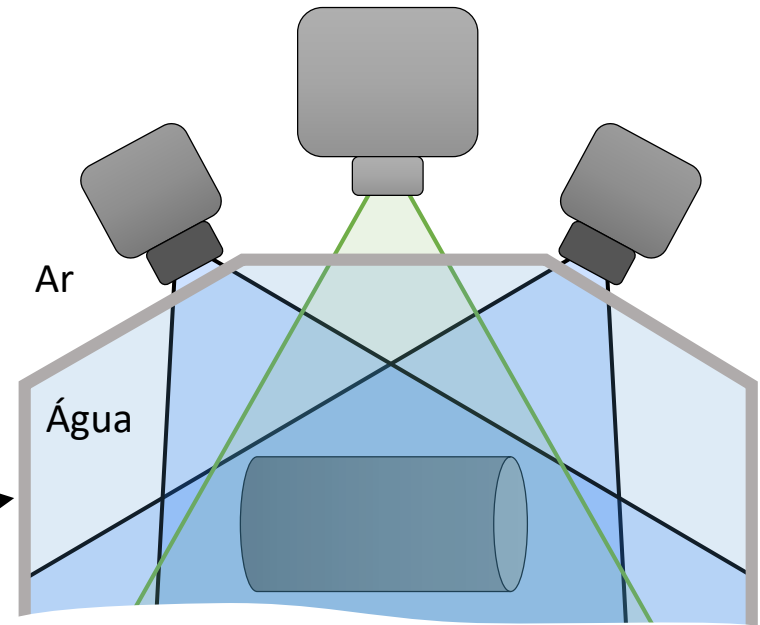
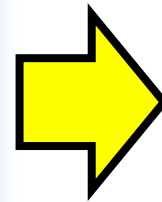


Sistema estéreo ativo desenvolvido e validado em (PINTO, 2010)

Configuração para medição subaquática

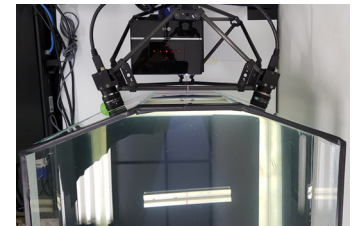


Possível concepção de protótipo

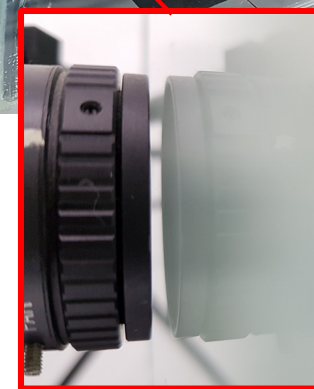
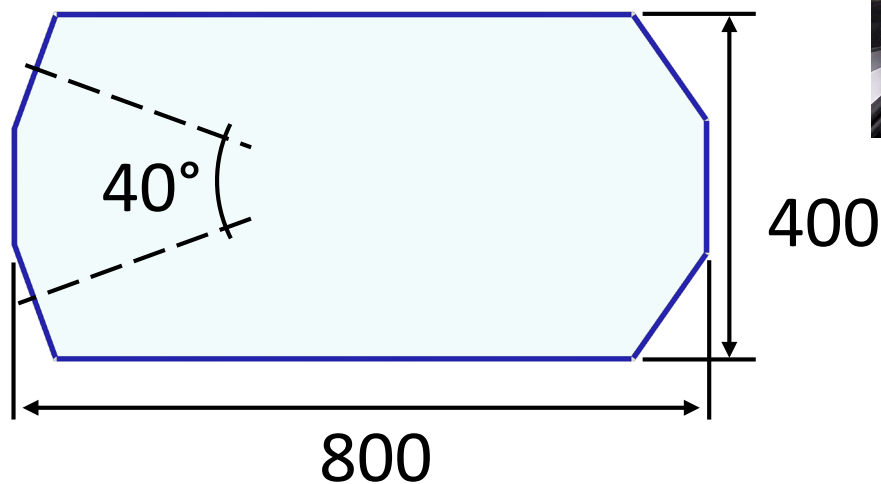
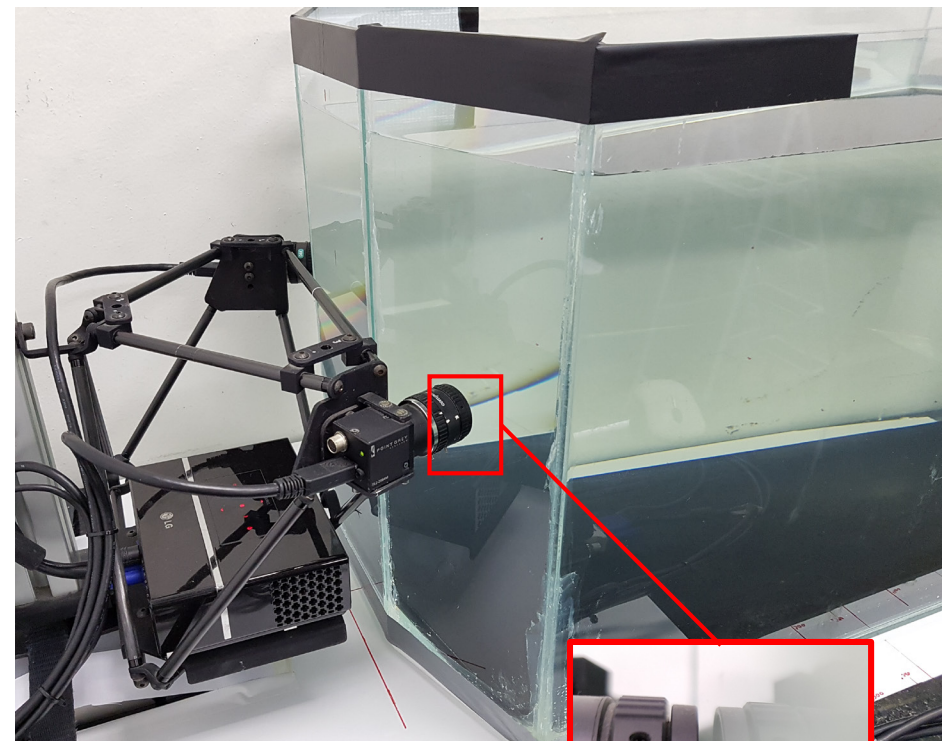


Tanque com paredes inclinadas

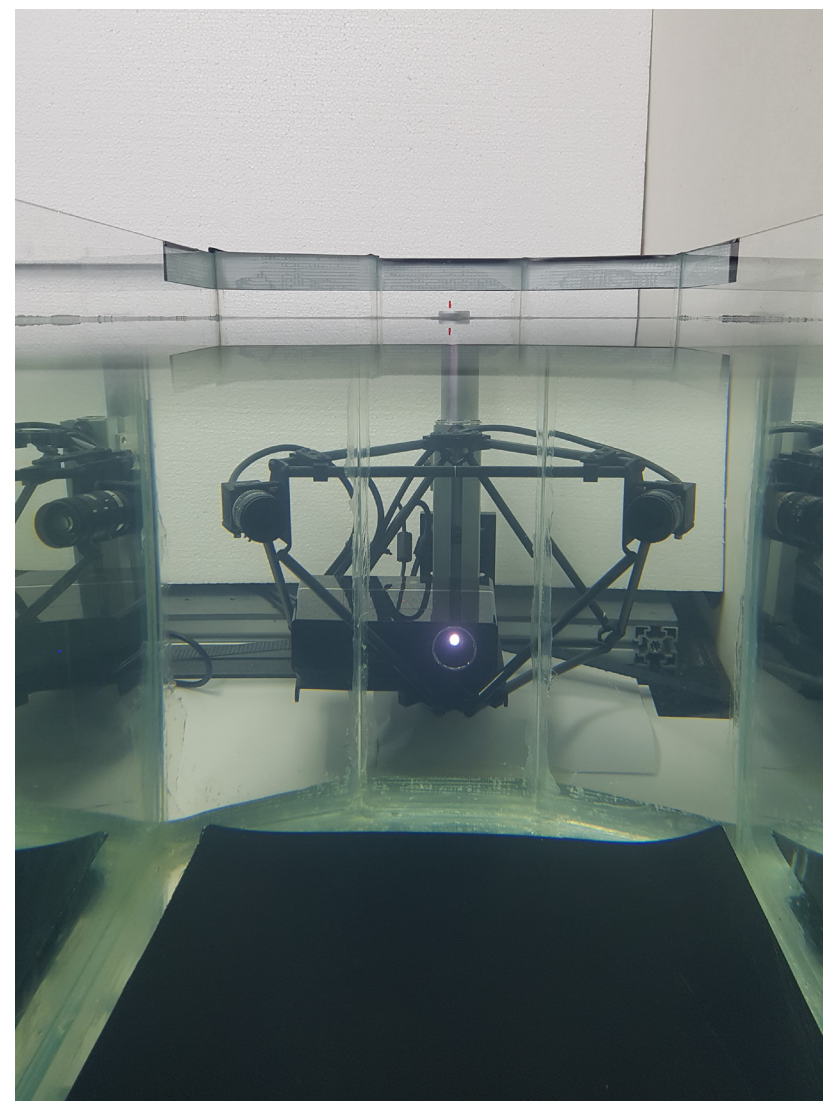
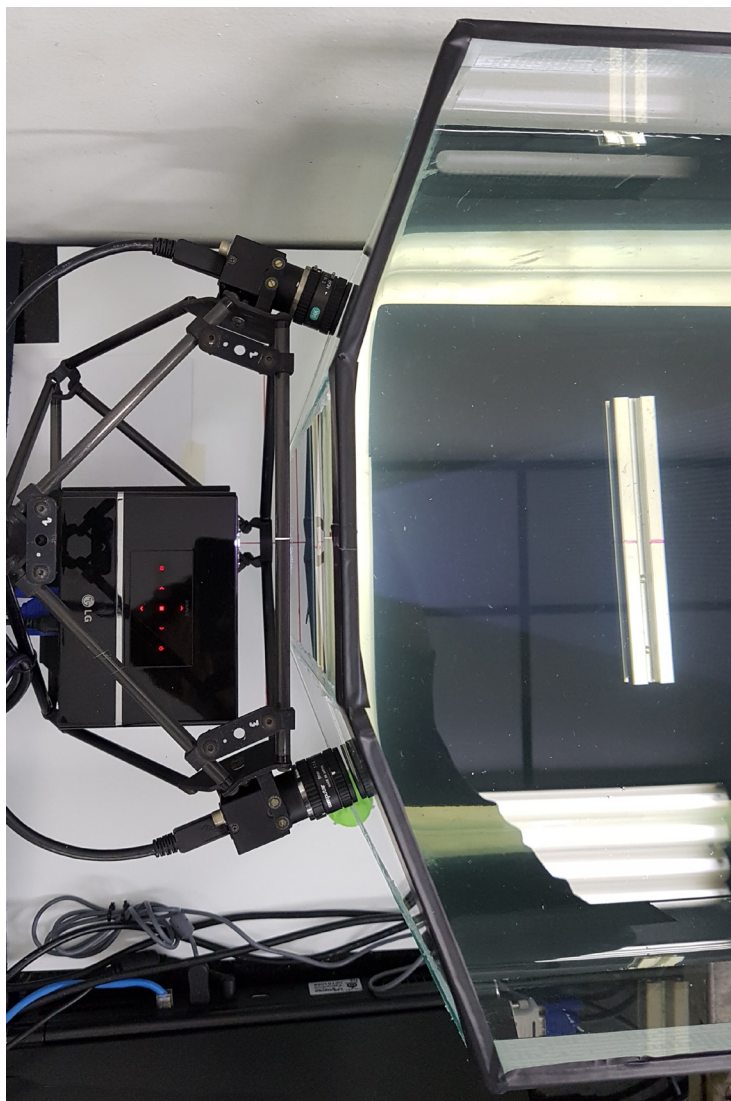
Montagem no laboratório para validação da teoria



Tanque de água com paredes inclinadas



Fotos da montagem para medição subaquática



Calibrações – Esclarecendo

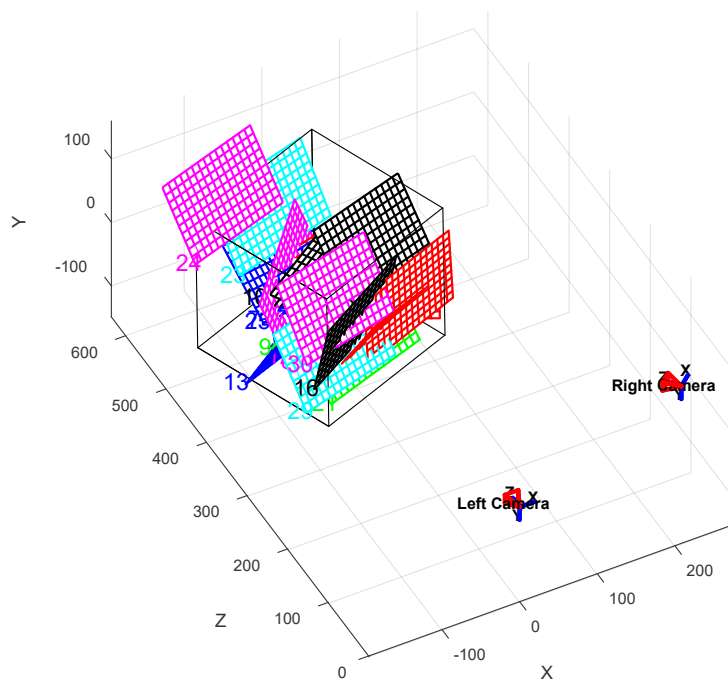
Técnicas utilizadas:

- **SVP**: *Pinhole* + distorção de lente
- **Refra**: Calibração SVP no ar + **modelagem da refração**

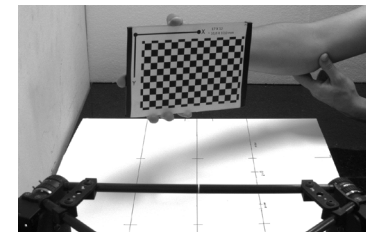
Caso	Calibração		Medição Meio	Restrições
	Meio	Tipo		
1	Ar	SVP	Ar	Nenhuma ✓
2			Água	Inviável ✗
3	Água	SVP	Água	Depende de... ex.: Ang vis. limitado
4		Refra		Nenhuma ✓

Calibração no ar

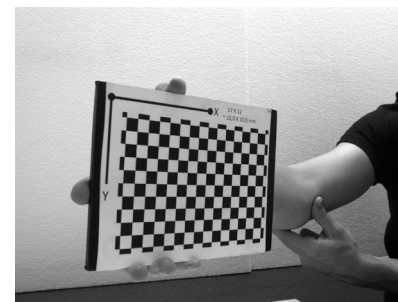
- Adquiridas 24 poses do padrão
- Obtenção:
 - Parâmetros Intrínsecos (K e coef. de distorção)
 - Extrínsecos (Rt)



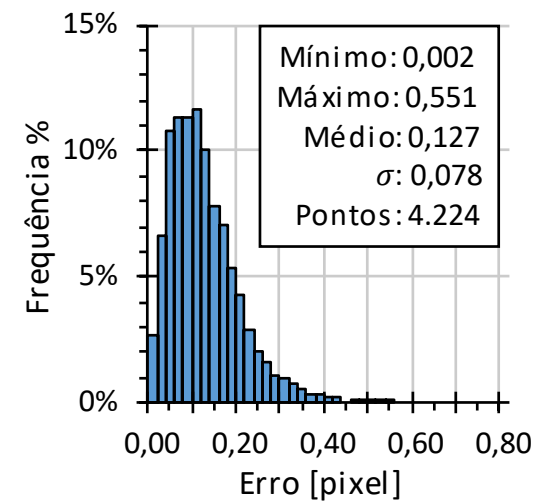
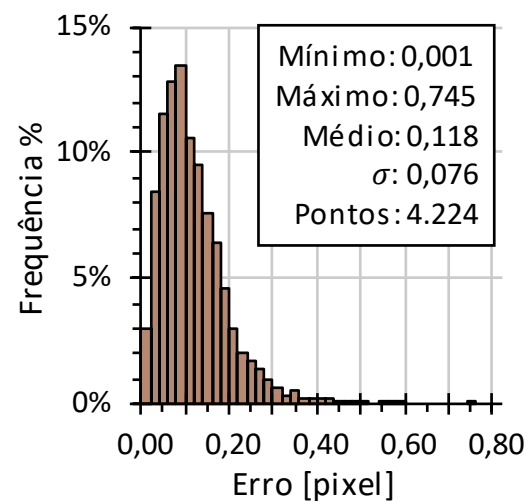
Câmera central



Câmera L



Câmera R

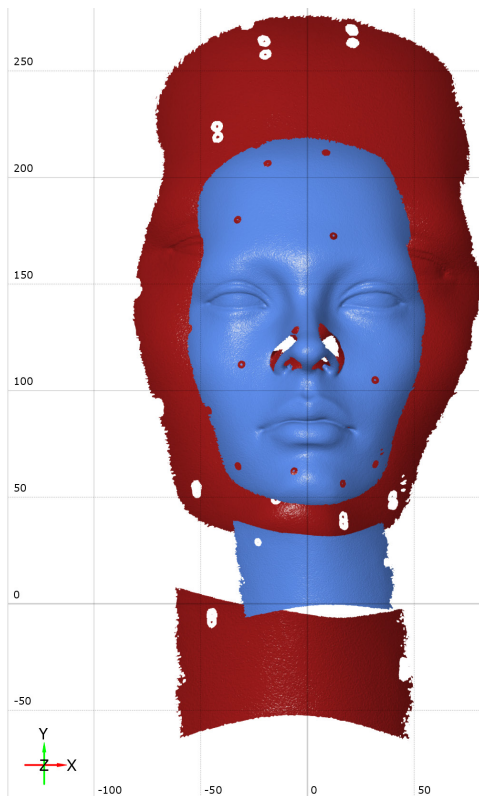


Medição na água – Calibração no Ar (SVP) *Vs* Calibração na água (Refra)

O que acontece se medir na água com a calibração no ar???

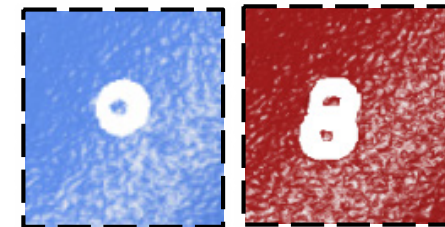
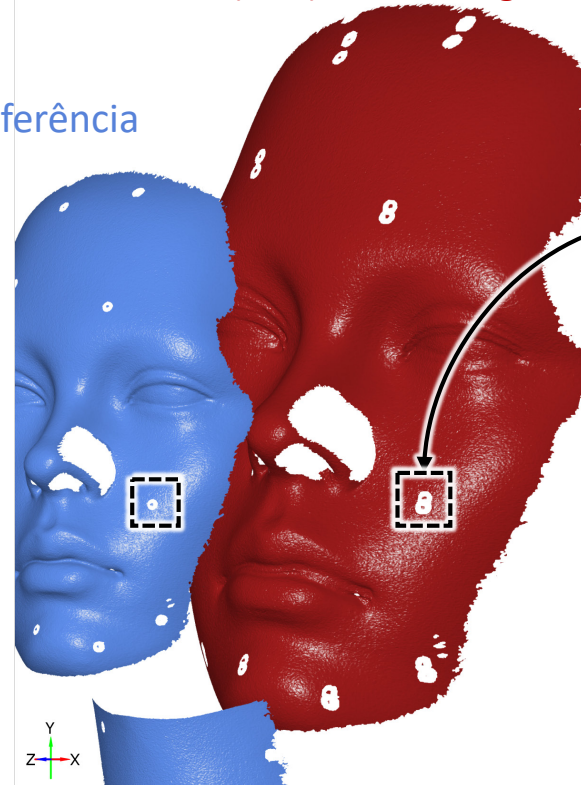
- Magnificação
- Deformação
- Posição incorreta

- Perda da geometria epipolar gera duplicações em Y



Calib. Ar (SVP) e Med. Água

Referência



Calibrações – Esclarecendo

Técnicas utilizadas:

- **SVP**: *Pinhole* + distorção de lente
- **Refra**: Calibração SVP no ar + **modelagem da refração**

Caso	Calibração		Meio da medição	Restrições
	Meio	Tipo		
1	Ar	SVP	Ar	Nenhuma ✓
2	Ar	SVP	Água	Inviável ✗
3	Água	SVP	Água	Depende de ex.: Ang vis. limitado
4	Água	Refra	Água	Nenhuma ✓

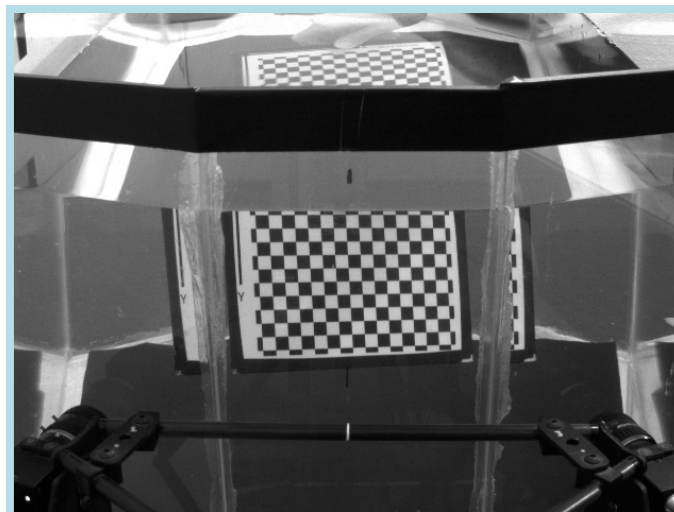
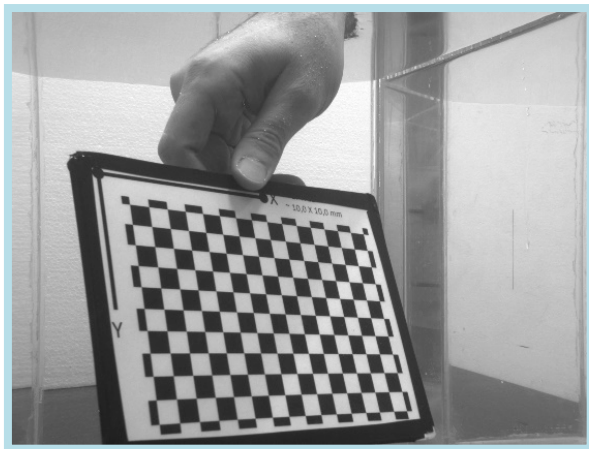
Ar (SVP)

Água (SVP)

Água (Refra)

Calibração na água (SVP)

Par de imagens em uma das poses adquiridas



Visão câmera central auxiliar

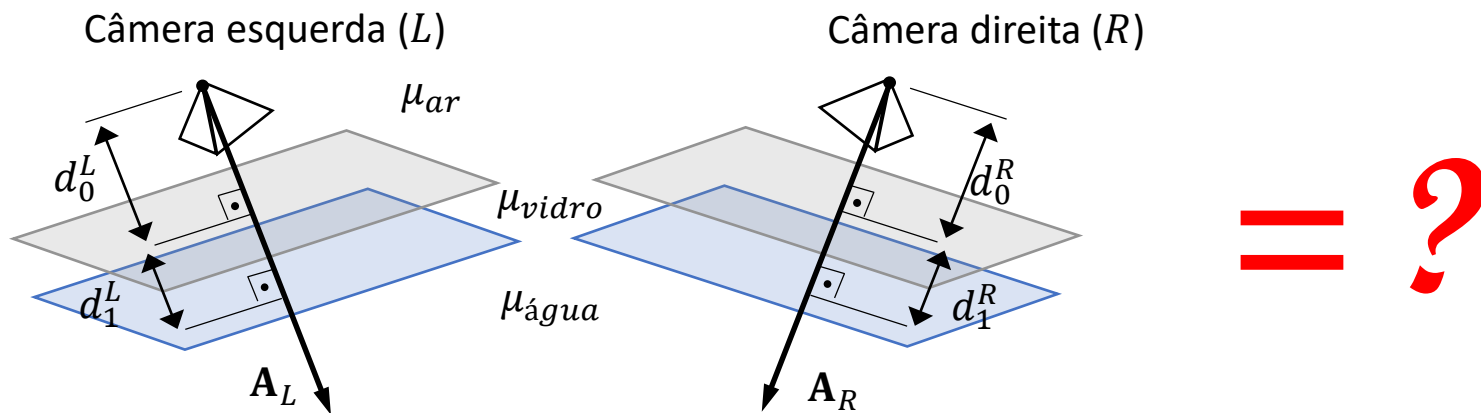
Calibração – Comparação: Ar (SVP) Vs Água (SVP)

Distância focal: $f_{Ar} \cong 8 \text{ mm}$ $f_{Água} \cong 11 \text{ mm}$

Relação: $\frac{f_{Água}}{f_{Ar}} \cong 1,33 \rightarrow \mu_{Água}$

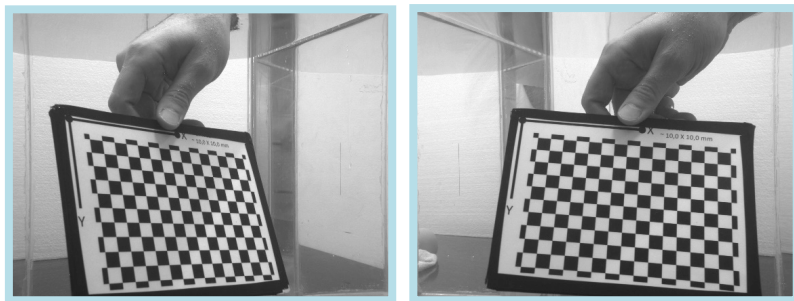
Correção de distorções da lente muito maior na calibração na água

Calibração dos parâmetros de refração (Refra)

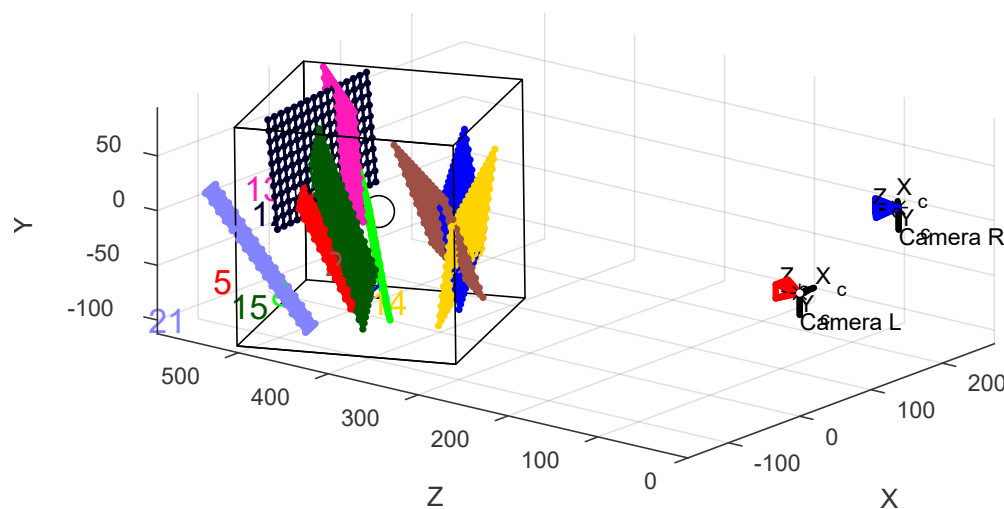


Calibração dos parâmetros de refração

- Utilizadas 9 imagens na **água**
- Minimização realizada com função de resolução de sistema não linear por mínimos quadrados "*lsqnonlin*" do MATLAB



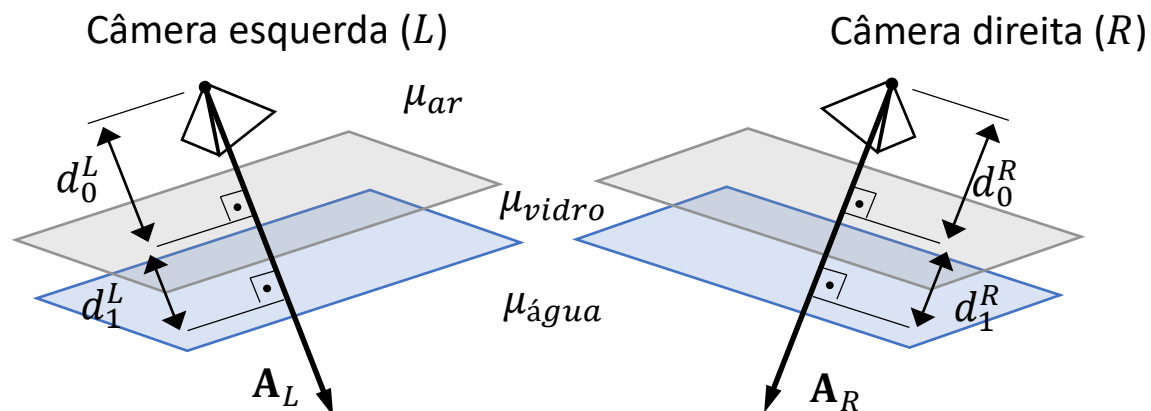
Par de imagens em uma das 9 poses adquiridas



Todas as poses (calculadas após calibração)

Calibração dos parâmetros de refração

Parâmetros de refração otimizados **destacados**

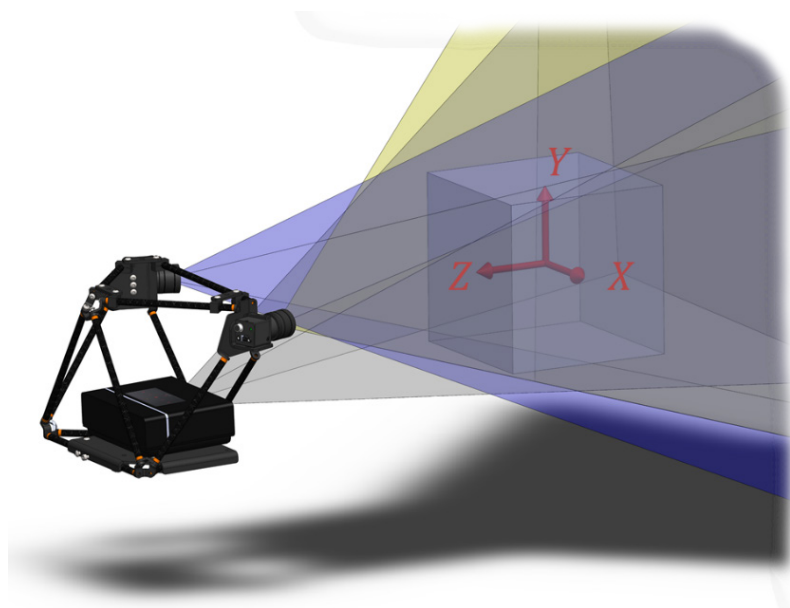


Parâmetro de Refração	Estimativa inicial e limites			Valor após minimização	
	Câmeras (L e R)	Limite inferior	Limite superior	Câmera L	Câmera R
$A_{\angle Z}$	0,00°	0,00°	10,00°	0,88°	0,60°
d_0	20,000	1,000	60,000	16,938	16,496
d_1	6,00 (nominal)	Constante		6,00	
μ_0 (ar)	1,0000	Constante		1,0000	
μ_1 (vidro)	1,5200	Constante		1,5200	
μ_2 (água)	1,3300	$\pm 0,0500$		1,3381	

Valores tabelados

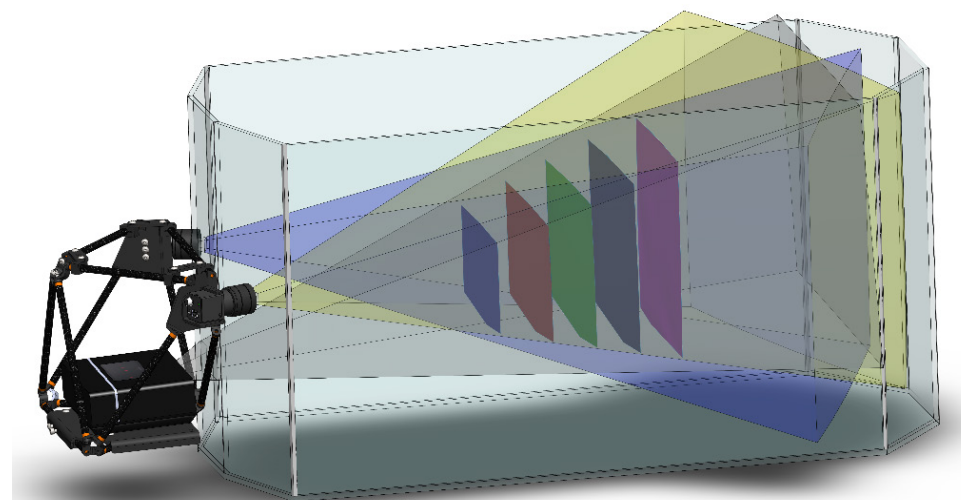
Avaliação do volume de medição

- Medição de um plano com $\sim 300 \times 400 \text{ mm}^2$ em cinco posições Z no ar e na água



Ar

$$\begin{aligned}
 & X \times Y \times Z \\
 & 200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3 \\
 & 8.000.000 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$



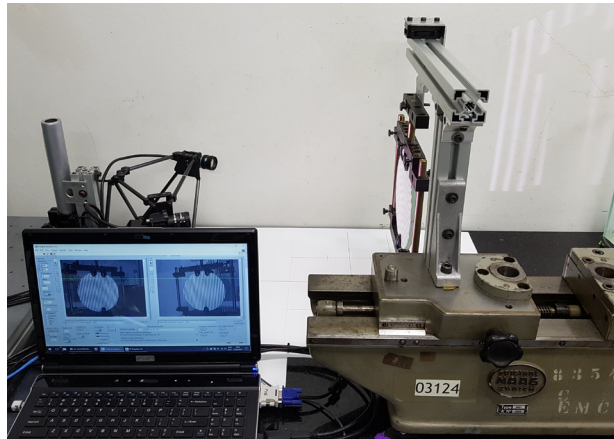
Cubo com face frontal a 30 mm do SCO

Água

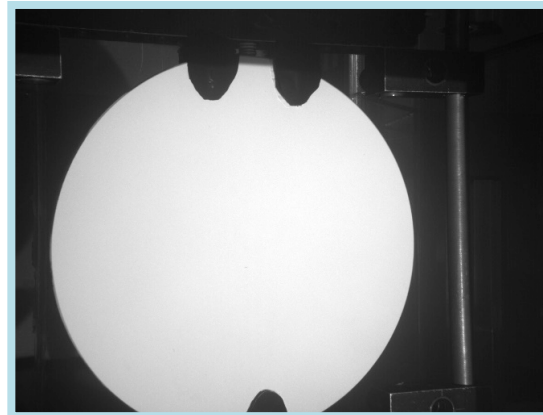
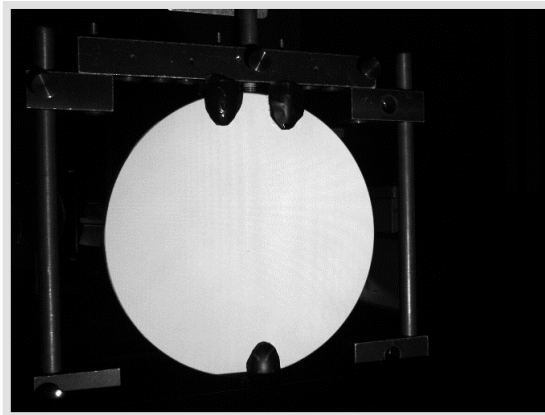
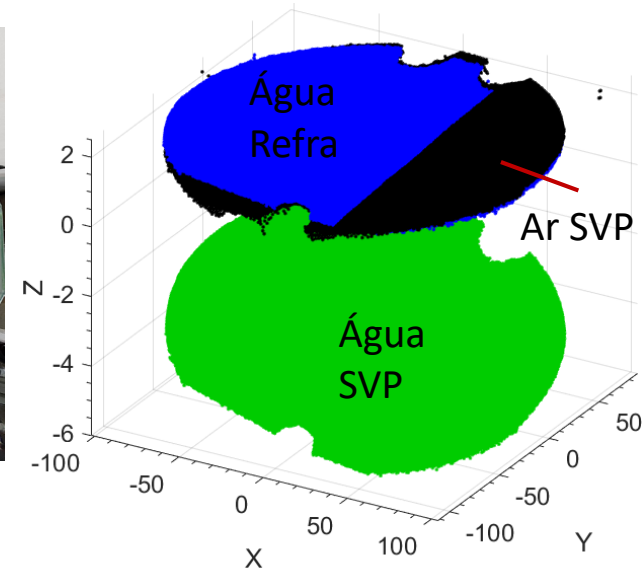
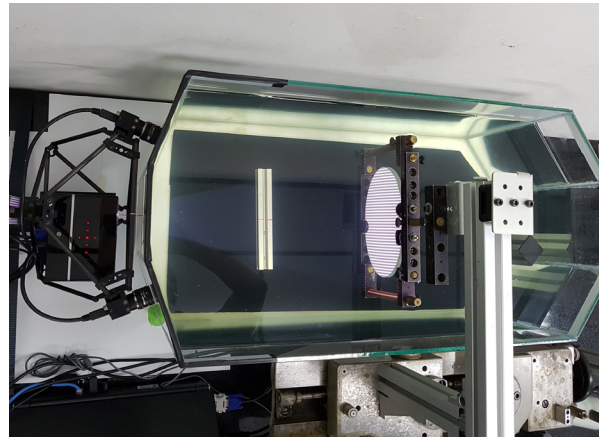
$$\begin{aligned}
 & X \times Y \times Z \\
 & 160 \times 200 \times 250 \text{ mm}^3 \\
 & 8.000.000 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Medição – Plano numa mesma posição no ar e na água

Ar



Água



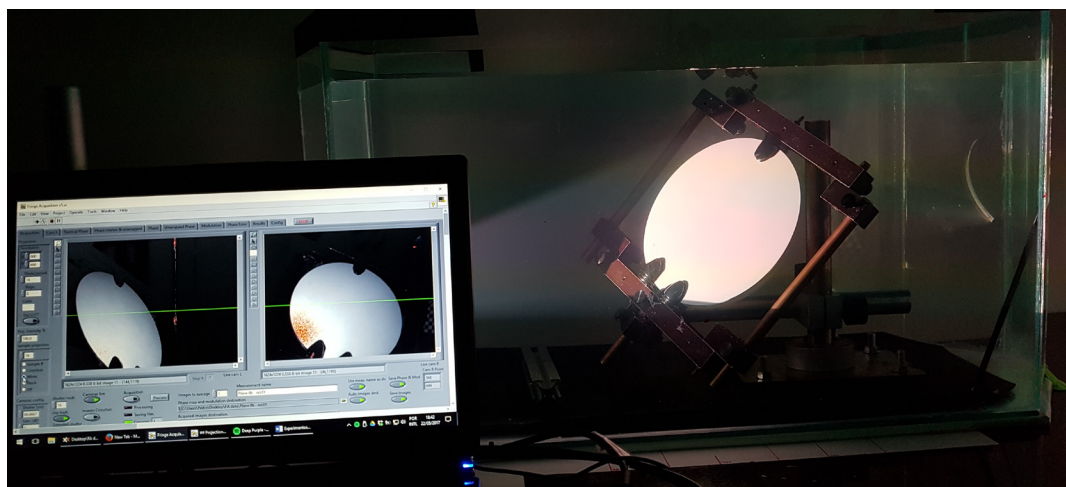
Câmera esquerda (L)

→ Medição com calibração
SVP resulta em posição
incorreta do objeto

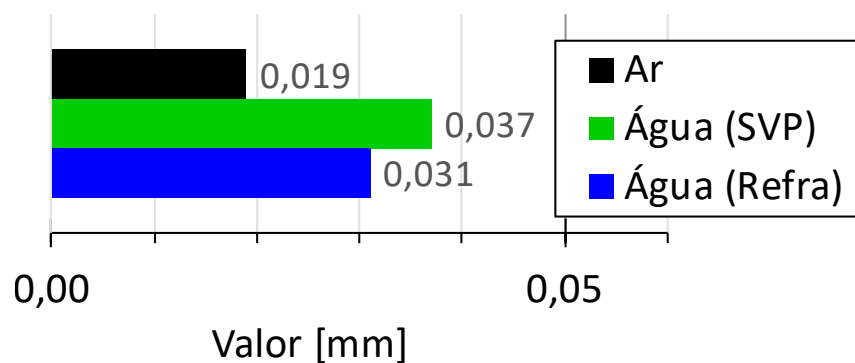
Plano em diferentes posições rotacionadas em XY

- Medição do plano em 6 poses diferentes no ar e 18 na **água**

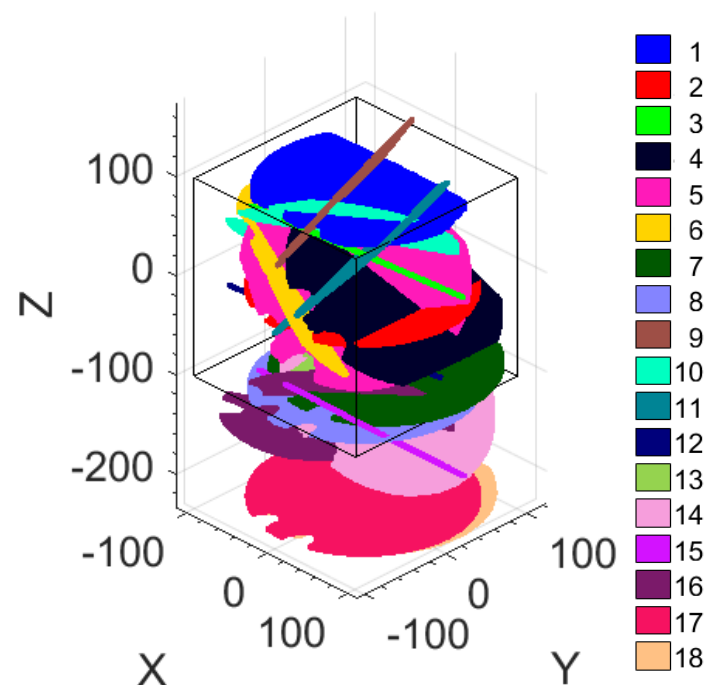
Aquisição na água



Plano diferentes posições (σ)

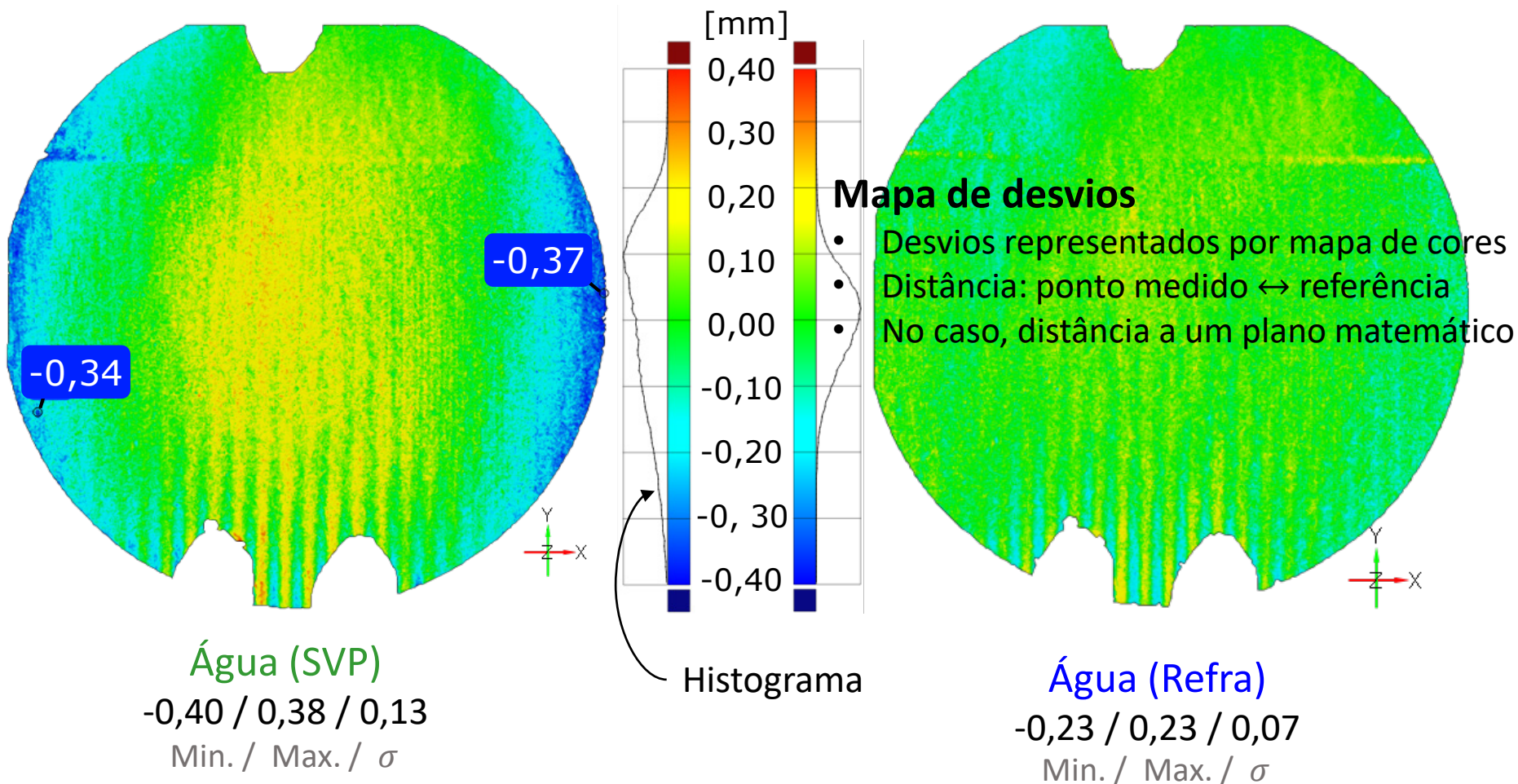


Resultados obtidos na água

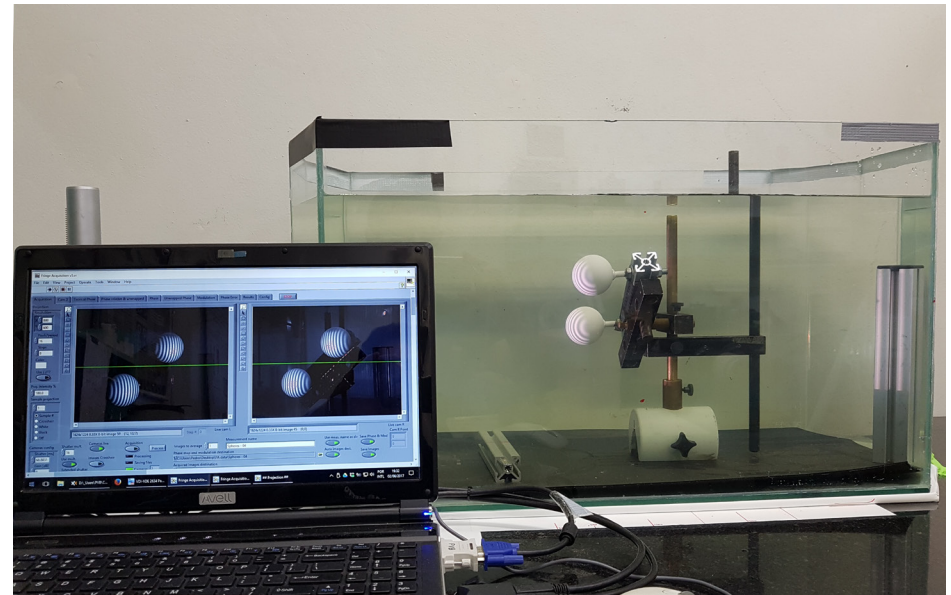


Plano em poses rotacionadas em XY

- Maior diferença **SVP** Vs **Refra** para poses rotacionadas
- Posição 18 ($Z \cong 230$ mm)



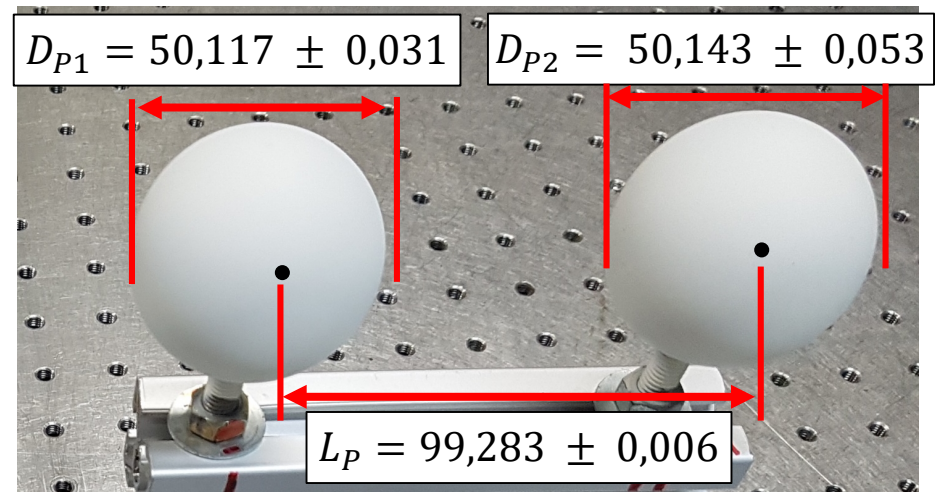
Avaliação com par de esferas



Avaliação com par de esferas (VDI/VDE)

Cotas calibradas em MMC:

- Diâmetros (D_{P1} e D_{P2})
- Distância entre centros (L_P)



Valores em mm

Parâmetros avaliados com o sistema:

SSE : Erro de espaçamento entre esferas ou *sphere-spacing error*

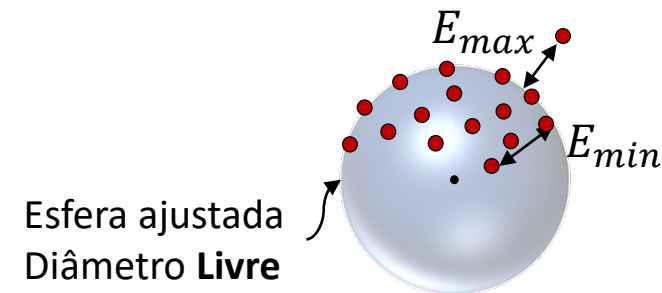
Boa estimativa do **erro sistemático**

PE : Erro de apalpação ou *probing error*

Estimativa **conservadora** do **erro aleatório**

σ : Desvio padrão e histogramas normalizados do erro

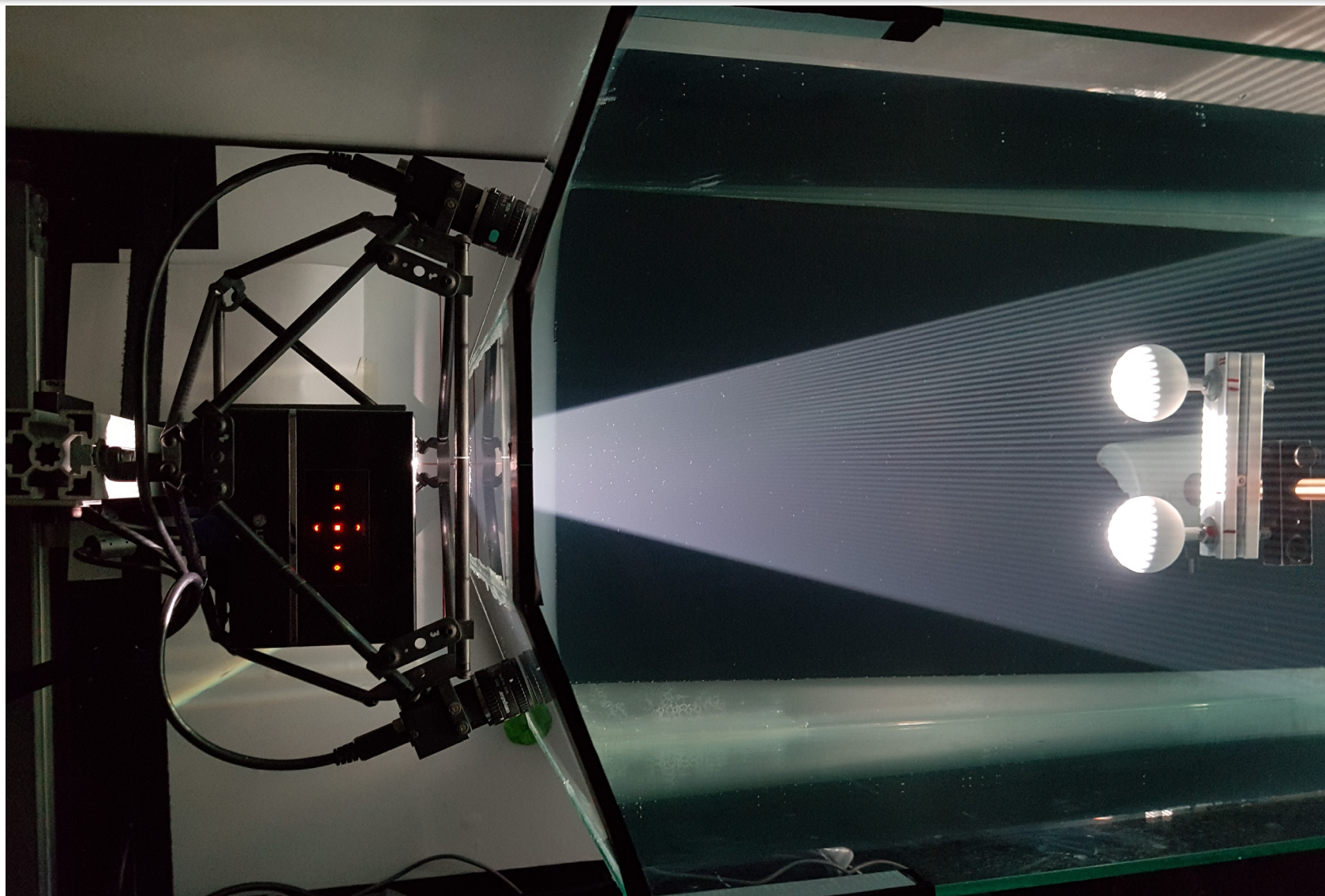
Boa estimativa do **erro aleatório**



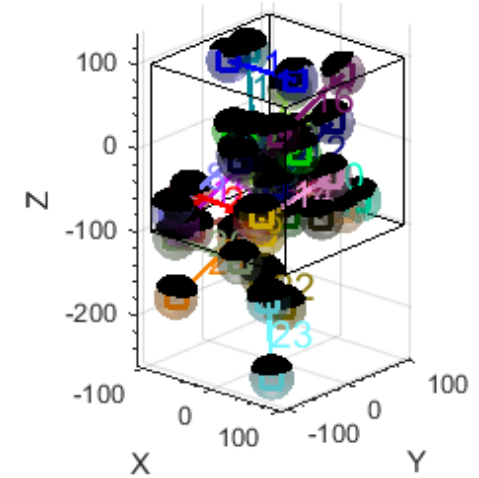
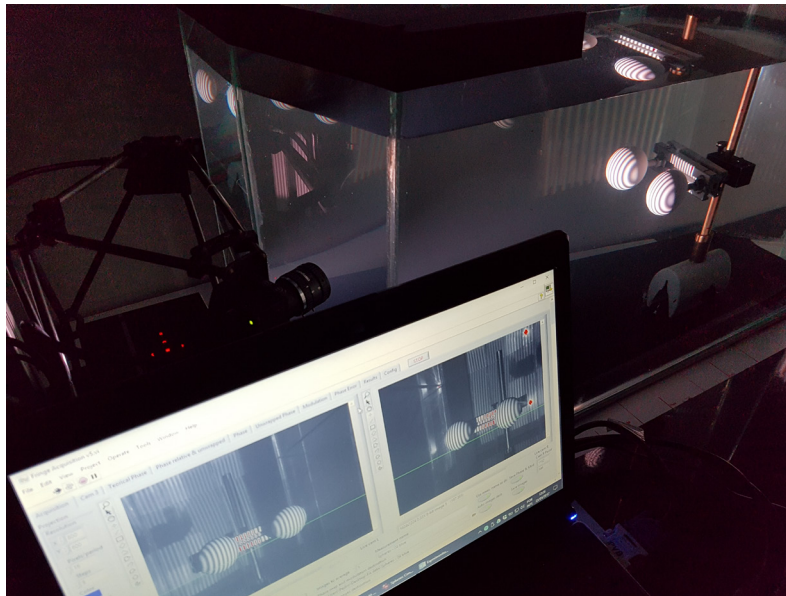
$$PE = |E_{max} - E_{min}|$$

(pico-vale)

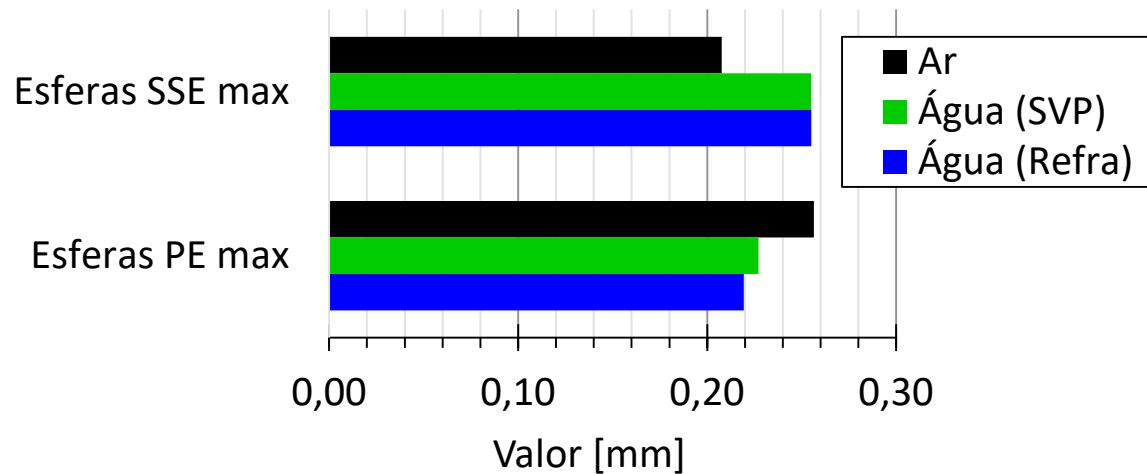
Avaliação com par de esferas – Água



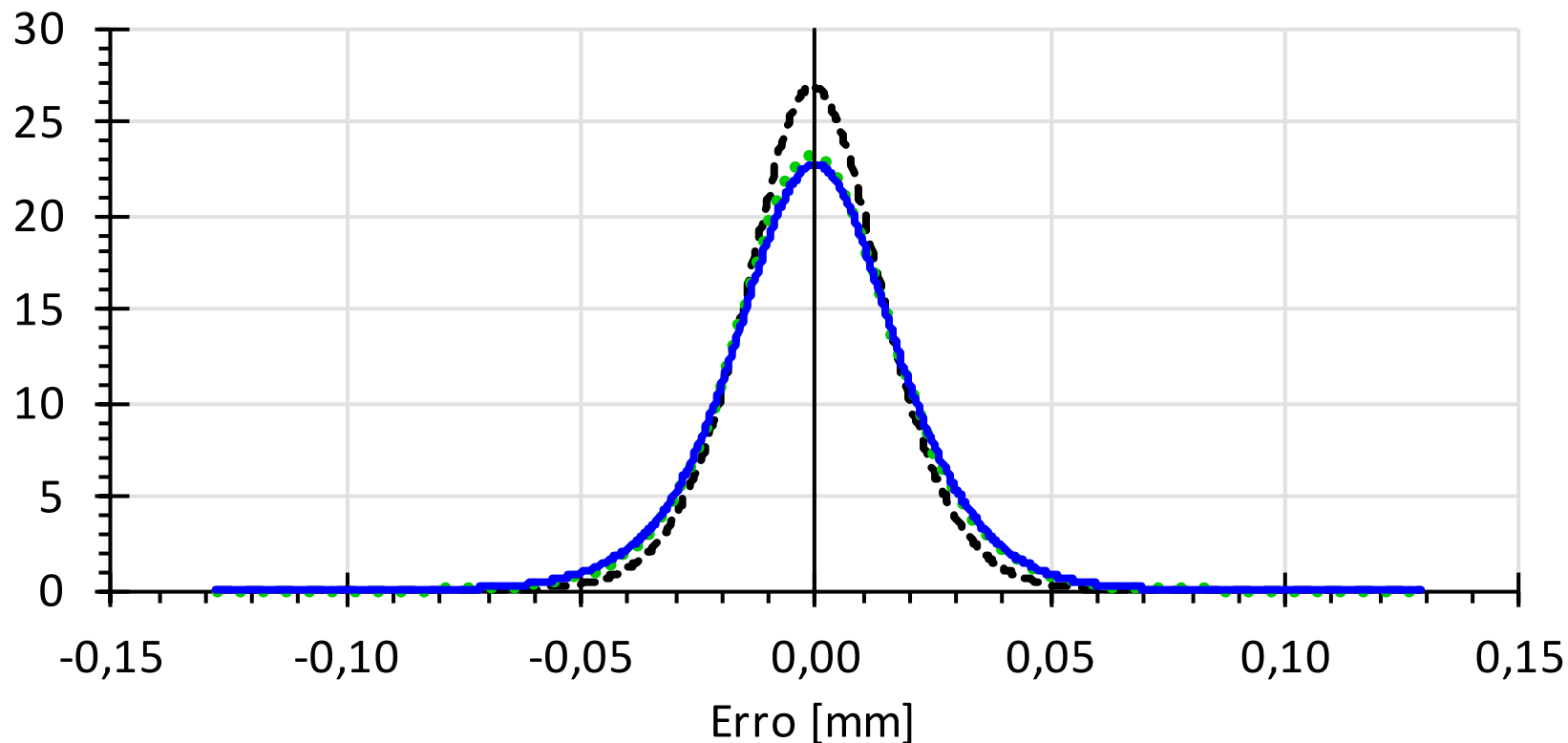
Avaliação com par de esferas



Posições adquiridas na água

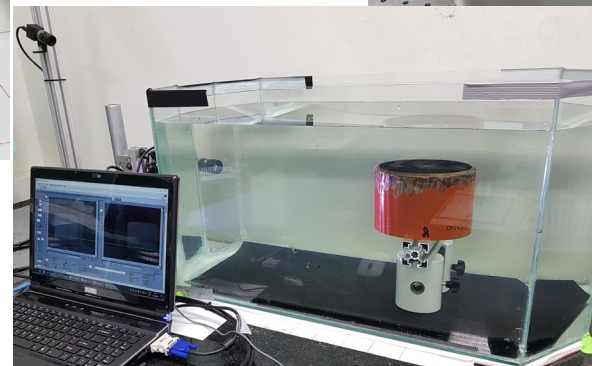
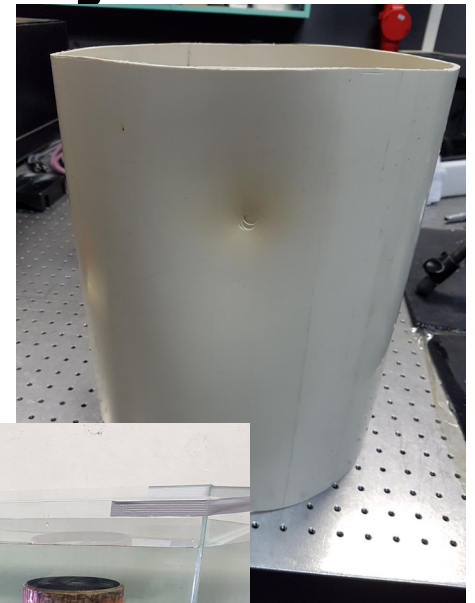
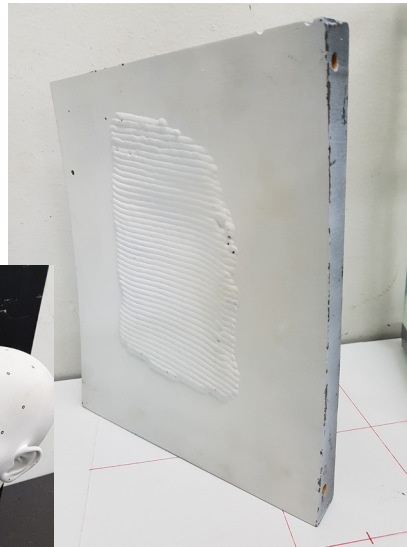


Avaliação com par de esferas

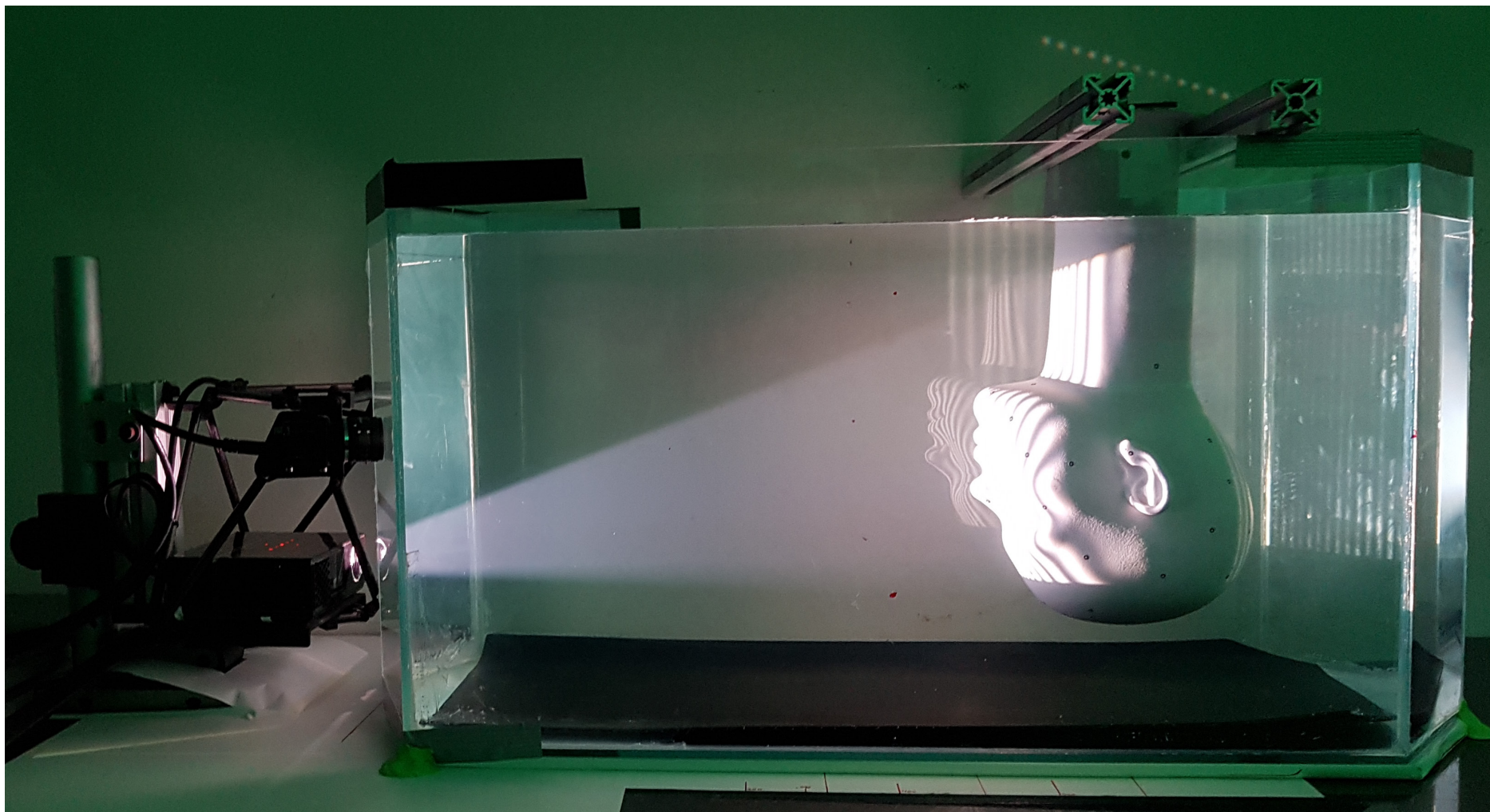


	Min	Max	σ	Pontos
----- Ar	-0,13	0,13	0,016	4.953.336
..... Água (SVP)	-0,11	0,11	0,019	6.809.946
————— Água (Refra)	-0,11	0,11	0,020	6.903.744

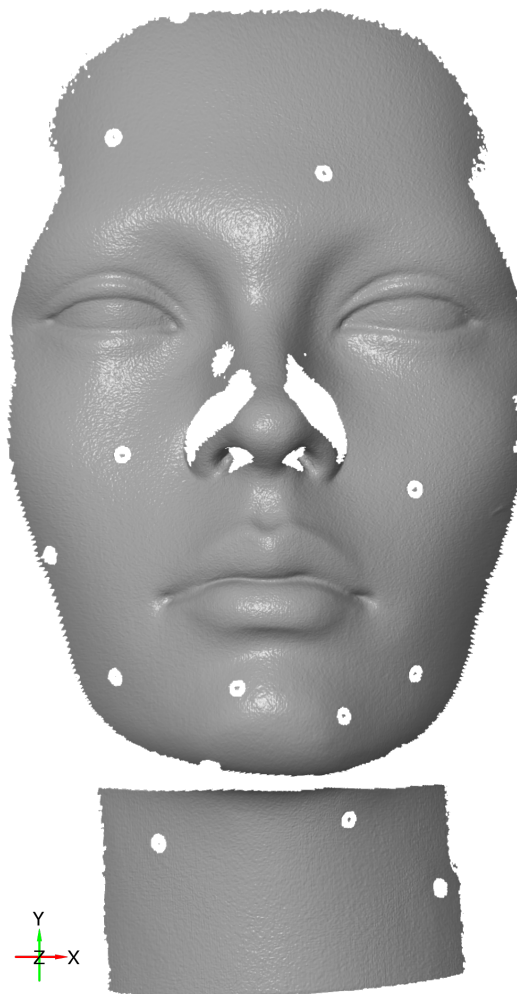
Avaliação com objetos de referência e exemplos de medição



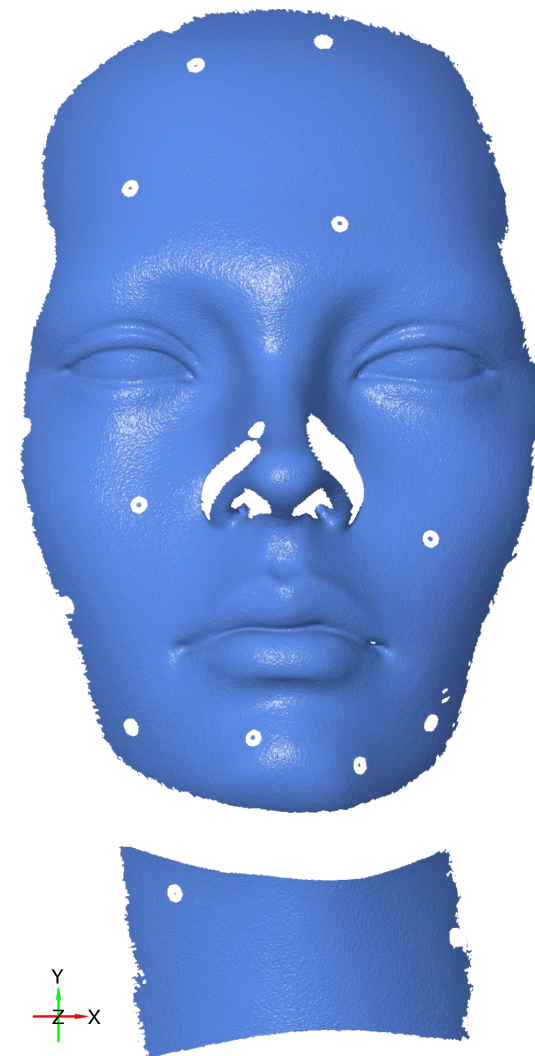
Cabeça de manequim – Face



Avaliação com peças calibradas – Malha



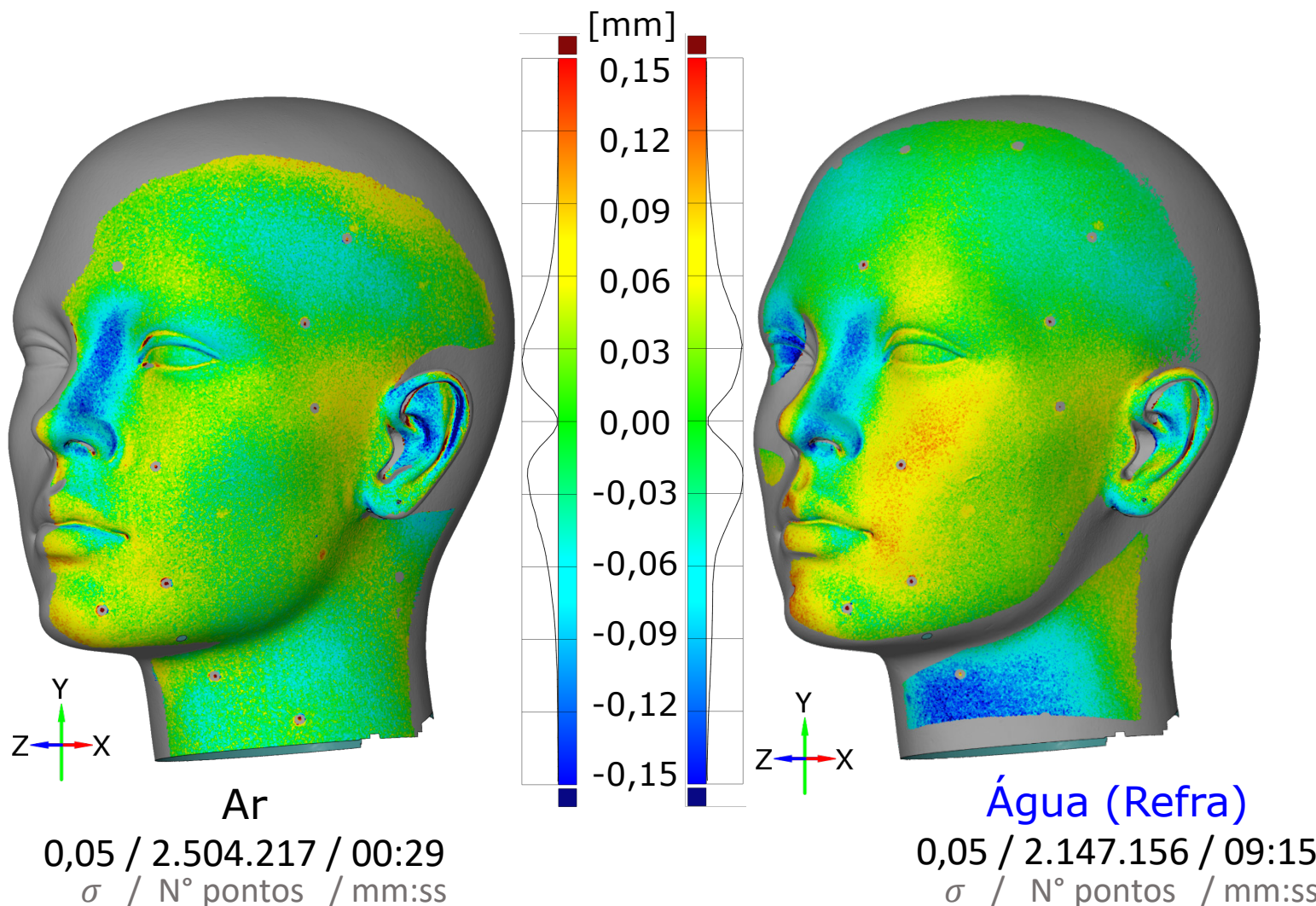
Ar



Água (Refra)

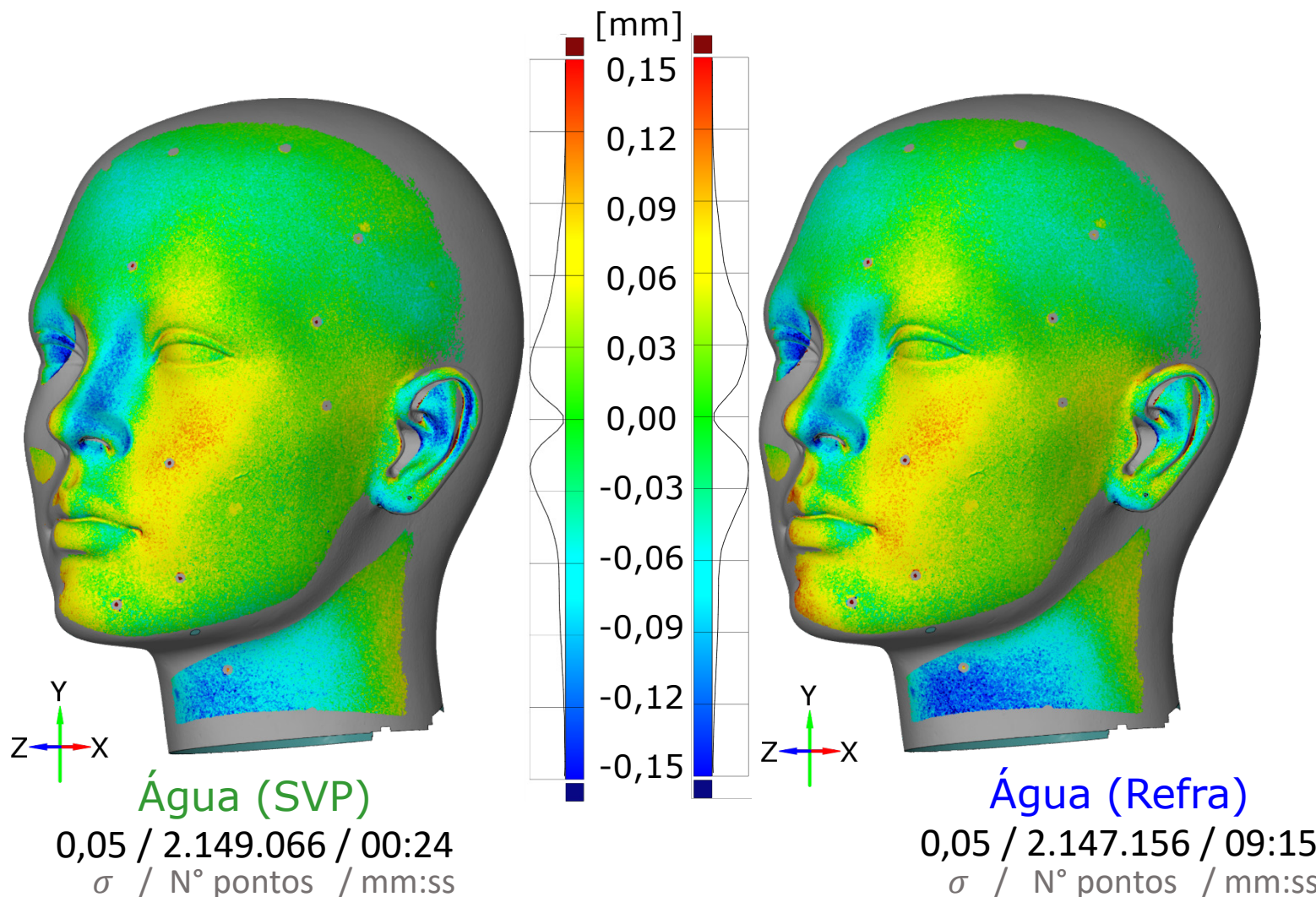
Avaliação com peças calibradas – Mapa de desvios

- Cabeça de manequim Face/Lateral



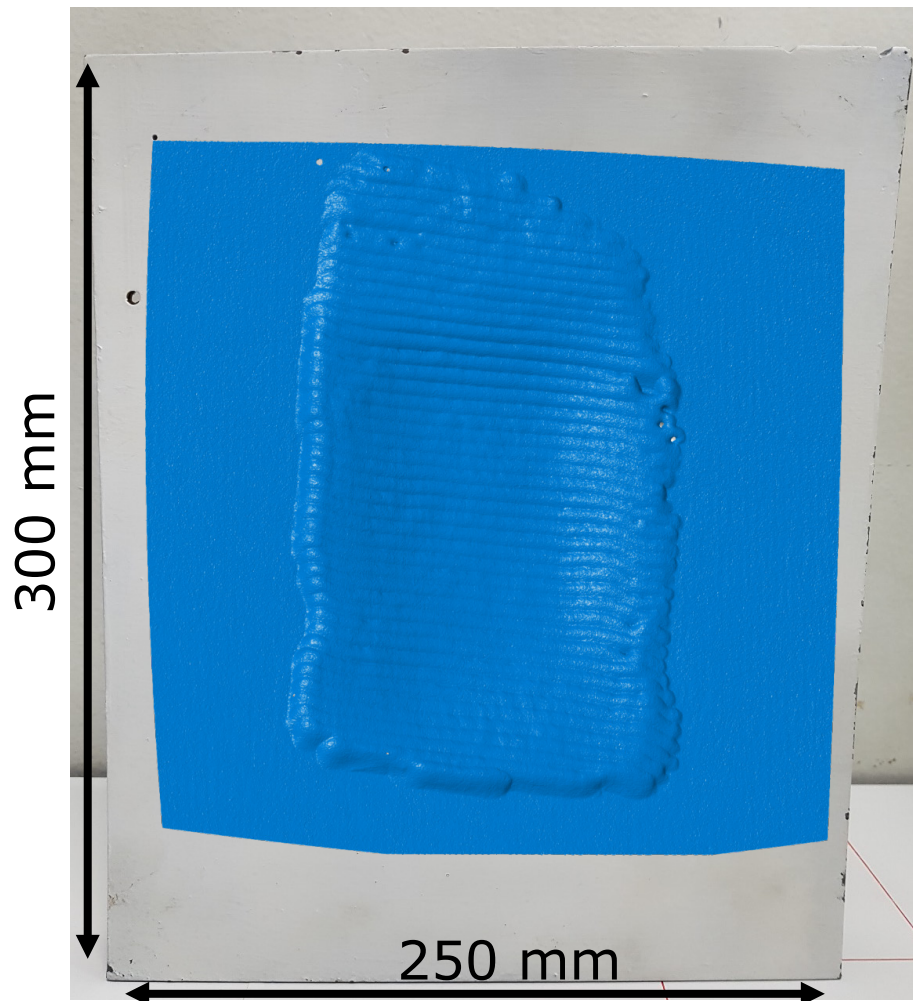
Avaliação com peças calibradas – Mapa de desvios

- Cabeça de manequim Face/Lateral



Avaliação com peças calibradas

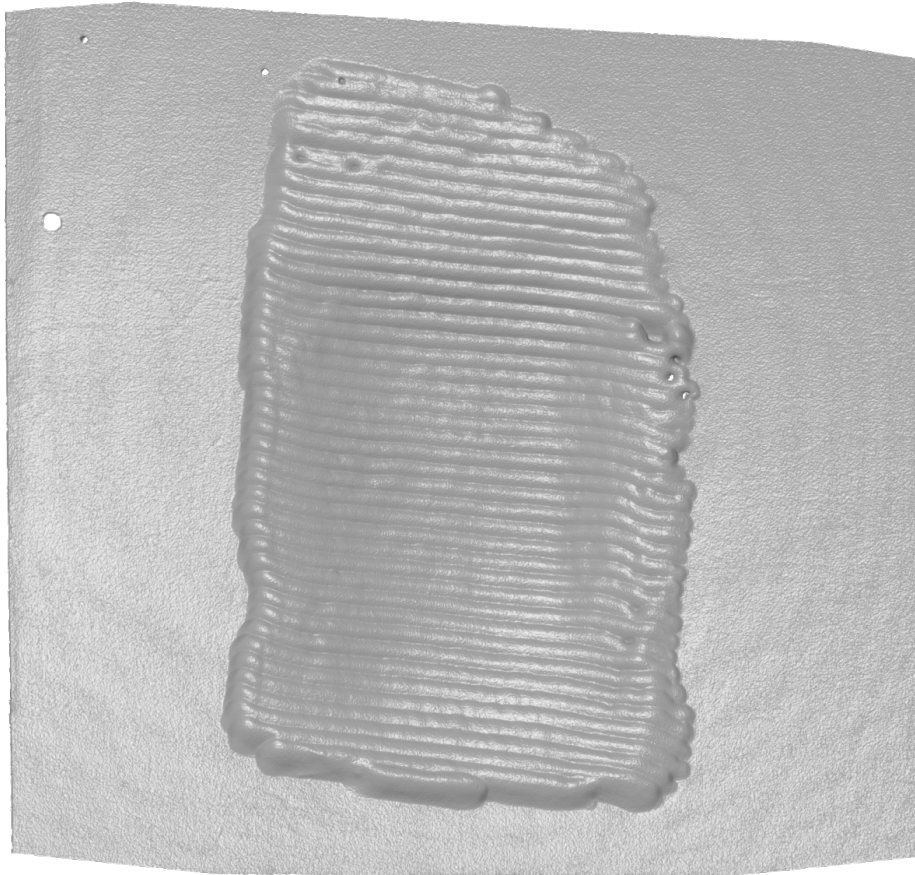
- Réplica de defeito por cavitação preenchida com cordões de solda



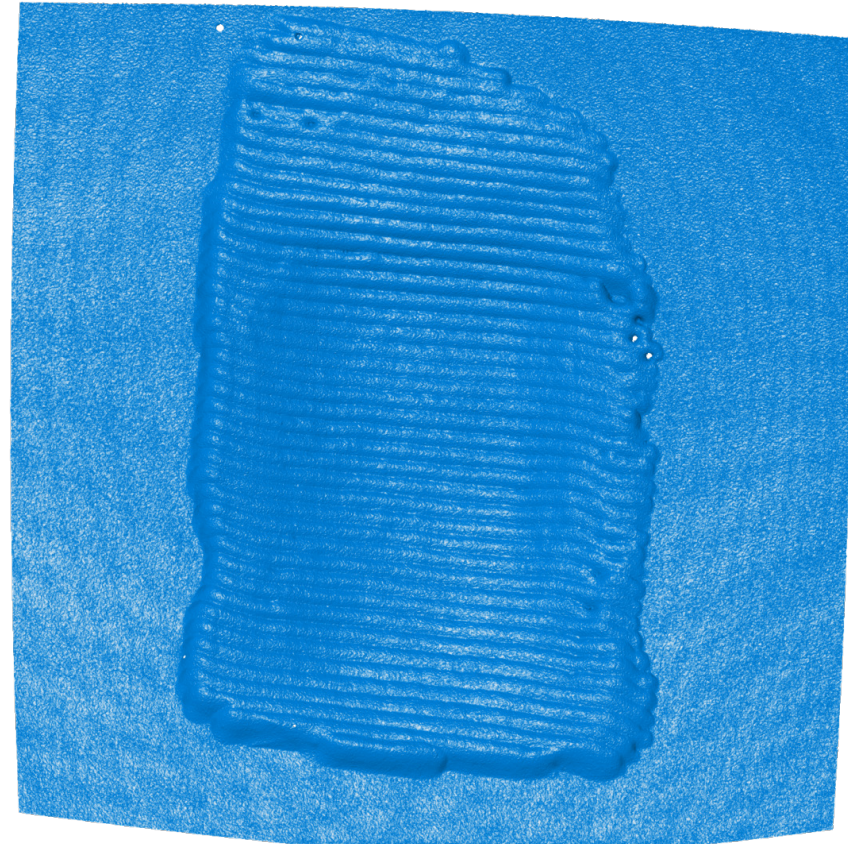
Resultado de medição na
água (Refra)

Avaliação com peças calibradas

- Réplica de defeito por cavitação preenchida com cordões de solda



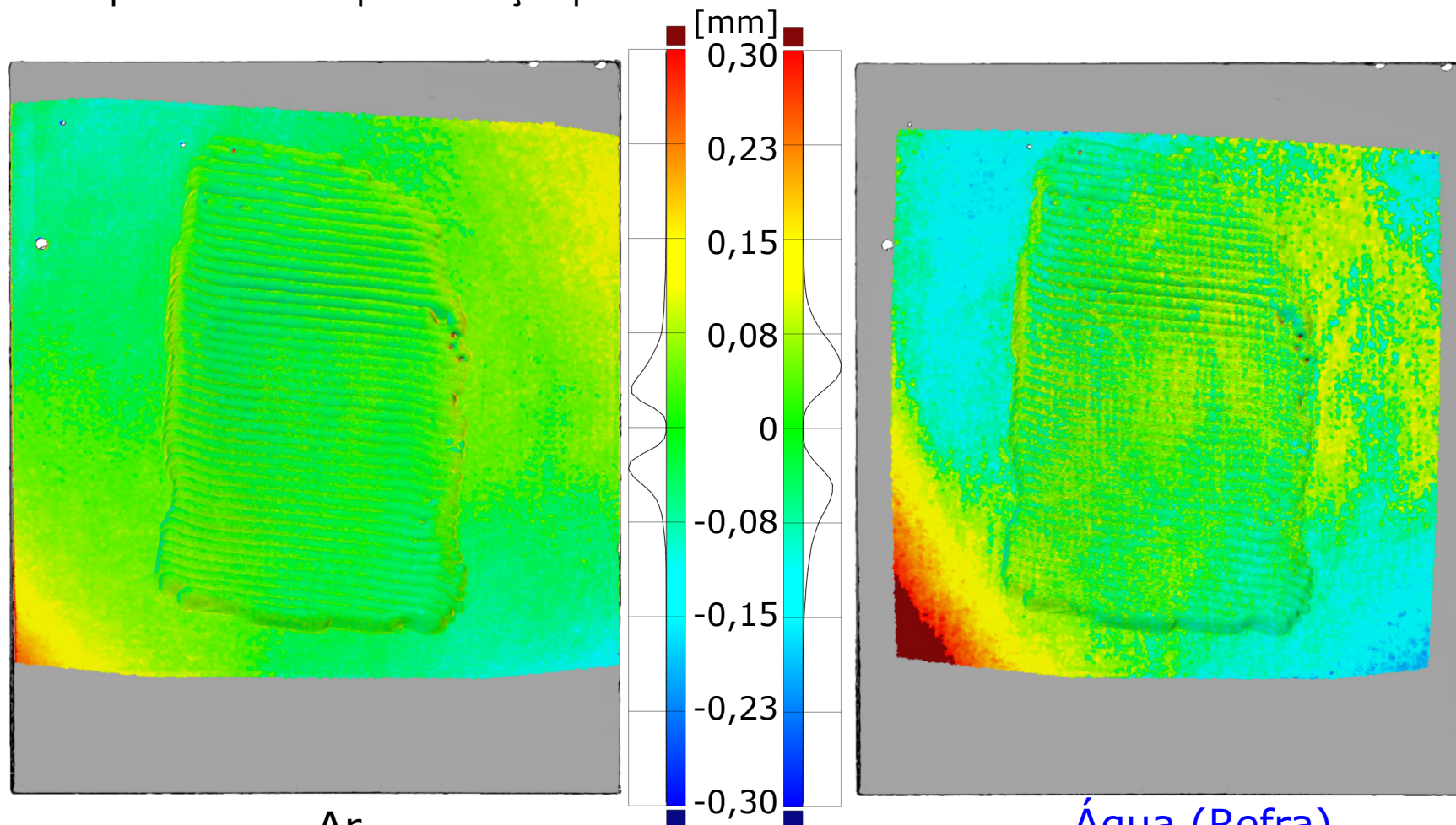
Ar



Água (Refra)

Avaliação com peças calibradas

- Réplica de defeito por cavitação preenchida com cordões de solda



Ar

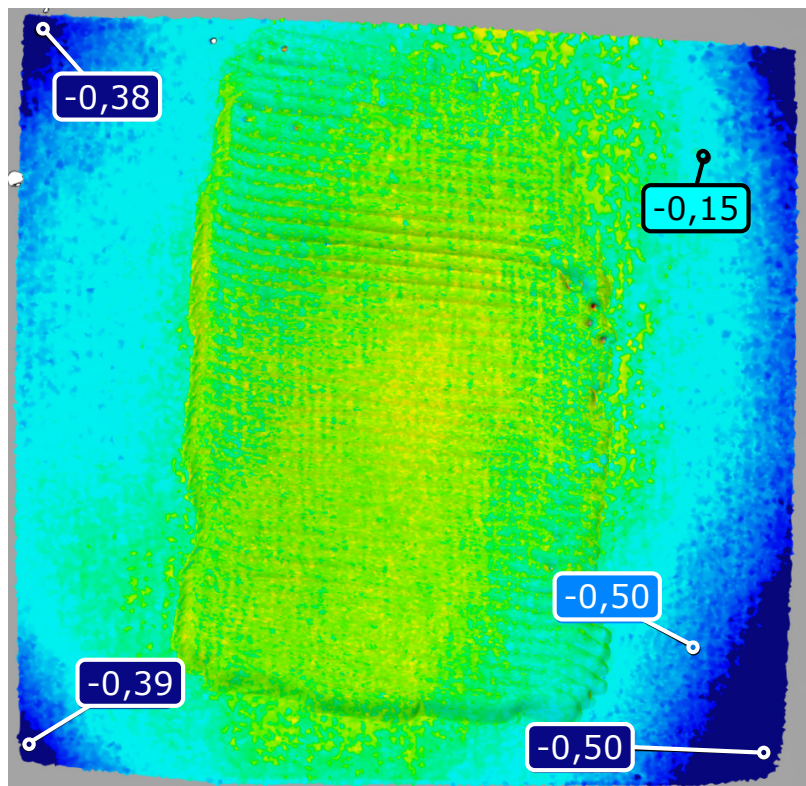
0,05 / 5.654.072 / 00:22
 σ / N° pontos / mm:ss

Água (Refra)

0,07 / 4.808.409 / 11:11
 σ / N° pontos / mm:ss

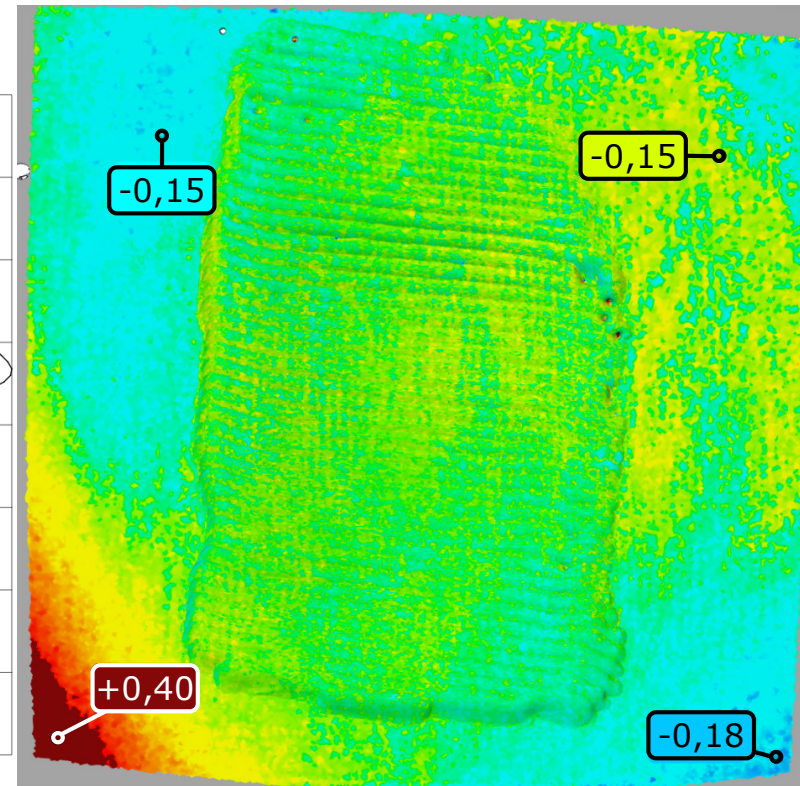
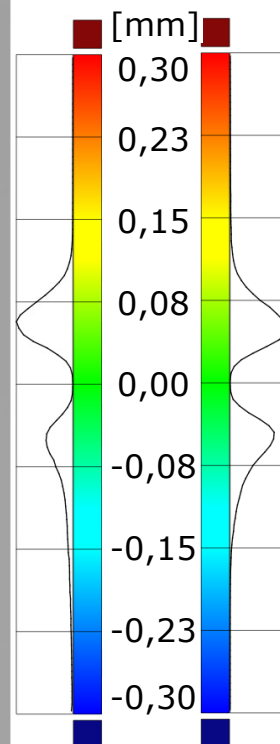
Avaliação com peças calibradas

- Erro com modelo SVP aumenta nas bordas !!!
- Corrobora com o fato de que o erro SVP (água) aumenta com o ângulo de visão



Água (SVP)

0,09 / 4.913.091 / 00:22
 σ / N° pontos / mm:ss

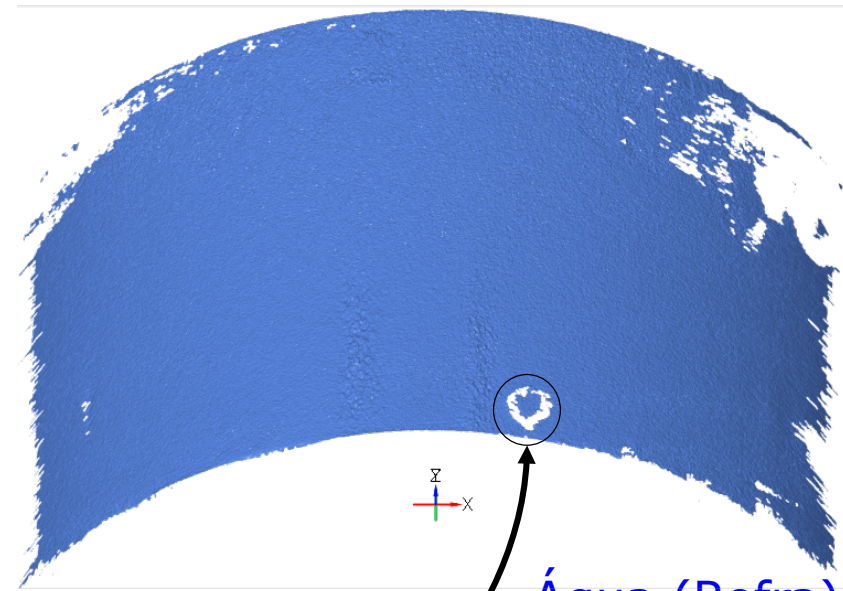
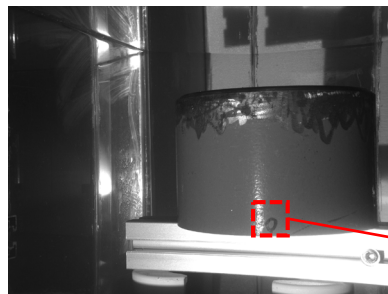
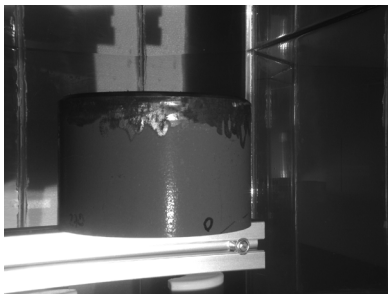
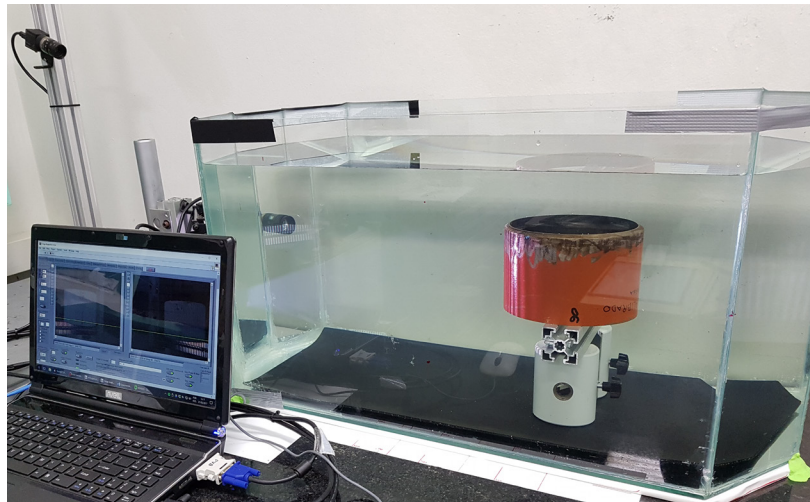


Água (Refra)

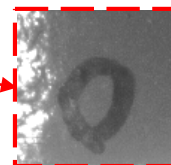
0,07 / 4.808.409 / 11:11
 σ / N° pontos / mm:ss

Exemplos de medição subaquática

- Trecho de riser de ϕ 154 mm (6")

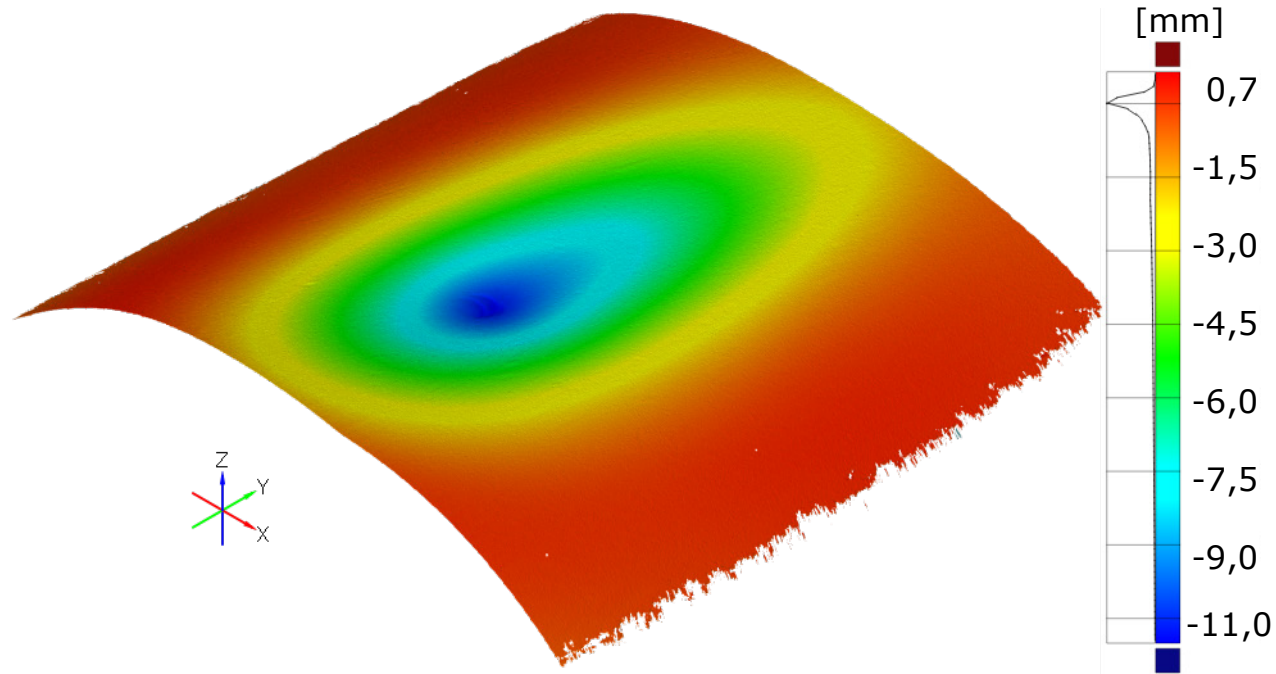
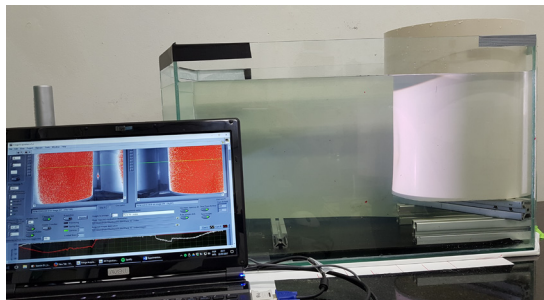


Água (Refra)



Exemplos de medição subaquática

- Tubo de PVC amassado – ϕ 305 mm (12")



Água (Refra)

Tópicos

1. Introdução
2. Medição Óptica de Formas 3D
3. Medição Óptica de Formas 3D em Meio Subaquático
4. Triangulação Inversa em Meio Subaquático
 - Modelagem dos parâmetros de refração (PR)
 - Projeção inversa
 - Calibração dos PR
 - Medição com triangulação inversa / Projeção direta

5. Resultados experimentais

6. Conclusões

Geral

- **Medição de formas 3D** com alta densidade de pontos com sistema estéreo óptico ativo em meio **subaquático** utilizando a **triangulação inversa**
- **Incerteza estimada:** Ar: $\pm (0,21\% + 0,016)$ mm. **Água (Refra):** $\pm (0,26\% + 0,020)$ mm
- **Água** \rightarrow **SVP** Vs **Refra:**
 - Resultados próximos (devido ao ângulo de visão e bom alinhamento câmeras/tanque)
 - Placa com solda \rightarrow erros nas bordas com modelo SVP maiores do que os com modelo Refra
 - Maiores diferenças devem ocorrer \rightarrow maiores ângulos de visão e/ou inclinação em relação à interface de refração
 - **Refra** pode ser utilizado para **qualquer** caso!
- Artigo apresentado em congresso internacional IEEE Oceans 2016 – Monterrey EUA
- Artigo submetido em revista internacional (A2) – IEEE Journal of Oceanic Engineering

Principais contribuições inovadoras

- Desenvolvimento de técnicas e algoritmos inéditos que possibilitam a realização da triangulação inversa através de interfaces planas de refração:
 - ***InvProjRefra***: Projeção Inversa Através de Interfaces Planas de Refração. Pode ser utilizado para n interfaces.
 - ***IteraProjRefra***: Cálculo da projeção direta de forma iterativa a partir da minimização do erro da projeção inversa (realiza com o método *InvProjRefra*). Mais rápido que solução analítica. Converge rapidamente.
 - ***ZScan2***: Varredura em Z com maior tolerância a descontinuidades no mapa de fase

- Calibração de parâmetros de refração por correspondência estéreo 2D-3D

Outras contribuições

- Biblioteca (.dll) em C++ e *scripts* em MATLAB (InvT, refração, projeção)
- Bancada de ensaio (tanque de água com janelas inclinadas e de padrões calibrados)
- Influência da alteração de parâmetros de refração nas incertezas de medição
- Avaliação do desempenho dos algoritmos desenvolvidos com objetos de geometria conhecida e medições no ar

Sugestões para trabalhos futuros

- Processamento paralelo em placa de vídeo (GPU) para redução do tempo de medição → Solucionar a principal limitação (tempo de processamento)
- Comparação entre SVP e modelo de refração com lentes de menor comprimento focal e com as janelas em diferentes distâncias e inclinações
- Adição de filtros passa-banda nas câmeras e projetor monocromático, diminuindo a influência de iluminação externa e aberrações cromáticas devido à refração
- Desenvolvimento de protótipo portátil possibilitando medições em campo
- Avaliação do sistema com diferentes níveis de turbidez, simulando medições em campo

Obrigado !

pvb@labmetro.ufsc.br

