

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE *AS-BUILT* DE CASCOS DE  
EMBARCAÇÕES USANDO IMAGEM FOTOGRAMÉTRICA DE CÂMERA DIGITAL

**ARTHUR NASCIMENTO DE LIMA**

PROFESSOR ORIENTADOR: JOSE CLAUDINO DE LIRA JUNIOR

**RECIFE**

**2018**

ARTHUR NASCIMENTO DE LIMA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE *AS-BUILT* DE CASCOS DE  
EMBARCAÇÕES USANDO IMAGEM FOTOGRAMÉTRICA DE CÂMERA DIGITAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Naval.

**RECIFE**

**2018**

## RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso visa validar, do ponto de vista de precisão métrica e eficiência procedimental, uma metodologia para elaboração de *as-built* de cascos de embarcações usando imagem fotogramétrica de câmera digital, com alta praticidade e baixo custo agregado. A verificação da factibilidade do método foi feita tendo como alicerce comparativo uma modelagem computacional realizada a partir de uma abordagem tradicional com processos predominantemente manuais. No estudo dos procedimentos, foram comparadas questões que envolvem recursos e tempos dos processos que compõem a metodologia proposta e a tradicional. No que se refere a análise de acurácia da metodologia proposta, foram gerados os planos de linhas para ambas as modelagens com posteriores manipulações de variáveis das tabelas de cotas e curvas de área seccional para fins comparativos.

**Palavras-chave:** *as-built*, fotogrametria, *image-based modeling*, modelagem computacional.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ferramentas, processos e aplicações da modelagem da informação .....	12
Figura 2 - Modelo básico para o processamento de imagem.....	21
Figura 3 - Modelo para processamento de imagem com referenciais totalmente desconexos .....	23
Figura 4 - Modelo simplificado de aplicação para imagem estereográfica. ....	28
Figura 5 - Plano de linhas de um casco de semi-planeio .....	29
Figura 6 - Curva de área seccional de uma embarcação genérica. ....	30
Figura 7 - Porção frontal do casco da lancha Alfa 300.....	31
Figura 8 - Procedimentos para elaboração do as-built através da fotogrametria. ....	34
Figura 9 - Exemplo de captura de imagens de objetos para aplicação da fotogrametria. ....	36
Figura 10 - Fotografia capturada no nível médio da embarcação. ....	37
Figura 11 - Fotografia capturada perto do solo. ....	37
Figura 12 - Nuvem de pontos e posicionamento das capturas.....	38
Figura 13 - Nuvem de pontos tratada em carácter preliminar. ....	39
Figura 14 - Diminuição da densidade da nuvem de pontos na região da popa.....	40
Figura 15 - Contornos do casco da Alfa 300. ....	41
Figura 16 - Procedimento utilizado na abordagem manual para o <i>as-built</i> . ....	42
Figura 17 - Gráfico comparativo de tempo (minutos) entre as metodologias. ....	45
Figura 18 - Média dos desvios verticais dos pontos de cruzamento entre linhas de alto e balizas. ....	48
Figura 19 - Média dos desvios horizontais dos pontos de cruzamento entre linhas de água e balizas. ....	48
Figura 20 - Curvas de área seccional.....	49
Figura 21 - Modelo computacional do casco da Alfa 300 gerado por intermédio da fotogrametria. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Papeis dos <i>stakeholders</i> no âmbito da construção civil. ....	15
Tabela 2 - Comparação entre 3D <i>laser scanning</i> e fotogrametria. ....	18
Tabela 3 - Resumo dos parâmetros de entrada do método de processamento de imagem.....	26
Tabela 4 - Características e dimensões da lancha Ecomariner Alfa 300. ....	32
Tabela 5 - Especificações da câmera traseira do iPhone SE.....	34
Tabela 6 - Tempos e recursos na abordagem tradicional para o <i>as-built</i> .....	43
Tabela 7 - Tempos e recursos na abordagem fotogramétrica para o <i>as-built</i> . ....	43
Tabela 8 - Legenda das macro atividades. ....	45
Tabela 9 - Tabela de cotas, em metros, para o casco obtido pela abordagem tradicional.....	47
Tabela 10 - Tabela de cotas, em metros, para o casco obtido pela abordagem fotogramétrica. ....	47
Tabela 11 - Desvios, em metros, dos pontos equivalentes entre as duas tabelas de cotas.....	47

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEC	ARQUITETURA ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO
ASP	<i>AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY</i>
B	BOCA (DE UMA EMBARCAÇÃO)
BIM	<i>BUILDING INFORMATION MODELLING</i>
CAD	<i>COMPUTER AIDED DESIGN</i>
D	PONTAL (DE UMA EMBARCAÇÃO)
IBM	<i>IMAGE-BASED MODELLING</i>
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
LB	LINHA DE BASE
LC	LINHA DE CENTRO
LOA	COMPRIMENTO TOTAL (DE UMA EMBARCAÇÃO)
LWL	LINHA DE ÁGUA DE PROJETO
SNAME	<i>THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS</i>
T	CALADO (DE UMA EMBARCAÇÃO)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	8
1.1 Objetivo .....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.1 Modelagens computacionais, sua importância, efeitos e benefícios .....	11
2.2 Técnicas de modelagens <i>as-built</i> .....	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	19
3.1 Fotogrametria .....	19
3.1.1 Caracterização geométrica das imagens .....	21
3.1.2 Técnicas estereoscópicas para processamento de imagem .....	27
3.2 Conceitos da arquitetura naval .....	28
3.2.1 Plano de linhas .....	28
3.2.2 Curva de área seccional .....	30
4 METODOLOGIA .....	30
4.1 Dados da embarcação .....	30
4.2 Abordagem fotogramétrica para o <i>as-built</i> .....	32
4.2.1 Dados da câmera digital .....	33
4.2.2 Procedimento utilizado na abordagem fotogramétrica para o <i>as-built</i> .....	34
5 RESULTADOS .....	42
5.1 Procedimento utilizado na abordagem manual para o <i>as-built</i> .....	42
5.2 Comparação: procedimentos .....	42
5.3 Comparação: precisão métrica .....	45
5.4 Limitações da abordagem fotogramétrica para o <i>as-built</i> .....	49
6 CONCLUSÃO .....	51
6.1 Sugestões para estudos futuros .....	52
REFERÊNCIAS .....	53
ANEXO A: PLANO DE LINHAS DO CASCO DA ALFA 300 COM BASE NA MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA .....	56
ANEXO B: PLANO DE LINHAS DO CASCO DA ALFA 300 COM BASE NA MODELAGEM TRADICIONAL .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

Na esfera profissional da arquitetura, engenharia e construções (AEC), o "As-Built" de um produto (e.g., edificações, embarcações, instalações em geral, etc.) consiste em uma documentação contendo, de forma detalhada, todas as suas informações e medidas em seu formato final – como construído – realizadas todas as revisões após adaptações construtivas em decorrência de causas diversas.

O avanço em ritmo acelerado da tecnologia viabiliza, cada vez mais, a utilização de projetos em sua forma *as-built* que, por sua vez, possibilita o uso de diversos recursos os quais têm o potencial para gerar melhorias associadas a diversas áreas. O *as-built*, quando combinado a outras ferramentas, pode ser empregado como um agente facilitador para o cumprimento de atividades em diversos âmbitos.

O *as-built* tem relevância no domínio econômico de um projeto, com ênfase no aumento de eficiência e redução de desperdícios nos processos. Ele pode ser aproveitado em circunstâncias como: na obtenção de insumos métricos para elaboração de projetos de modificação, reparos, readequação e/ou ampliação; no planejamento, controle e gestão de recursos e do fluxo de atividades durante a construção de um produto; entre outras situações que envolvem tomadas de decisão durante o ciclo de vida de um projeto, nas quais o uso direto ou indireto de simulações computacionais, recursos visuais e a agilidade na obtenção dados tornam o processo menos complexo.

Características de cunho sócio-cultural, política e econômica do Brasil fazem com que parte dos produtos, instalações e construções sejam erguidas com predominância do empirismo, sem análise técnica e amparos normativos. Esse é o cenário no âmbito náutico e naval de pequeno porte que engloba uma fração das embarcações do país. Nesse sentido, a depender da abordagem metodológica, a elaboração de projetos *as-built* são fundamentais também em conjunturas burocráticas, auxiliando em situações como em adequações documentárias para com requisitos normativos em vigência.

Existem diversos meios para a elaboração de projetos de instalações, construções, ambientes ou produtos no seu formato *as-built*. Dentre as metodologias propostas, há aquelas as quais caracterizam-se pelo fato do seu procedimento básico ser predominantemente manual. Recursos como tempo e mão-de-obra são escassos nessas abordagens metodológicas, que tem como principal contrapartida positiva o baixo custo associado ao processo. Contudo, há, atualmente, modelagens *as-built* com propostas opostas as mencionadas, que carrega consigo alto valor agregado, por meio da utilização de arcabouços tecnológicos.

O escopo do presente estudo consiste em uma comparação entre um método predominantemente manual, com auxílio de ferramentas físicas para mapeamento de coordenadas, e uma modelagem fotogramétrica através de aparelhagem não profissional.

O corpo do trabalho de conclusão de curso (TCC) que segue, será estruturado em mais cinco capítulos, dentre os quais estão a revisão bibliográfica, fundamentação teórica, metodologia, resultados e conclusão.

A revisão bibliográfica foi elaborada com o intuito de verificar o estado da arte no que se refere à modelagem computacional e suas aplicabilidades. Esse capítulo foi subdividido em dois, um com viés orientado para análises acerca de conceitos, benefícios e contrapartidas da aplicação *as-built*/BIM e outro para examinar métodos atuais de modelagens reversas. Artigos recentes foram selecionados para esse estudo, de maneira coerente com o escopo proposto.

A fundamentação teórica incorpora todos os conceitos utilizados ao longo do TCC, tanto na metodologia proposta quanto na análise dos resultados. Nesse capítulo haverá explicações acerca de aspectos técnicos sobre fotogrametria, bem como dos parâmetros utilizados na comparação dos modelos computacionais gerados por meio do *as-built*.

No capítulo de metodologia há a apresentação dos procedimentos de elaboração do projeto *as-built* através da abordagem fotogramétrica, com descrição detalhada de todas as atividades desempenhadas nos processos, *softwares* e ferramentas utilizadas. Além do passo-a-passo de atividades e exposição de parâmetros do equipamento de captura de imagem, haverá uma exposição acerca

das características gerais, propósitos e finalidade da embarcação a ser reconstruída computacionalmente.

A apresentação dos resultados consiste na análise técnica/comparativa dos modelos computacionais gerados a partir do método proposto e da abordagem manual para o *as-built*. Para tal, serão apresentadas inicialmente as informações coletadas sobre os procedimentos utilizados para o modelo computacional concebido a partir do método manual. Para fins de comparação, serão utilizados conceitos do campo da arquitetura naval, para validação métrica, e parâmetros de tempos e esforços (recursos) para elucidações no sentido de eficácia procedimental. Ao fim do estudo, espera-se confirmar a eficiência da metodologia proposta, com esclarecimentos acerca das suas limitações e incertezas relativas.

O capítulo de conclusão visa consolidar, em parte, a viabilidade da metodologia de modelagem reversa baseada em imagem proposta e apontar possíveis futuros estudos na área.

## 1.1 Objetivo

O presente TCC propõe-se a validar, sob ótica de precisão métrica e eficiência procedimental, um método de elaboração de projetos *as-built* para cascos de embarcações com base em imagens. O TCC tem o objetivo central de viabilizar uma abordagem metodológica para modelagem reversa com alta praticidade e baixo custo agregado.

Para atingir o objetivo proposto, o estudo será fragmentado entre as seguintes etapas específicas:

- Coletar informações sobre elaborações de projetos *as-built* manuais (e.g. tempos, procedimentos, etc.);
- Coletar dados da embarcação para a elaboração do projeto *as-built* baseado em imagens (fotogrametria);
- Modelar computacionalmente o casco da embarcação através dos dados coletados. Os dados para a abordagem fotogramétrica consistem em fotos;

- Realizar uma análise técnica/comparativa fundamentada em conceitos da arquitetura naval, para precisão métrica e procedimentos, para praticidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Modelagens computacionais, sua importância, efeitos e benefícios

Insumos métricos e desenhos (projetos conceituais e básicos) são imprescindíveis para conceber a construção na mesma medida em que documentações das construções em sua forma final (*as-built*) também são importantes na operação/manutenção. Klein, Li e Becerik-Gerber (2012) comentam acerca da importância da utilização de modelos *as-built* como ferramentas nas operações de manutenção e reformas de construções em geral. Os destaques para os benefícios decorrente do uso do *as-built* são notabilizados em aspectos como na gestão de espaços, equipamentos e sistemas integrados. Se aproveitadas de maneira eficaz, as informações e desenhos contidos nesse tipo de projeto podem ser acessados continuamente (HAFEZZ et al., 2016), prevenindo a coleta de dados em campo, retrabalho, antecipando situações adversas e possibilitando mudanças ou atualizações chaves de procedimentos.

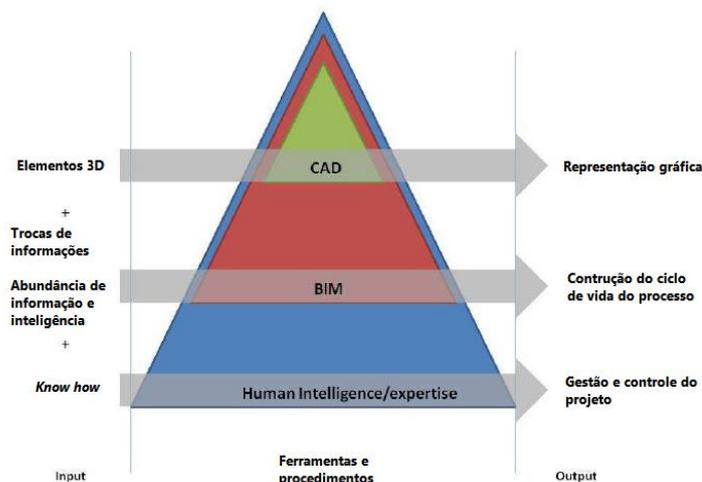
Projetos *as-built* por meio de modelagens assistidas por computador (*Computer Aided Design*, CAD) são fundamentais, porém, por si só, não garantem, essencialmente, os benefícios mencionados. Para tal, é importante a sua integração através de uma plataforma de modelagem da informação da construção (*Building Information Modeling*, BIM). Desde a sua introdução, o BIM está se tornando cada vez mais essencial para o fluxo de trabalho e trocas de informações entre os *stakeholder* (e.g. arquitetos, engenheiros, contratantes, proprietários, gerentes de instalações) envolvidos em um projeto. O BIM funciona como uma eficiente ferramenta de gestão interdependente à modelagem computacional e propicia ganhos em diversos aspectos no que se refere à indústria da AEC (RAN, 2015). O método cumpre diversas funções no campo da AEC em decorrência da quantidade e heterogeneidade de profissionais envolvidos no ciclo de vida de um projeto. Cada profissional desempenha um tipo de atividade, em determinado estágio do projeto,

de acordo com sua finalidade. Consequência disso são as distintas definições associadas ao BIM, as quais dependem diretamente da percepção singular de cada *stakeholder* e seu papel desempenhado no ciclo de vida do projeto.

Aranda-Mena et al. (2009) discorrem a respeito da definição multifacetada acerca do BIM, comentando que para alguns profissionais o BIM é simplesmente um *software* para aplicações diversas. Para outros, contudo, é um meio para elaborar projetos e documentar informações de construção. O BIM incorpora todas essas características e diversas outras. Fato é que, caso aplicado com todas as políticas necessárias e utilizado devidamente pelos profissionais em todo o ciclo de vida do projeto, o BIM possui o potencial para se comportar como uma ferramenta poderosa no que diz respeito à otimização de processos em todos os níveis e estágios. Uma possível definição que agrega todas as características é a que o BIM é uma representação computacional física e funcional das características de um produto, instalação, construção ou edificação. O BIM opera, então, como uma grande base de dados totalmente confiáveis a qual atua como um agente facilitador para tomadas de decisões no ciclo de vida de um projeto.

Wong e Yang (2010) exemplificam o BIM como a parte relacionada à modelagem semântica, a qual representa de maneira eficaz as propriedades do projeto. A operabilidade dessa modelagem semântica, no entanto, depende do nível de eficiência da modelagem geométrica, bem como da própria parte humana que realiza o plano e a operação de tais métodos.

Figura 1 - Ferramentas, processos e aplicações da modelagem da informação



Fonte: Wong e Yang (2010)

Wong e Yang (2010) expuseram estatísticas – compiladas pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos (NIST, USA), Instituto Americano de Arquitetos dos Estados Unidos (AIA, USA) e Centro de Pesquisa Colaborativo em Construção e Inovação da Austrália (CRCCI, Austrália) – as quais ajudam a entender o grau de impacto do BIM em cada estágio do ciclo de vida de um projeto. Com base nesse estudo, o BIM é considerado muito relevante na fase de desenvolvimento do projeto conceitual e documentação de projeto. Não muito atrás, possui importância moderada na etapa de fabricação (planejamento e controle da produção). No entanto, é subaproveitado na pós-construção (gestão da manutenção). Os autores ponderam que o BIM tem o potencial para ser impactante também nessa última fase do ciclo de vida do projeto, se utilizado de modo integrado à gestão.

Dentre os já citados anteriormente, Singh e Ran (2016) elencam os principais prováveis benefícios decorrentes da aplicação do BIM no campo da AEC. Eles comentam a respeito da redução do retrabalho, da agilidade no fluxo de trabalho e informação, do maior controle e previsão de custos, do incremento na qualidade do produto, do favorecimento para a automatização e programação da produção. No âmbito específico da indústria naval – singular no que diz respeito à complexidade de seus processos produtivos e quantidade de sistemas e subsistemas do seu produto final (e.g. navios, plataformas *offshore*) – o uso do BIM, as-built e/ou 3D CAD abre espaço para um vasto campo de possibilidades. Singh e Ran (2016), com o intuito de colher informações acerca da efetividade dessa tecnologia em estaleiros, realizaram uma pesquisa através de uma entrevista estruturada com profissionais do âmbito naval. Houve a constatação de que os principais benefícios para esse segmento industrial gira em torno de aspectos como programação da produção, simulações, análises de interferência dos sistemas e subsistemas, entre outros aspectos que abrangem computação gráfica, realidade virtual e visualização em geral.

A depender do tipo de instalação ou edificação, em geral, o custo despendido com a gestão da manutenção de tal empreendimento constitui mais da metade das despesas de pós construção (CHEN et al., 2018). Na maioria dos casos a ineficiência está relacionada a um método de elaboração de rotinas através de uma abordagem com viés analítico, sem o auxílio de ferramentas computacionais tanto

de simulação quanto de visualização. O BIM pode ser aplicado nesse ambiente com o intuito de sistematizar a programação de rotinas, muito por conta de uma de suas principais características que é a concentração de informações relevantes acerca do projeto. Esses dados podem ser aproveitados, por exemplo, em uma programação de atividades através de uma modelagem de eventos discretos (KÖNIG et al., 2012), resultando em melhorias para o processo como um todo.

Conforme explanado, o BIM possui diversas aplicabilidades no campo de processos, com ênfase no controle da construção/produção. Golparvar-Fard, Savarese e Peña-Mora (2011) falam a respeito da modelagem em 4D – três dimensões de espaço com adição de uma linha temporal – e a sua integração como a partir de um método *as-planned*, no qual há um acompanhamento e trocas de informações semi-automatizadas, em tempo real, do que foi planejado com o que realmente foi executado. Caso esse método seja associado de modo coerente com uma programação de construção/produção e continuamente atualizado, funciona como uma ferramenta facilitadora para elaboração de estratégias e tomadas de decisão no que se refere a questões como gestão de espaço, logística da cadeia de suprimentos e sequenciamento de atividades.

Em suma, os benefícios derivados do BIM podem ser vinculados às boas práticas, ferramentas e tecnologias aplicadas com a finalidade de otimizar o fluxo de informação no ambiente de trabalho. Hafezz et al. (2016), em seu estudo, fala a respeito da importância da utilização do BIM nesse âmbito, com melhorias que vão desde questões de baixa complexidade (e.g. repasse de informações de projeto para construção, responsabilidades, sequenciamento de atividades, treinamentos, etc.) até assuntos mais elaborados (e.g. intercâmbio de informações com agentes do projeto em fase preliminar, programação de produção, atualização de atendimento a requerimentos do cliente, etc.).

A aplicação dos desenhos assistidos por computador no âmbito da modelagem da informação da construção e sua implementação através das ferramentas computacionais foram introduzidos com a finalidade de atender a demandas no segmento da arquitetura, engenharia e construção. O intuito, em resumo, é o de solucionar problemas e otimizar os processos no ciclo de vida de um projeto em sua totalidade. No entanto, para a metodologia e suas ferramentas

tornarem-se operacionais, cada agente do projeto, desde os projetistas conceituais até os gestores das instalações, tem a obrigação de cumprir suas responsabilidades perante as suas funções na aplicação do BIM. A tabela 1 constitui uma síntese compreendida no estudo Latiffi, Brahim e Fathi (2016), no qual os pesquisadores realizaram uma análise dos papéis dos *stakeholders* envolvidos no ciclo de vida de um projeto no ramo da indústria de construção civil. Segmento industrial que se assemelha em diversos aspectos, em um dado estágio do processo produtivo, com as indústrias do segmento naval, aeronáutico e aeroespacial.

Tabela 1 - Papéis dos *stakeholders* no âmbito da construção civil.

<b>Nº</b>	<b>Agente</b>	<b>Funções e responsabilidades do agente no projeto utilizando o BIM</b>
1	Cliente/proprietário	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir as diretrizes de aplicação do BIM.</li> </ul>
2	Arquiteto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elaborar projeto conceitual;</li> <li>Analisar e ajustar projeto detalhado;</li> <li>Gerar informações em nível de construção;</li> <li>Elaborar documentações de construção.</li> </ul>
3	Engenheiros	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elaborar projeto detalhado;</li> <li>Elaborar desenhos e planos com elementos do projeto detalhado.</li> </ul>
4	Contratante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analisar factibilidade da construção;</li> <li>Planejar e programar utilizando o BIM 4D;</li> <li>Estimar preliminarmente o custo.</li> </ul>
5	Orçamentista ( <i>Quantity Surveyor</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extrair quantidades e orçar o projeto a partir do modelo 3D.</li> </ul>
6	Gerente da instalação	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar as informações do BIM 3D para propósitos de gestão da manutenção da instalação.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Latiffi, Brahim e Fathi (2016).

## 2.2 Técnicas de modelagens *as-built*

Os métodos de reconstrução de ambientes e objetos são comumente enquadrados em dois grandes grupos, tais quais as que se utilizam de aparelhagem que dependem de contato (e.g. ferramentas de medição de coordenadas, réguas, rolamentos, etc.) e os que não dependem de contato. Nessa segunda subdivisão, existem alguns métodos de captura com pouca funcionalidade no que se refere à elaboração de planos e documentações para uso durante o ciclo de vida de um projeto na indústria relacionada à AEC. Esses são, na maioria dos casos, as abordagens metodológicas não-ópticas (e.g. radar, sonar, tomografia, etc.). As técnicas de captura/reconstrução mais relevantes, em termos de praticidade, aplicabilidade e integração, na esfera profissional da arquitetura, engenharia e construção são mencionadas por Remondino e El-Hakim (2006):

- *Image-based modelling (IBM)*: Em seu domínio há, basicamente, a fotogrametria. Utiliza-se de capturas de imagens em 2D – as informações dimensionais do ambiente e/ou objetos contidos – para realizar a sua reconstrução tridimensional através de um algoritmo matemático para o tratamento dos dados. Apesar de haver métodos de fotogrametria interpretativa que fazem uso de imagens únicas, as técnicas mais eficientes de fotogrametria difundidas atualmente são fundamentadas na reconstrução 3D de um ambiente e/ou objeto com base na combinação de diversas perspectivas. A precisão relativa ao método está associada a aspectos de calibração e capacidade dos dispositivos, fatores de escala (e.g. profundidade da imagem), modelagem manual e condições do ambiente (e.g. luminosidade, brilho, umidade, etc.).
- *Ranged-based modelling*: Técnica caracterizada pela captura direta das informações geométricas do ambiente e/ou objeto na sua forma tridimensional. Dessa forma, eliminam-se as incertezas associadas à conversão de imagens, característica das modelagens com base em imagem. Os erros inerentes ao método se resumem, então, às condições do ambiente e potencial dos dispositivos. Contudo, essa última fonte de imprecisão é praticamente anulada pela alta precisão características dos dispositivos utilizados nesse método que são capazes de representar formas

complexas de modo detalhado e preciso. Esses dispositivos, em sua grande maioria, operam por meio de projeções de padrões de luzes artificiais, as quais são o alicerce da tecnologia baseada no *laser scanning*.

Ambos os métodos cumprem sua função quando respeitadas suas limitações, tendo em vista suas incertezas relativas, propósito e objetivo final. Técnicas fotogramétricas são mais acessíveis sob a ótica do custo operacional e, normalmente, tem um *lead time* (tempo de entrega do produto final) reduzido para projetos em pequena e média escala. A contrapartida negativa se concentra na baixa eficácia em ambientes com múltiplos componentes (e.g. grandes ambientes internos, instalações industriais, etc.), levando em conta a quantidade de fontes de erros a se minimizar para atingir a precisão necessária. Nesses casos de reconstrução, apesar de aparelhagem mais custosa, é aconselhável a aplicação do *laser scanning* para atender todas as necessidades do ponto de vista de precisão métrica em um prazo ótimo (FADLI ET AL. 2016).

Apesar de procedimentos e princípios divergentes, as duas técnicas compactuam de certa complexidade operacional. Na aplicação do *laser scanning*, a manipulação dos equipamentos tende a não ser tão simples e necessita de um grau avançado de conhecimento para seu domínio e aproveitamento completo do seu potencial. Na abordagem fotogramétrica, a dificuldade se concentra, em reconstruções de ambientes ou produtos menos simplórios, tanto estágio de levantamento dos dados (controle das incertezas relativas) quanto no estágio de tratamento dos mesmos (conversão e modelagem computacional). Klein, Li e Becerik-Gerber (2012) realizaram um estudo de caráter teórico/comparativo entre os dois métodos de reconstrução e compilaram diversas informações sobre alguns aspectos mencionados anteriormente. A tabela 2, além de evidenciar as divergências fundamentais entre as técnicas de captura e reconstrução, também apresenta informações que justificam as aplicações mais apropriadas para ambos, bem como seus respectivos pontos positivos e negativos mencionados. Em resumo, a escolha do método a ser utilizado depende principalmente do custo/benefício, levando em conta a complexidade do ambiente e/ou produto com ponderação do *lead time* para conclusão da reconstrução.

Tabela 2 - Comparação entre 3D *laser scanning* e fotogrametria.

<b>Fator comparativo</b>	<b>3D <i>laser scanning</i></b>	<b>Fotogrametria</b>
Precisão	Milímetros	Centímetros
Resolução ( <i>point cloud</i> )	Milhões de pontos	Milhares de pontos.
Custo médio dos equipamentos (aparelhagem profissional)	Dezena de milhar(es) de dólares	Milhar(es) de dólares
Habilidade requerida para manuseio dos equipamentos	Média/alta	Baixa
Mobilidade/praticidade	Baixa (volumoso)	Alta
Geração de dados 3D	Captura automática	Processamento computacional posterior
<i>Software</i> comercial?	Sim	Sim
Modelagem 3D	Geração de malha e extração de forma automática	Modelagem manual
Fontes de incerteza ambientais	Reflexão, textura das superfícies, condições meteorológicas, ângulo de captura/linha de visão, bordas, movimento	Reflexão, textura das superfícies, ângulo de captura/linha de visão, condições meteorológicas, repetitividade nas operações (fadiga)

Fonte: Adaptado de Klein, Li e Becerik-Gerber (2012)

Em projetos complexos, a depender do grau de detalhe necessário imposto na reconstrução, a combinação entre as duas técnicas pode ser uma alternativa para a minimização de esforço e tempo despendido, além da otimização da relação entre o custo e o benefício da modelagem *as-built*, como exposto nos estudos de Golparvar-Fard et al. (2011), El-Omari e Moselhi (2008) e Markley, Stutzman e Harris (2008). Em suma, não existe uma única técnica de reconstrução ideal que se enquadre em todas as situações. A escolha depende do grau de complexidade do ambiente e/ou produto a ser reconstruído computacionalmente, em conjunto com a

precisão métrica desejada e a mobilização (e.g. investimento, prazo requisitado, esforço despendido, etc.) por parte do requerente do serviço e projetista.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A elaboração da presente seção foi fundamentada em três livros referência das suas respectivas áreas de estudo, com adição de informações pontuais de alguns estudos. Na seção 3.1, que aborda conceitos básicos acerca da fotogrametria, *Manual of Photogrammetry* (ASP, 1980) e *Introduction to Modern Photogrammetry* (MIKHAIL, BETHEL, e MCGLONE, 2001). Na seção 3.2, que comenta a respeito de conceitos técnicos que envolvem a área da arquitetura naval, o alicerce teórico utilizado foi o livro *Principles of Naval Architecture* (SNAME, 1998).

#### 3.1 Fotogrametria

A Fotogrametria pode ser definida como o método pelo qual obtém-se informações, com confiabilidade e imprecisões previsíveis, de ambientes ou objetos físicos através de um processo de gravação e processamento de imagens fotográficas. O objetivo fim dessa técnica é o de reconstruir o espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais. A fotogrametria possui um campo vasto de possibilidades, aplicações e vieses.

A fotogrametria interpretativa ou foto-interpretação é um segmento da fotogrametria que segue a premissa de identificar ambientes e/ou objetos para julgar seu significado, retirando informações convenientes, a partir de uma análise sistemática de fotografias. Esse ramo da fotogrametria engloba alguns processos chave que se complementam entre si, mas podem também ser empregados individualmente, a depender do objetivo e escopo da análise. A foto-leitura é a etapa mais simples a qual tem o intuito do reconhecimento inicial direto de objetos por julgamentos por vezes subjetivos. Na foto-análise, há a introdução de um critério que gira em torno do exame através da distinção e descontinuidades das partes da

imagem fotogramétrica em questão. A foto-dedução é uma técnica voltada para o âmbito da topografia, incorporando, além das características da foto-leitura, um estudo profundo acerca da estrutura geomorfológica da região e seus processos de formação. Os elementos básicos de interpretação utilizados pela foto-interpretação são a tonalidade fotográfica relativa, textura e padrões.

O ramo da fotogrametria descrito acima se atém ao reconhecimento qualitativo das informações contidas nas imagens fotogramétricas. A fotogrametria métrica, a qual muitas vezes é referida apenas pelo seu prefixo inicial, possui natureza quantitativa. A sua prerrogativa central está relacionada diretamente com medições para obtenção de informações métricas, ou seja, posição relativa entre pontos de interesse. Sendo mais específico, o objetivo é o de, com base nas coordenadas bidimensionais nos planos das múltiplas imagens, obter-se as coordenadas tridimensionais dos pontos de interesse com relação a um referencial global absoluto. O nome dado para a propriedade da visão em perspectiva é o de estereoscopia, princípio que rege a fotogrametria como um todo.

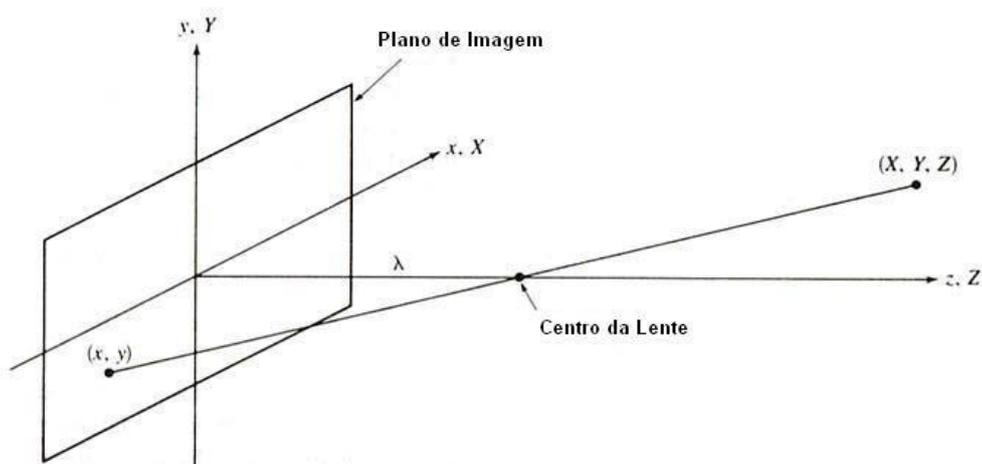
As duas vertentes internas à fotogrametria mais importantes são a aerofotogrametria e a fotogrametria terrestre. Ambas compactuam do mesmo princípio mencionado no parágrafo anterior de obtenção de coordenadas 3D realísticas a partir de imagens 2D. A aerofotogrametria é amplamente utilizada no âmbito da geodésia para reconstrução de terrenos e levantamento topográficos. A fotogrametria terrestre tem ênfase na aplicação em objetos, sejam eles de pequeno, médio ou grande porte e ambientes internos. Essa vertente carrega consigo maior complexidade pelo fato do ponto de vista operar diversas perspectivas, normalmente varrendo uma área de captura completa de 360° em volta do objeto ou uma rotação interna em um ambiente. Essa complexidade é caracterizada pela aparente aleatoriedade da localização do ponto exato de captura das imagens e é contornada a partir de princípios da triangulação fotogramétrica e técnicas estereoscópicas de imagem (*stereoscopic imaging techniques*) as quais serão discutidas na subseção a seguir de caracterização geométrica das imagens.

### 3.1.1 Caracterização geométrica das imagens

O processo de reconstrução de objetos contidos em imagens 2D para modelos tridimensionais faz uso de conceitos matemáticos, os quais envolvem, em linhas gerais, os campos da geometria analítica, descritiva e projetiva. Mais especificamente, essa ciência engloba tanto questões simples acerca de transformações lineares básicas para mudanças de referenciais (e.g. translações, rotações, escala, etc.), como também transformações complexas não lineares de perspectivas.

Valença (2006), com alicerce teórico nos livros de Fu, Gonzales e Lee (1987) e Gonzales e Woods (2002), comenta a respeito das transformações de perspectivas, relacionando o seu conceito com a projeção de pontos contidos no espaço em três dimensões em um plano bidimensional e vice-versa. O autor apresenta um modelo simplificado para exemplificar o processamento de imagem. A modelagem matemática gira em torno de um sistema de coordenadas inerente à câmera e um global. O referencial interno a câmera diz respeito ao plano de imagem (2D). O referencial global visa localizar a própria câmera no espaço, bem como os pontos do espaço (3D) a serem mapeados.

Figura 2 - Modelo básico para o processamento de imagem.



Fonte: Adaptado de Fu, Gonzales e Lee (1987).

Na figura 2,  $(x,y)$  faz referência ao sistema de coordenadas bidimensional que engloba o plano de imagem, tendo 'z' como uma variável livre e fazendo menção à linha do eixo ótico. Esse eixo, por sua vez, caracteriza uma linha imaginária perpendicular ao plano de imagem que passa pelo centro da lente (ponto focal) do equipamento de captura.  $(X,Y,Z)$  representa o sistema de coordenadas global.

No presente modelo de processamento de imagem é feita uma simplificação de maneira a adotar o sistema de coordenadas global em alinhamento com o eixo ótico. Para essas condições, o ponto focal, para onde convergem as projeções pontuais do objeto, é representado pela coordenada global  $(0,0,\lambda)$  e seu módulo é a distância focal  $(\lambda)$ . A partir de manipulações matemáticas básicas e, considerando a restrição de que o ponto do objeto esteja sempre a frente do centro da lente do equipamento de captura  $(Z > \lambda)$ , é possível obter uma transformação da perspectiva tridimensional, com caráter não linear, para o plano de imagem.

$$x = \frac{\lambda * X}{\lambda - Z} \quad (1) \quad ; \quad y = \frac{\lambda * Y}{\lambda - Z} \quad (2)$$

A fotogrametria, porém, funciona com base na lógica inversa: reconstrução da perspectiva tridimensional com base em pontos contidos no plano de imagem. Ou seja, projetar pontos em 3D a partir de representações desses pontos em figuras 2D. No modelo simplificado, os pontos conhecidos no plano de imagem são representados pelas coordenadas  $(x_0,y_0)$ . A partir das equações (1) e (2), é possível fazer a projeção desses pontos para uma perspectiva tridimensional. Ou seja, em linguagem matemática, tendo como referência o sistema global de coordenadas, montar uma equação para a reta que passa pelos pontos  $(x_0,y_0,0)$  e  $(0,0,\lambda)$ .

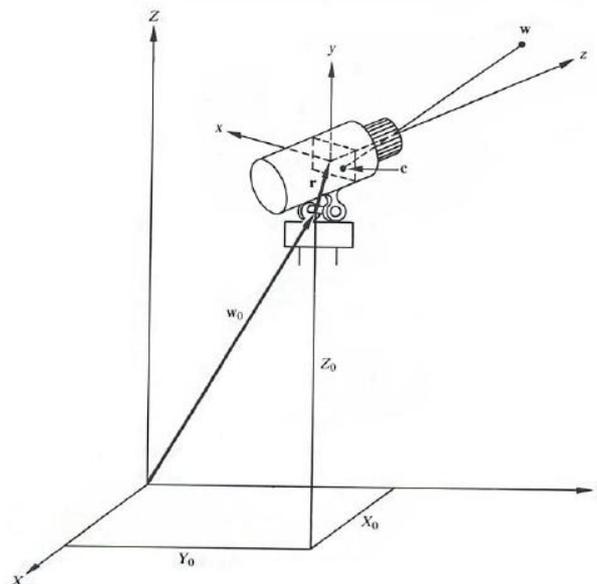
$$X = \frac{x_0}{\lambda}(\lambda - Z) \quad (3) \quad ; \quad Y = \frac{y_0}{\lambda}(\lambda - Z) \quad (4)$$

As equações (3) e (4) mostram que, para reconstruirmos um objeto em perspectiva tridimensional a partir de imagens fotogramétricas, é necessário o

conhecimento de informações reais no domínio do espaço acerca dos pontos a serem representados. Essas informações são evidenciadas pela variável 'Z' presente nas equações. Na seção 3.1.2 serão apresentados alguns conceitos do campo da estereoscopia que auxiliam no preenchimento dessa lacuna.

O modelo matemático apresentado, apesar das simplificações e aliada a conceitos de imagens estéreo (triangulação fotogramétrica), é o alicerce teórico para os algoritmos que regem o funcionamento dos *softwares* de fotogrametria atuais. Contudo, esses programas trabalham com a reconstrução de objetos a partir de múltiplas imagens 2D (*many-to-one transformation*). Então, o modelo completo deve englobar outras transformações de referencial, rotações e translações de eixo. Nesse contexto, há a adição de conceitos de ângulo de *pan*, que diz respeito ao movimento panorâmico (desvio de alinhamento do eixo horizontal entre o referencial da câmera e global) e o ângulo de *tilt*, que diz respeito à inclinação (desvio de alinhamento do eixo vertical entre o referencial da câmera e global).

Figura 3 - Modelo para processamento de imagem com referenciais totalmente desconexos



Fonte: Adaptado de Gonzales e Woods (2002).

Todas essas transformações são necessárias pelo fato da necessidade da existência de um sistema de coordenadas global para todo o conjunto de imagens

capturadas. No caso da análise a partir do princípio de *many-to-one transformation*, faz-se necessária a presença de dois referenciais totalmente desconexos conforme ilustrado na figura 3, onde o referencial global é representado por  $(X,Y,Z)$  e o referencial da câmera por  $(x,y)$ , tendo  $z$  como variável livre relacionada com o eixo ótico do plano de imagem do equipamento de captura.

A projeção de pontos contidos no espaço tridimensional em um plano bidimensional de imagem (e o raciocínio inverso), para os referenciais expostos, continua a ser o objetivo final do método, visto que é o conceito base por trás do processamento de imagem e fotogrametria. A diferença para a metodologia simplificada exposta anteriormente é evidenciada apenas pelo referencial global que, na abordagem de *many-to-one transformation*, é imprescindível que seja totalmente desassociado do referencial do plano de imagem. O processo de reconstrução de imagem é representado, então, pela projeção do ponto genérico do espaço 'w' (pontos do objeto a ser reconstruído em perspectiva) caracterizado pelas coordenadas  $(X,Y,Z)$  sistema de coordenadas da imagem, ponto 'c' caracterizado pelas coordenadas bidimensionais do plano de imagem  $(x,y)$ , tendo 'z' como variável livre relacionada com o eixo ótico do equipamento de captura. Ou seja, o objetivo continua a ser formular uma equação que relacione as duas coordenadas dos pontos contidos no plano de imagem com as três coordenadas desse ponto em um espaço tridimensional.

Em outras palavras, além do procedimento de transformação de perspectiva demonstrado, são necessárias as inclusões de matrizes de rotações e translações de eixo. A matriz de transformação de perspectiva é deduzida a partir das equações (1) e (2) e está representada pela equação (5). A translação do eixo de referência é decomposto em duas fases, pelo vetor 'w<sub>0</sub>'  $(X_0,Y_0,Z_0)$  e pelo vetor 'r'  $(r_x,r_y,r_z)$ , e duas matrizes de translações pelas equações (6) e (7) respectivamente. O alinhamento entre o sistema de coordenada global e sistema de coordenada do plano de imagem é formado por duas rotações, *pan* ( $\theta$ ) e *tilt* ( $\alpha$ ), matematicamente representadas pela matriz de rotação acoplada (8).

$$[P] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda} & 1 \end{pmatrix} \quad (5) \quad ; \quad [G] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$[H] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_x \\ 0 & 1 & 0 & -r_y \\ 0 & 0 & 1 & -r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$[R] = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\theta)\cos(\alpha) & \cos(\theta)\cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) & 0 \\ \text{sen}(\theta)\cos(\alpha) & -\cos(\theta)\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Todas as matrizes estão enquadradas para o funcionamento com base em um sistema de coordenadas homogêneo de quatro dimensões onde, a partir de uma transformação linear simples (conversão de coordenadas), a coordenada cartesiana (X,Y,Z) do ponto genérico 'w' pode ser representada pelo vetor (X,Y,Z,1). O uso do sistema de coordenadas homogêneo é justificado pela facilidade no manuseio algébrico, visível pela presença da matriz de identidade 3x3 nas equações de transformação (5), (6) e (7). A transformação de perspectiva em conjunto com o esquema de deslocamento e alinhamento do eixo de referência global está explicitada na equação (9).

$$c = ([P] * ([H] * ([R] * ([G] * w)))) \quad (9)$$

Em termos práticos, expandindo a equação matricial (9), as duas equações que relacionam um ponto genérico (x,y) do plano de imagem, adotando 'z' como

variável livre, com um ponto genérico do espaço (X,Y,Z) estão representadas pelas equações (10) e (11).

$$x = \frac{\lambda((X - X_0) \cos(\theta) + (Y - Y_0) \operatorname{sen}(\theta) - r_x)}{-(X - X_0) \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\alpha) + (Y - Y_0) \cos(\theta) \operatorname{sen}(\alpha) - (Z - Z_0) \cos(\alpha) + r_z + \lambda} \quad (10)$$

$$y = \frac{\lambda(-(X - X_0) \operatorname{sen}(\theta) \cos(\alpha) + (Y - Y_0) \cos(\theta) \operatorname{sen}(\alpha) + (Z - Z_0) \operatorname{sen}(\alpha) - r_y)}{-(X - X_0) \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\alpha) + (Y - Y_0) \cos(\theta) \operatorname{sen}(\alpha) - (Z - Z_0) \cos(\alpha) + r_z + \lambda} \quad (11)$$

O objetivo fim da fotogrametria é reconstituir uma nuvem de pontos de um plano bidimensional da imagem (x,y) em uma nuvem de pontos em perspectiva no espaço tridimensional (X,Y,Z). Analisando as equações (10) e (11), observa-se que os *inputs* do método: a distância focal do equipamento de captura ( $\lambda$ ); vetor característico da posição da base do equipamento de captura em relação à origem do sistema de coordenadas global adotado ( $X_0, Y_0, Z_0$ ); vetor característico da posição do centro do plano de imagem em relação à posição da base do equipamento de captura ( $r_x, r_y, r_z$ ); *pan* ( $\theta$ ); *tilt* ( $\alpha$ ); e a nuvem de pontos a ser reconstruída dos diversos planos de imagem (x,y).

Tabela 3 - Resumo dos parâmetros de entrada do método de processamento de imagem.

<b>Input</b>	<b>Descrição</b>	<b>Natureza</b>
$\lambda$	Menor distância entre o plano de imagem e ponto de convergência das projeções pontuais do objeto.	Parâmetro fixo para todas as imagens capturadas.
$(X_0, Y_0, Z_0)$	Vetor com origem na origem do sistema de coordenadas global adotado e destino na base do equipamento de captura.	Parâmetro variável para cada imagem capturada
$(r_x, r_y, r_z)$	Vetor com origem na base do equipamento de captura e destino no centro do plano de imagem.	Parâmetro fixo para todas as imagens capturadas.
$\theta$	Desvio angular de alinhamento dos eixos horizontais do referencial da câmera e global.	Parâmetro variável para cada imagem capturada
$\alpha$	Desvio angular de alinhamento dos eixos verticais do referencial da câmera e global.	Parâmetro variável para cada imagem capturada
$(x,y)$	Coordenadas de pontos genéricos a serem	Parâmetro variável para

---

projetados em perspectiva no espaço 3D.

cada ponto da imagem capturada (imagem e plano de imagem)

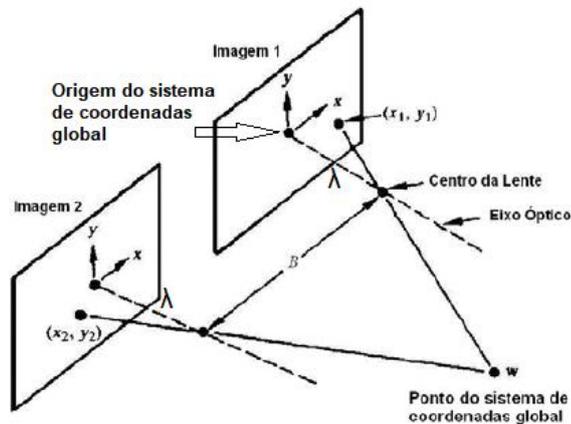
---

Os *outputs* do método, evidentemente, são as coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) dos pontos do objeto. Contudo, observa-se que o sistema de equações gerado pela equação matricial (9) é indefinido, com três incógnitas e duas dimensões. Ou seja, para obterem-se as três coordenadas desejadas, é necessário o conhecimento prévio, ao menos, uma dessas. Na seção posterior serão apresentados conceitos do campo da estereoscopia (*stereoscopic imaging techniques*) que auxiliam nesse processo.

### 3.1.2 Técnicas estereoscópicas para processamento de imagem

Para integralizar o método de processamento de imagem descrito, é necessária a realização de alguma extrapolação para obter-se o valor de uma das três coordenadas dos pontos a serem reconstituídos em perspectiva. Valença (2006), com auxílio do livro de Gonzales e Woods (2002), clarifica o preenchimento dessa lacuna a partir de técnicas básicas de estereoscopia. As técnicas estereoscópicas para processamento de imagem (*stereoscopic imaging techniques*) dizem respeito à obtenção de profundidade através de uma combinação de capturas. Os autores exemplificam o método através da adoção de um sistema de coordenadas global com origem no centro do plano de imagem de uma das duas capturas, coincidente ao sistema de coordenadas do plano de imagem 1 da figura 4.

Figura 4 - Modelo simplificado de aplicação para imagem estereográfica.



Fonte: Adaptado de Gonzales e Woods (2002).

$(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  correspondem à projeção do ponto 'w'  $(X, Y, Z)$  do espaço nos seus respectivos planos de imagem. A linha de base (B) é a distância entre os pontos focais das duas situações de captura. Através de manipulações geométricas, é possível obter-se algumas formulações para as coordenadas que faz referência à profundidade (Z) do ponto 'w', uma delas pode ser visualizada na equação (12).

$$Z = \lambda - \frac{\lambda * B}{x_1 - x_2} \quad (12)$$

Através da equação (12), preenche-se a lacuna da metodologia de projeção de perspectiva vista na seção 3.1.1. As coordenadas 'X' e 'Y' do ponto do objeto do domínio do espaço tridimensional podem ser obtidas pelas equações (3) e (4) em conjunto com o esquema de translação e rotação do sistema de coordenada global. A terceira coordenada é obtida pela composição de imagens, explicitada pela figura 4 e equação (12).

## 3.2 Conceitos da arquitetura naval

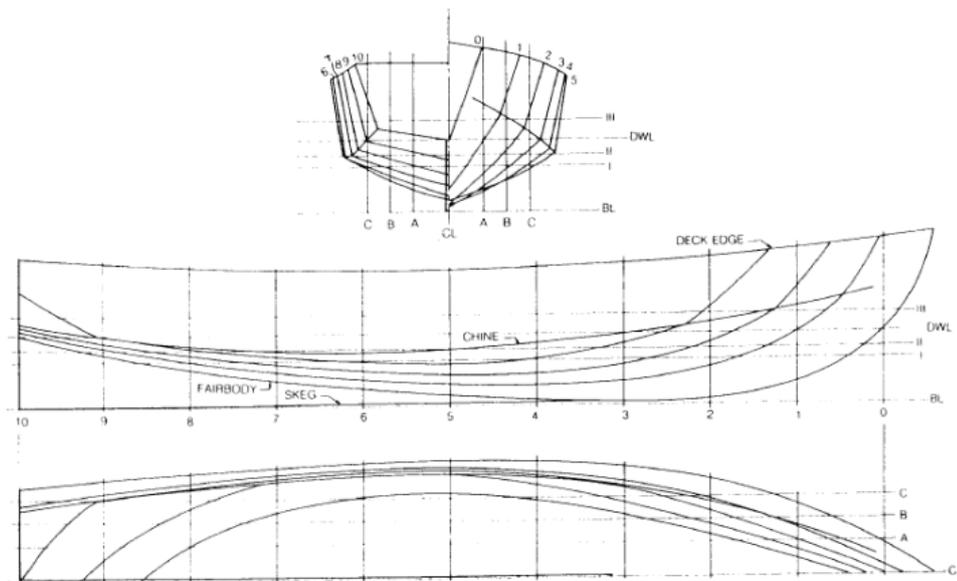
### 3.2.1 Plano de linhas

O desenho do plano de linhas de uma embarcação define completamente sua forma através de vistas de perfil, planta e transversal. É o alicerce básico para o projeto de forma de uma embarcação, o qual compõe a fase inicial do projeto básico, concebido após o término do projeto preliminar que, por sua vez, define o perfil operacional, classe, tipo, características e dimensões gerais da embarcação.

Existem diversas maneiras de se expressar um plano de linhas, através de informações geométricas detalhadas – ou não – da embarcação. O grau de detalhamento do desenho varia caso a caso a depender de muitas variáveis (e.g. finalidade, estágio do projeto, exigências contratuais, etc.). Há, porém, informações chaves indispensáveis nesse desenho:

- Contorno básico: linhas de borda, convés, quilha, *chines* (quinas), perfil do plano diametral, linha de água.
- Cortes transversais e longitudinais verticais e horizontais: detalhamento da forma da embarcação através de diversas linhas que caracterizam a forma da embarcação para cada corte transversal (baliza), longitudinal vertical (linhas de alto) e longitudinal horizontal (linhas de água).

Figura 5 - Plano de linhas de um casco de semi-planeio



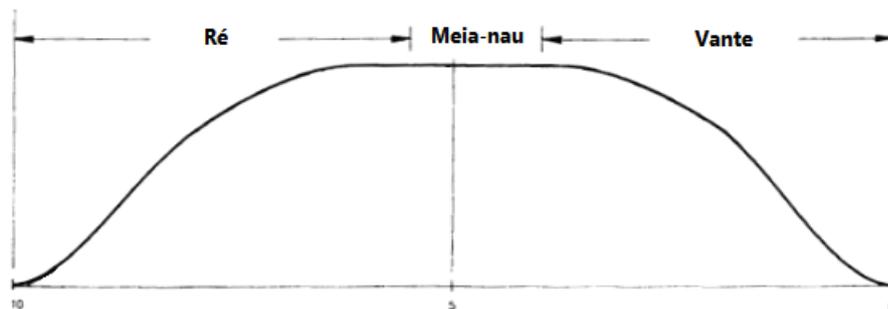
Fonte: SNAME (1988)

Normalmente, o plano de linhas está acompanhado de uma tabela de cotas que consiste na coordenada dos pontos proveniente do cruzamento entre as balizas e linhas de alto, bem como balizas e linhas de água.

### 3.2.2 Curva de área seccional

A curva de área seccional de uma embarcação diz respeito à área transversal ocupada pelas suas balizas, ao longo do seu comprimento, entre a linha de base e a linha de água de projeto. O gráfico tem tendência de crescimento até a seção mestra, com constância na região de corpo paralelo, para embarcações que tenham essa disposição, e decrescimento até a região da roda de proa.

Figura 6 - Curva de área seccional de uma embarcação genérica.



Fonte: Adaptado de SNAME (1988)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Dados da embarcação

O casco da embarcação a ser reconstituída computacionalmente em perspectiva a partir do método explicitado na seção 4.2, com auxílio de técnicas de fotogrametria, compõe o modelo do segmento Alfa do estaleiro Ecomariner, a lancha Alfa 300 de 32 pés.

A Alfa 300 está enquadrada na categoria de embarcação de esporte e lazer. As linhas do casco dessa lancha fornecem à mesma um caráter de barco de planeio, com fundo predominantemente plano, com *chines* proeminentes com a finalidade de garantir maior estabilidade dinâmica direcional. O fundo plano é evidenciado pelas seções transversais da embarcação, onde as suas balizas não possuem arqueamento no trecho da quilha até o primeiro *chine*, que faz uma divisão sem curvatura, através de uma quina, para o costado. O casco possui uma forma em 'V' que se acentua na medida em que se aproxima da sua roda de proa, característica a qual propicia uma navegação eficiente em águas parcialmente abrigadas e/ou mar aberto.

O critério de escolha da embarcação foi pautado pelas dimensões da embarcação e possibilidade de acesso ao projeto *as-built* elaborado por um funcionário do estaleiro Ecomariner através de uma abordagem manual detalhada na seção 4.3. A acessibilidade desse projeto *as-built* teve fundamental importância no ato de conferência de viabilidade do método fotogramétrico no que diz respeito a seus procedimentos, esforços despendidos e eficiência métrica. As características gerais e representação fotográfica do casco da Alfa 300 podem ser verificadas na tabela 4 e figura 7, respectivamente.

Figura 7 - Porção frontal do casco da lancha Alfa 300.



Tabela 4 - Características e dimensões da lancha Ecomariner Alfa 300.

<b>Lancha Ecomariner Alfa 300</b>	
Comprimento total (LOA)	9,77 m
Boca (B)	2,35 m
Calado de projeto (T)	0,50 m
Pontal do casco (D)	1,10 m
Peso do casco	1800 kg

#### **4.2 Abordagem fotogramétrica para o *as-built***

A principal motivação para a formatação da metodologia descrita nessa seção para a elaboração de *as-built* de cascos utilizando imagens fotogramétricas de câmera digital está na tentativa de explorar o baixo custo agregado e a praticidade da técnica. Nesse sentido, o equipamento de captura de imagens escolhido para a realização das atividades foi a câmera digital de um celular.

É notório que atualmente existem, como explanado na seção 2.2 da revisão bibliográfica, equipamentos de captura de imagem profissionais muito avançados do ponto de vista tecnológico e que funcionam para a aplicação de técnicas fotogramétricas. A robustez associada a esses equipamentos potencializam o processo de reconstrução e minimizam as etapas de modelagem computacional. A densidade da nuvem de pontos gerada pelo processamento de imagens capturadas por essas câmeras pode chegar a ser tão grande que sua conversão direta em malhas triangulares pode gerar uma superfície fiel à realidade. Contudo, no intuito de explorar ao máximo a relação custo/benefício e o fator praticidade, foi escolhido um equipamento de captura de caráter amador.

As limitações técnicas da câmera digital de um celular de porte intermediário são evidentes. Após a etapa de processamento de imagem, era previsto, com posterior confirmação, a formação de uma nuvem de pontos com descontinuidades. Tendo isso em vista, foi necessário um manuseio cuidadoso da nuvem de pontos – metodologia retratada na seção 4.2.2 – para gerar superfícies que condizem com a realidade. A prerrogativa da aplicação da metodologia proposta foi conferir até que

ponto o uso do equipamento amador é viável com o intento de aplicação da fotogrametria para reconstruções computacionais em perspectiva de cascos de embarcações.

#### 4.2.1 Dados da câmera digital

Os atributos e características do equipamento evidenciados como mais significativos para o *software Agisoft PhotoScan*, utilizado para o processamento das imagens capturadas, é a resolução, a distância focal e o sensibilidade à luz (AGISOFT LLC, 2018).

- Resolução: A qualidade de um equipamento de captura está relacionada diretamente à sua resolução. Essa característica faz referência à densidade de *pixels* presentes numa foto. Ou seja, tomando como referência um tamanho fixo para a fotografia, quanto maior a resolução, maior o grau de detalhe e qualidade da captura. A resolução de uma câmera é representada pela quantidade de pixels verticais e horizontais e a sua multiplicação representa a quantidade de pixels totais.
- Distância focal: menor distância entre o plano de imagem e ponto de convergência das projeções pontuais do objeto.
- Sensibilidade à luz: não diz respeito diretamente a um atributo da câmera (cada câmera tem um intervalo de sensibilidade), mas sim ao grau de sensibilidade da foto tirada para determinado ambiente (exposição à luz). Medida numa escala contida na norma do órgão *International Organization for Standardization (ISO) 1232*. De maneira ampla, é recomendável, em capturas não profissionais, a minimização da sensibilidade à luz (ISO). Apesar de aumento de performance em termos de iluminação, o aumento do ISO trás consigo perdas em nitidez, aumento de ruídos e diminuição da palheta de cores.

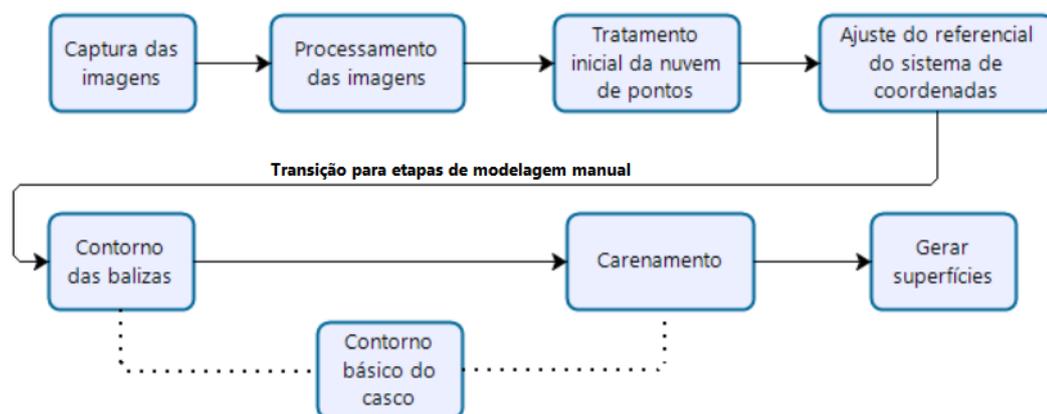
A tabela 5 contém os três parâmetros para a câmera utilizada (câmera traseira do celular iPhone SE), reconhecidas automaticamente pelo *software* após o processamento das imagens.

Tabela 5 - Especificações da câmera traseira do iPhone SE

<b>Câmera traseira do iPhone SE</b>	
Resolução	4032x3024 (12,1 megapixels)
Distância focal	4,15 mm
Sensibilidade à luz (ISO)	25

#### 4.2.2 Procedimento utilizado na abordagem fotogramétrica para o *as-built*

A reconstrução computacional do casco da lancha Alfa 300 foi repartida em operações para a concepção de um procedimento – padronização de atividades – para fins de análise comportamental em termos de produtividade. O procedimento foi composto por atividades práticas de cunho objetivo que, juntas, integram a macro atividade de elaboração do projeto *as-built* através de técnicas de fotogrametria com a abordagem proposta.

Figura 8 - Procedimentos para elaboração do *as-built* através da fotogrametria.

O primeiro nível do fluxograma de atividades que representa visualmente a metodologia proposta, ilustrado na figura 8, incorporam operações com vieses de

obtenção de dados, processamento e *setups*. Essa etapa da metodologia é rígida, sendo composta por atividades necessárias e imprescindíveis na ordem descrita.

As etapas de modelagem manual, segundo nível do fluxograma, são mais flexíveis do ponto de vista do grau de detalhamento e disposição. Os parâmetros (e.g. quantidade e densidade das linhas, balizas, pontos de controle, etc.) associados a essa fase dependem de escolhas do projetista. Apesar de carregarem consigo um teor subjetivo, as operações dessas etapas devem ser otimizadas do ponto de vista do tempo e esforço despendido, com o incremento mínimo de detalhes que convém para reprodução fiel da realidade das superfícies do casco. A tomada de decisão para a escolha da ordem das atividades e o controle dos parâmetros dessas etapas do procedimento proposto foi pautada pelo pressuposto de equilíbrio entre a representação realística das superfícies do casco e os recursos de tempo/esforço despendido nas operações.

O procedimento, com maior grau de detalhamento no que se refere a delineamentos e aplicação, está descrito a seguir com a enumeração das atividades de 1) a 7) do fluxograma de atividades ilustrado na figura 8.

### **1) Captura das imagens:**

O planejamento e execução do ato de registro das fotos foram fundamentados nas recomendações comuns a todos os *softwares* de processamento de imagem que trabalham com alicerce nos princípios de triangulação fotogramétrica e projeção de pontos. As premissas chaves para uma captura eficiente de imagem para uso em *softwares* desse âmbito seguem abaixo (AGISOFT LLC, 2018):

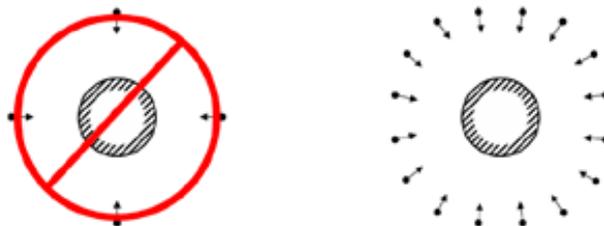
- a) Número de fotos: precisão proporcional à quantidade de capturas, tendo como agente limitante a capacidade de processamento da máquina que comporta o *software* e levando em conta a não congruência de imagens. Fotos iguais não incrementam a precisão;
- b) Minimização dos pontos cegos. É aconselhável ângulos de captura que enquadre ao máximo o objeto, reduzindo ao máximo a existência de pontos não visíveis. Um parâmetro base é o enquadramento de, pelo menos, 60% do objeto a ser reconstruído, com preferência para o enquadramento total, vide a figura 9;

- c) Em caso de aerofotogrametria ou fotogrametria de fachadas (ambos não aplicáveis para a finalidade da presente metodologia), é recomendável a sobreposição de imagem de 70% a cada captura. Em caso de aplicação para fotogrametria de curto alcance, variação de ângulo de captura livre, sem necessidade de sobreposição, seguindo às demais recomendações;
- d) O objeto de interesse deve ocupar a área máxima das capturas;
- e) Resolução e tamanho único para todas as capturas.

Com base nas recomendações, para a aplicação do método de fotogrametria, foi definida uma variação angular de 3 (três) graus a cada posição de captura em torno da embarcação, sendo realizadas em 2 (dois) níveis: um perto do solo, com inclinação vertical para cima, vide exemplo da figura 10; e um na altura da embarcação, sem inclinação vertical, vide exemplo da figura 11. Foi estimado um número em torno de 120 (cento e vinte) capturas tendo em vista a necessidade de reconstrução de apenas um lado do plano diametral do casco da embarcação, com espelhamento posterior. Vale ressaltar que a técnica de fotogrametria, por natureza, não é muito restrita e engessada. Com aderência às recomendações gerais, são desnecessárias as definições objetivas no que se refere à posição e quantidade das fotos. Porém, essas informações são importantes no sentido de não escapar da subjetividade, através de organização e direcionamento para o procedimento, abrindo espaço para medições de tempo e esforço despendido.

A fixação da angulação e nível entre capturas foi fixada, em linhas gerais, com efeito, apenas, de estimar o número de fotos e direcionar o procedimento.

Figura 9 - Exemplo de captura de imagens de objetos para aplicação da fotogrametria.



Fonte: Agisoft LLC (2018)

Figura 10 - Fotografia capturada no nível médio da embarcação.



Figura 11 - Fotografia capturada perto do solo.



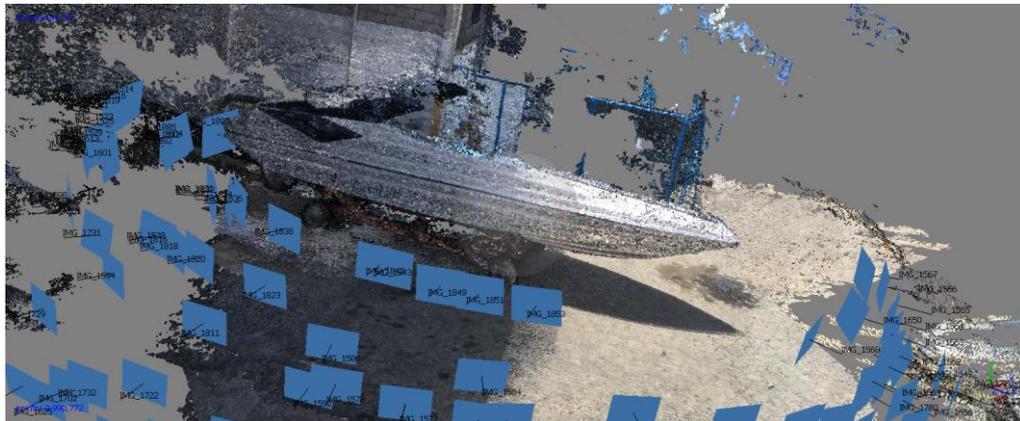
## 2) Processamento das imagens:

O processamento das imagens foi realizado através de um software para reconstrução de ambientes e objetos destinado à aplicação da técnica da

fotogrametria, o *Agisoft PhotoScan*. A base de funcionamento do *software* gira em torno dos princípios de projeção de pontos e a triangulação fotogramétrica (*stereoscopic imaging techniques*), expostos nas seções 3.1.1 e 3.1.2. A partir desses princípios, o processamento das imagens é dividido em duas etapas, com o intuito de não sobrecarregar o processador da máquina – computador no qual será feito o processamento –, que acontecem de forma subsequente: posicionamento/alinhamento das capturas; e construção da nuvem de pontos. O *software* oferece a opção de gerar malha triangulares a partir da nuvem de pontos. Porém, esse procedimento somente é aplicável para nuvem de pontos densa e detalhada, o que não condiz com a realidade da metodologia proposta, levando em conta os agentes limitantes inerentes à ferramenta de captura em utilização.

A figura 12 ilustra o *layout* do *Agisoft PhotoScan*, após o processamento das imagens retiradas para a modelagem do casco da Alfa 300. Cada retângulo azul representa as capturas alinhadas e posicionadas. A nuvem de pontos obtida para o estudo em questão, que incorporou 3.990.772 pontos sem o tratamento preliminar, englobou muitos elementos além do objeto de interesse.

Figura 12 - Nuvem de pontos e posicionamento das capturas.

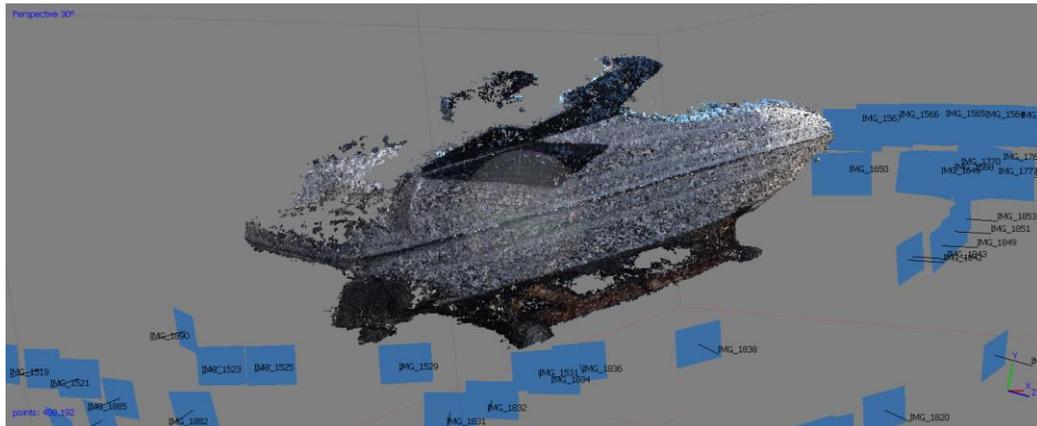


### 3) Tratamento inicial da nuvem de pontos:

Quando se tratando de fotogrametria de curto alcance, a maior parte da parcela dos pontos da nuvem de pontos gerada inicialmente não compõe o objeto de interesse. A exclusão de tais pontos impacta diretamente no fluxo de trabalho da modelagem computacional, facilitando na visualização e incrementando a produtividade.

No processamento das imagens para a reconstrução do casco da Alfa 300, a nuvem de pontos, após o tratamento, deteve apenas 408.192 pontos dos 3.990.772 iniciais. Isso quer dizer uma redução de 90% do volume de informação no fluxo de trabalho (*workflow*). A figura 13 ilustra essa redução do volume de informações para o exemplo do estudo de reconstrução computacional do casco da Alfa 300.

Figura 13 - Nuvem de pontos tratada em caráter preliminar.



#### 4) Ajuste do referencial do sistema de coordenadas:

O projeto de forma de quaisquer embarcações é representado por meio de um plano de linhas que incorpora as vistas de perfil, planta e transversal. Para a manipulação do modelo nessas três vistas de maneira simultânea no *software* de modelagem, faz-se necessário o alinhamento rigoroso com base nos três eixos do espaço tridimensional. Em termos práticos, essa operação está relacionada com a identificação do plano diametral de simetria da embarcação, plano de flutuação (plano de base sem desvios de trim e banda) e plano transversal da embarcação.

#### 5) Contorno das balizas e contorno básico do casco:

A partir da nuvem de pontos obtida pelo processamento das imagens é possível elaborar contornos que representam as linhas da superfície do casco. O caminho menos complexo para trabalho em perspectiva (3D) é o desmembramento do delineamento em planos bidimensionais. No âmbito de projeto de cascos de embarcações, é recomendável, para um maior grau de detalhamento, que o

*workflow* seja focado no plano transversal. Nesse sentido, a modelagem consiste na elaboração do contorno da quantidade mínima de balizas possíveis para caracterização realística da superfície, de acordo com a intensidade de variação da sua curvatura. O contorno básico do casco (e.g. linhas de borda, convés, quilha, *chines*, perfil do plano diametral) torna-se uma consequência do formato das balizas modeladas.

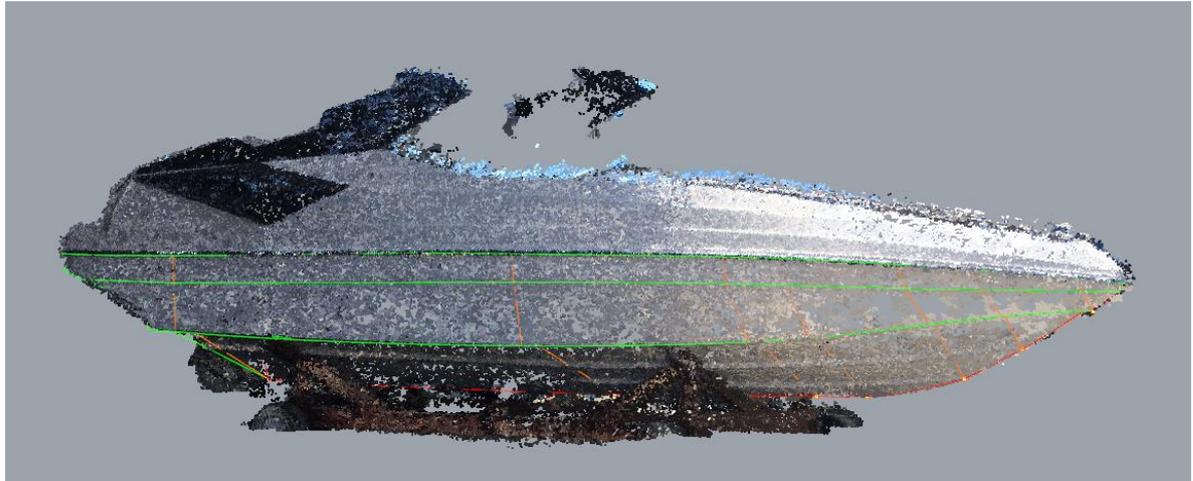
No caso da modelagem do casco da Alfa 300 foi necessária uma atenção redobrada nos detalhes da popa e *chines*, tendo em vista as discontinuidades da nuvem de pontos obtida, em decorrência de uma das prerrogativas da metodologia proposta que é o uso de ferramenta de captura não profissional. A figura 14 ilustra a diminuição de densidade de pontos da nuvem de pontos na região da popa da embarcação, região que foi impactada pelas características geométricas da região que gerou sombras e pontos cegos.

O Cumprimento dessa etapa do procedimento, no estudo em questão, foi feito através do *software Rhinoceros*. Na figura 15 podem ser vistos os contornos do casco, alicerce para a geração das superfícies, antes da etapa de carenamento.

Figura 14 - Diminuição da densidade da nuvem de pontos na região da popa.



Figura 15 - Contornos do casco da Alfa 300.



## 6) Carenamento:

O carenamento é o ato de remoção das inflexões das linhas do casco. A ferramenta de curvas utilizada pelos *softwares* de modelagem é fundamentada em funções matemáticas polinomiais. Na formação das linhas do casco, principalmente as mais longas e arqueadas, a complexidade dessas curvas, no que diz respeito à quantidade de pontos controle, podem gerar pequenas inflexões que, normalmente, são identificáveis apenas mediante ampliação de imagem. Mesmo que na ordem dos milímetros, essas inflexões podem dar origem a superfícies defeituosas.

A operação de carenamento pode ser efetuada diretamente nas superfícies depois de geradas. Contudo, o número de variáveis que envolvem o controle de superfícies é maior comparado a curvas.

## 7) Gerar superfícies:

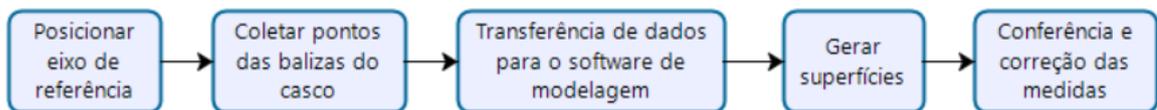
As superfícies do casco são geradas diretamente das linhas que o compõem. É recomendável a separação da superfície total do casco em setores de forma a diminuir a complexidade das mesmas. Porém essa forma de modelagem pode variar caso a caso, a depender das limitações e complexidade das linhas do casco.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Procedimento utilizado na abordagem manual para o *as-built*

O confronto de informações para fins de verificação da eficiência métrica e procedimental do método proposto foi feito tendo como alicerce uma modelagem computacional gerada a partir de uma abordagem manual para o *as-built* realizada por um ex-funcionário do estaleiro construtor da embarcação objeto do estudo. A figura 16 ilustra o conjunto de operações que compõe o projeto *as-built* de cascos de embarcações descrito por Barbosa (2018).

Figura 16 - Procedimento utilizado na abordagem manual para o *as-built*.



Fonte: Adaptado de Barbosa (2018).

As operações que compõem essa metodologia manual proposto tem natureza semelhante ao método com base fotogramétrica detalhado na seção 4.2.2: Coleta de dados, processamento e pós-processamento/modelagem. A diferença se encontra na forma de execução da coleta de dados e processamento, que é composto por processos manuais em sua totalidade. A coleta de pontos é efetuada de maneira seletiva. Dessa forma, pode-se suprimir a atividade que envolve o desenho do contorno do casco. A última atividade surge pela necessidade de suprir uma deficiência inerente a processos com vieses predominantemente manuais, na tentativa de ajustes para as incongruências decorrentes de erros sistemáticos.

### 5.2 Comparação: procedimentos

A verificação da viabilidade, do ponto de vista de eficiência procedimental, do método para elaboração de *as-built* de cascos de embarcações de cunho fotogramétrico proposto foi feita através de um paralelo com uma abordagem tradicional que possui processos manuais em sua totalidade. As tabelas 6 e 7 fazem

uma síntese do esforço despendido na abordagem manual e fotogramétrica, respectivamente, para o *as-built* do casco da embarcação em estudo.

Os tempos relativos às atividades do *as-built* tradicional foram baseados nos tempos esperados para as atividades do estudo de Barbosa (2018). Os tempos relativos às atividades do *as-built* fotogramétrico tem cunho determinístico, ou seja, estimados com base na experiência e domínio dos procedimentos que compõem o método. Nesse contexto, essa estimativa determinística foi fundamentada, além da simples apuração do tempo gasto para o cumprimento das atividades inicialmente, em alguns aspectos: conhecimento mínimo para as ferramentas intermediárias dos *softwares*; curva de aprendizado conservadora; e capacidade de processamento intermediário para o computador.

Tabela 6 - Tempos e recursos na abordagem tradicional para o *as-built*.

<b>Operação</b>	<b>Recurso (pessoal)</b>	<b>Tempo (minutos)</b>
Posicionar eixo de referência	2	25
Coletar pontos das balizas do casco	2	305
Transferência de dados para o software de modelagem	2	45
Gerar superfícies	1	60
Conferência e correção das medidas	2	90

Fonte: Barbosa (2018)

Tabela 7 - Tempos e recursos na abordagem fotogramétrica para o *as-built*.

<b>Operação</b>	<b>Recurso (pessoal)</b>	<b>Tempo (minutos)</b>
Captura das imagens	1	15
Processamento das imagens	1	10
Tratamento inicial da nuvem de pontos	1	10
Ajuste do referencial do sistema de coordenadas	1	20
Contorno das balizas + contorno básico do casco	1	240
Carenamento	1	30
Gerar superfícies	1	60

Na abordagem tradicional, o esforço despendido está concentrado na parte de coleta dos dados. Isso acontece pelo caráter manual dessas etapas da metodologia, que as transforma em atividades minuciosas e delicadas. Essa característica carrega consigo uma necessidade de seletividade nas operações, para diminuição de desperdícios. A seletividade, que em termos práticos significa a coleta mínima necessária de dados (pontos) para representação dos contornos do casco, torna a fase de pós-processamento/modelagem mais simples.

A abordagem fotogramétrica funciona respeitando a lógica inversa. A parte de coleta de dados (captura de imagens) é veloz, porém não há filtragem de informações. A meticulosidade nas operações é transferida para a etapa de pós-processamento/modelagem, onde é exigido um manuseio cuidadoso da nuvem de pontos para gerar contornos do casco fieis à realidade.

Os recursos a serem alocados para realização das atividades que compõem a abordagem tradicional é, em geral, maior quando comparado à abordagem fotogramétrica. A parte de coleta de dados da primeira é composta por operações que tem sua força motriz de natureza diretamente proporcional ao esforço físico dos colaboradores (recursos).

A figura 17 representa um gráfico comparativo entre as duas abordagens por meio dos tempos das macro etapas de coleta de dados, processamento e pós-processamento/modelagem e pós-modelagem.

Figura 17 - Gráfico comparativo de tempo (minutos) entre as metodologias.

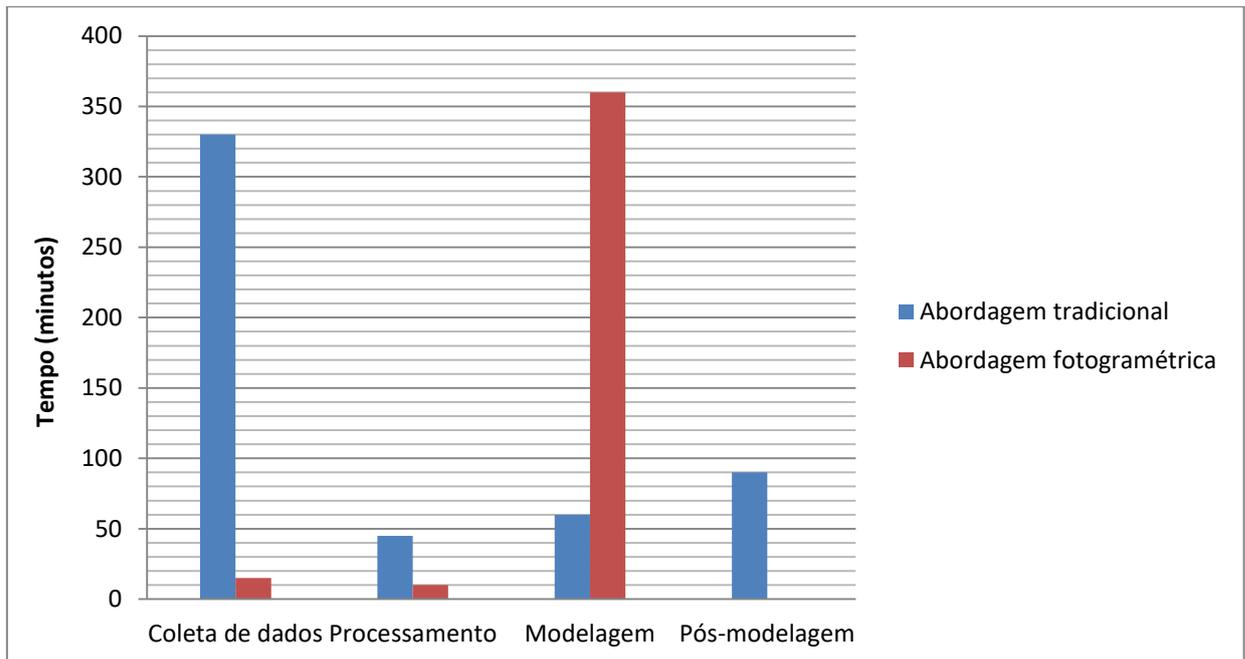


Tabela 8 - Legenda das macro atividades.

Macro atividade	Abordagem manual	Abordagem fotogramétrica
Coleta de dados	Posicionar eixo de referência; coletar pontos das balizas do casco.	Captura das imagens.
Processamento	Transferência de dados para o software de modelagem.	Processamento das imagens
Modelagem	Gerar superfícies	Tratamento inicial da nuvem de pontos; ajuste do referencial; contornos; carenamento; gerar superfícies.
Pós-modelagem	Conferência e correção das medidas	-

### 5.3 Comparação: precisão métrica

As informações acerca dos desvios métricos da modelagem computacional reversa por intermédio da abordagem fotogramétrica foi obtido também via

comparação direta com os dados gerados a partir da modelagem por meio da abordagem tradicional. Com o auxílio de ambos os modelos tridimensionais e o *software Maxsurf*, foram elaborados os planos de linhas do casco para ambas as situações (VER ANEXO A E ANEXO B). Com base nas tabelas de cotas e curvas de área seccional, os quais são consequência direta das características geométricas do casco, foram gerados dados quantitativos para fins comparativos.

A tabela de cotas, que faz a representação numérica do plano de linhas (pontos decorrente do cruzamento entre as balizas e os demais cortes), foi formatada de maneira uniforme para ambos os modelos de casco, com espaçamentos padrões entre os cortes longitudinais verticais (linhas de alto), longitudinais horizontais (linhas de água) e transversais (balizas). Dessa maneira, obtiveram-se desvios verticais para os pontos derivados de cruzamentos entre balizas e linhas de alto e desvios horizontais para pontos derivados de cruzamentos entre balizas e linhas de água.

A tabela 9 e tabela 10 representam as tabelas de cotas geradas a partir do plano de linhas obtido pelo *as-built* com auxílio da metodologia tradicional e fotogramétrica, respectivamente. A tabela 11 ilustra os desvios para os pontos equivalentes das duas tabelas. Esses desvios expõem quantitativamente a discrepância, em termos de precisão métrica, entre as duas abordagens de reconstrução computacional. Foram incluídas as médias dos desvios verticais para cada linha de alto e desvios horizontais para cada linha de água, com o intuito de visualização gráfica dessas variações.

A figura 18 ilustra um gráfico das médias dos desvios verticais para os pontos de cruzamento entre balizas e linhas de alto. A figura 19 ilustra um gráfico das médias dos desvios horizontais para os pontos de cruzamento entre balizas e linhas de água. Observa-se um comportamento de estagnação nos desvios, tanto vertical (cruzamento entre balizas e linhas de alto) quanto horizontal (cruzamento entre balizas e linhas de água), na região entre o plano diametral, um plano longitudinal vertical tangente ao *chine* principal do casco, um plano longitudinal horizontal tangente ao *chine* principal do casco e o plano da linha de base. Ou seja, em termos práticos, até a linha de alto 'C' e linha de água 'II' os desvios são reduzidos. As maiores magnitudes para os desvios estão concentrados nas regiões entre o *chine* principal,

chine intermediário e bordas do convés, o que é deixado em evidência pela tendência de crescimento de ambos os gráficos nos setores mencionados.

Tabela 9 - Tabela de cotas, em metros, para o casco obtido pela abordagem tradicional.

Baliza (Sta.)	Linha de alto (Butt.) ; Height (Z)					Linha de água (W.L) ; Offset (Y)			
	L.C (Y=0,000)	A (Y=0,235)	B (Y=0,470)	C (Y=0,705)	D (Y=0,940)	I (Z=0,180)	II (Z=0,360)	III (Z=0,540)	IV (Z=0,720)
1 (X=1,954)	0,037	0,133	0,232	0,329	0,430	0,347	0,777	1,157	1,164
2 (X=2,931)	0,033	0,127	0,226	0,322	0,420	0,362	0,796	1,161	1,176
3 (X=3,908)	0,024	0,121	0,226	0,326	0,427	0,368	0,784	1,138	1,168
4 (X=4,885)	0,010	0,119	0,228	0,336	0,444	0,366	0,752	1,087	1,137
5 (X=5,862)	0,000	0,130	0,248	0,384	0,464	0,334	0,667	0,979	1,052
6 (X=6,839)	0,030	0,187	0,329	0,509	0,830	0,224	0,509	0,788	0,882
7 (X=7,816)	0,145	0,369	0,581	0,845	~	0,029	0,224	0,426	0,619
8 (X=8,793)	0,491	0,721	0,998	~	~	~	~	0,044	0,234

Tabela 10 - Tabela de cotas, em metros, para o casco obtido pela abordagem fotogramétrica.

Baliza (Sta.)	Linha de alto (Butt.) ; Height (Z)					Linha de água (W.L) ; Offset (Y)			
	L.C (Y=0,000)	A (Y=0,235)	B (Y=0,470)	C (Y=0,705)	D (Y=0,940)	I (Z=0,180)	II (Z=0,360)	III (Z=0,540)	IV (Z=0,720)
1 (X=1,954)	0,000	0,106	0,211	0,317	0,393	0,400	0,801	1,085	1,096
2 (X=2,931)	0,000	0,102	0,204	0,305	0,383	0,415	0,831	1,101	1,116
3 (X=3,908)	0,000	0,104	0,209	0,313	0,386	0,405	0,812	1,086	1,111
4 (X=4,885)	0,007	0,118	0,230	0,341	0,402	0,365	0,744	1,039	1,085
5 (X=5,862)	0,023	0,149	0,276	0,402	0,533	0,292	0,627	0,943	1,019
6 (X=6,839)	0,043	0,207	0,371	0,482	0,853	0,196	0,454	0,760	0,864
7 (X=7,816)	0,145	0,386	0,591	0,888	~	0,034	0,210	0,385	0,582
8 (X=8,793)	0,497	0,759	1,036	~	~	~	~	0,031	0,198

Tabela 11 - Desvios, em metros, dos pontos equivalentes entre as duas tabelas de cotas.

Baliza (Sta.)	Linha de alto (Butt.) ; Height (Z)					Linha de água (W.L) ; Offset (Y)			
	L.C (Y=0,000)	A (Y=0,235)	B (Y=0,470)	C (Y=0,705)	D (Y=0,940)	I (Z=0,180)	II (Z=0,360)	III (Z=0,540)	IV (Z=0,720)
1 (X=1,954)	0,037	0,027	0,021	0,012	0,037	0,053	0,024	0,072	0,068
2 (X=2,931)	0,033	0,025	0,022	0,017	0,037	0,053	0,035	0,060	0,060
3 (X=3,908)	0,024	0,017	0,017	0,013	0,041	0,037	0,028	0,052	0,057
4 (X=4,885)	0,003	0,001	0,002	0,005	0,042	0,001	0,008	0,048	0,052
5 (X=5,862)	0,023	0,019	0,028	0,018	0,069	0,042	0,040	0,036	0,033
6 (X=6,839)	0,013	0,020	0,042	0,027	0,023	0,028	0,055	0,028	0,018
7 (X=7,816)	0,000	0,017	0,010	0,043	~	0,005	0,014	0,041	0,037
8 (X=8,793)	0,006	0,038	0,038	~	~	~	~	0,013	0,036
Media	0,017	0,021	0,023	0,019	0,042	0,031	0,029	0,044	0,045

Figura 18 - Média dos desvios verticais dos pontos de cruzamento entre linhas de alto e balizas.

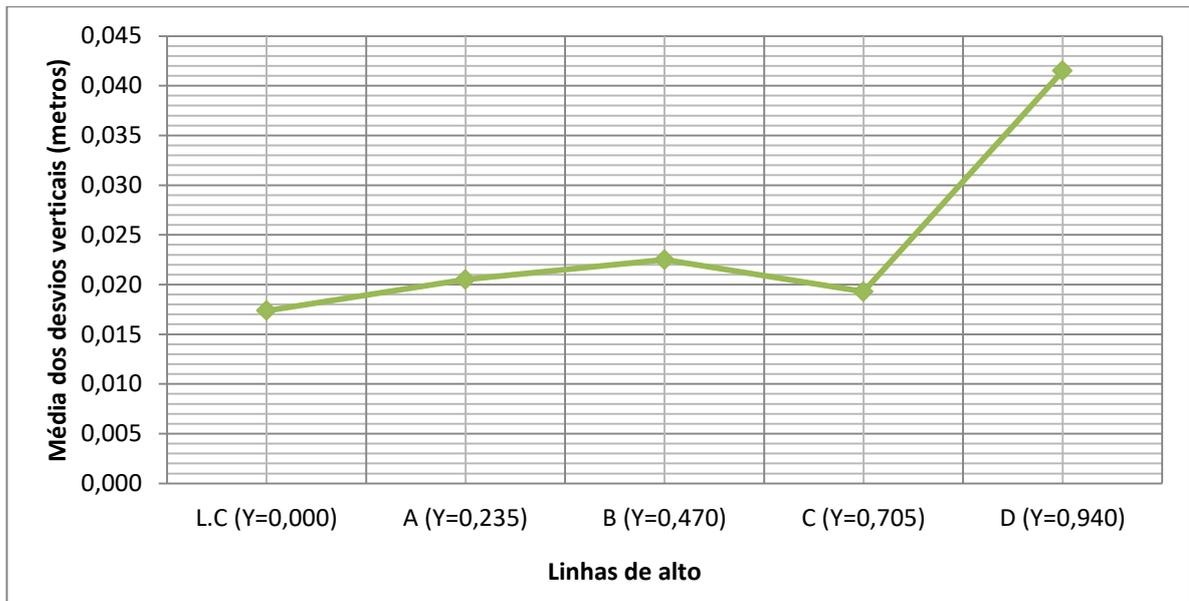
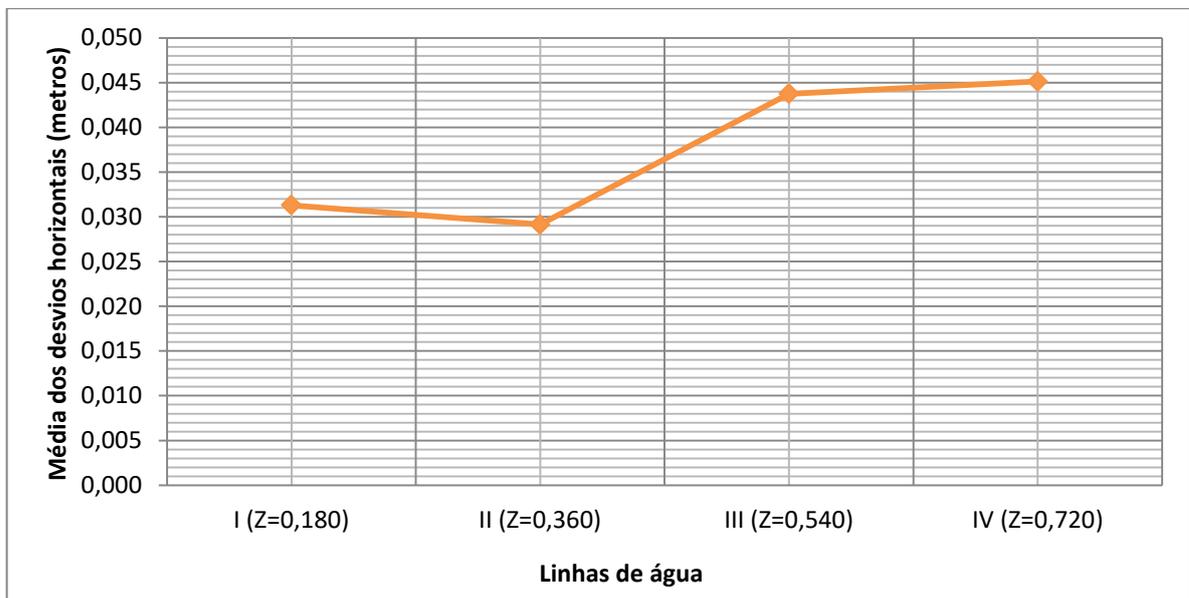


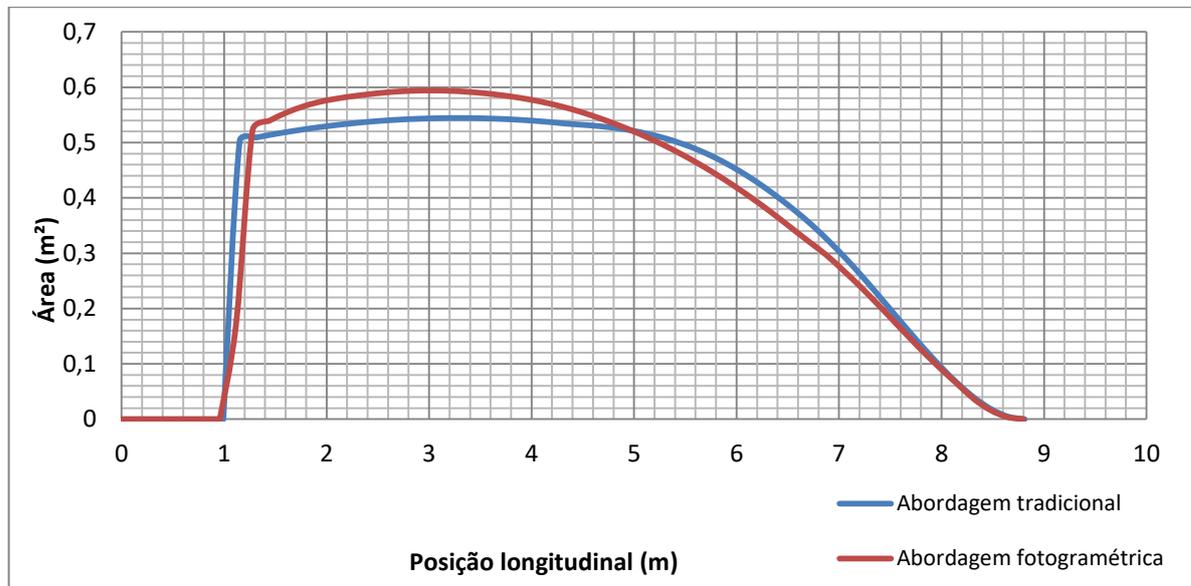
Figura 19 - Média dos desvios horizontais dos pontos de cruzamento entre linhas de água e balizas.



As curvas de área seccional, figura 20, auxiliam na visualização, ao longo do comprimento do casco, dos desvios mostrados acima para ambas as abordagens de *as-built*. Evidentemente, que ambas as curvas possuem mesmo comportamento e tendências, tendo em vista que ambos os cascos possuem geometria semelhante. Em determinadas seções, porém, um casco é mais largo em comparação ao outro, o

que pode ser observado a partir da alternância das curvas em determinados pontos de referência longitudinal.

Figura 20 - Curvas de área seccional.



#### 5.4 Limitações da abordagem fotogramétrica para o *as-built*

A metodologia proposta para a aplicação da técnica da fotogrametria para reconstituição computacional de cascos possui algumas inconstâncias que merecem ser abordadas: a diminuição da densidade da nuvem de pontos em algumas regiões e o acúmulo de pontos aquém da tendência da nuvem em regiões de descontinuidade (quinas).

A redução da densidade da nuvem de pontos é consequência de características geométricas inerentes ao objeto a ser reconstruído. Em alguns casos, mesmo com a otimização das posições das capturas, irão sempre existir regiões insuficientemente retratadas nas fotos, os pontos cegos. Essa é uma inconstância difícil de ser solucionada tendo em vista que natureza geométrica do objeto em estudo é imutável. Apesar da impossibilidade de solução desse problema – incrementar a densidade da nuvem pontos –, ele pode ser contornado. No caso do casco da Alfa 300, a região do espelho de popa foi impactada por essa inconstância

inerente ao método. Contudo, de maneira analítica, foi possível examinar os pontos de interesse na região deficitária da nuvem, fazendo os contornos mínimos necessários para delimitar as superfícies.

A segunda inconstância mencionada impactou a modelagem da Alfa 300 na região dos seus *chines*. Nos dois *chines* superiores, os quais são intrínsecos à sua geometria, foi possível aplicar princípios analíticos para julgar os pontos de interesse em meio ao acúmulo de pontos fora da tendência da nuvem. Porém, não foi possível retratar os dois *chines* inferiores que se comportam como apêndices do casco, devido à sua pequena dimensão quando comparado ao casco.

Uma solução para a problemática da imprecisão da nuvem de pontos nas regiões de descontinuidade, apesar de ir de encontro ao propósito e motivação do presente estudo, é incrementar a capacidade da ferramenta de captura de imagem. Outra possibilidade seria a manipulação das fontes de incerteza (e.g. sombras, reflexo, textura da superfície do objeto a ser reconstruído, etc.).

Figura 21 - Modelo computacional do casco da Alfa 300 gerado por intermédio da fotogrametria.



## 6 CONCLUSÃO

A reconstituição computacional do casco da lancha Alfa 300 através da metodologia proposta para elaboração de *as-built* por intermédio de imagens capturadas por equipamento não profissional foi efetuada com precisão na ordem de grandeza dos centímetros ( $10^{-2}$  metros), trazendo como alicerce comparativo uma modelagem realizada por meio de uma abordagem tradicional. Tendo em vista que, no que tange a esfera da indústria náutica de pequeno porte, muitos construtores tem seu processo produtivo com viés artesanal e/ou modificam o projeto base por conta de adaptações construtivas, o grau de precisão do método proposto é aceitável do ponto de vista mercadológico.

O método proposto pode ser incrementado, sob ótica de precisão métrica, com alterações sutis, as quais não foram executadas por limitações impostas pelo estaleiro concedente da embarcação objeto de estudo. Questões que envolvem a manipulação das incertezas como o controle de sombras, escolhas de melhores posições para o casco (obter melhores ângulos de captura) e controle da textura (e.g. marcações nos pontos críticos de interesse) podem impactar diretamente na ordem de grandeza do grau de precisão. Esses ajustes também podem influenciar nas inconstâncias do método abordadas na seção 5.4 (diminuição da densidade da nuvem de pontos em algumas regiões e o acúmulo de pontos aquém da tendência da nuvem em regiões de descontinuidade).

Quando comparada com uma abordagem tradicional composta predominantemente por processos manuais, a abordagem fotogramétrica para projetos *as-built* possui algumas vantagens do ponto de vista procedimental. O método proposto exige o despendimento de metade dos recursos humanos e tem uma duração em torno de 75% do total gasto pelo método tradicional como alicerce comparativo. A etapa de coleta de dados é objetiva e o processamento das imagens automático, tornando a parte de modelagem a mais delicada dentre os demais procedimentos.

Em um extremo, existem métodos de elaboração de *as-built* tradicionais compostos por atividades razoavelmente complexas, manuais e pouco custosas. No outro, tecnologias baseadas no *laser scanning*, com o processamento direto das

informações geométricas do objeto de estudo em sua forma tridimensional, com equipamentos dispendiosos e necessidade de alta capacitação para manuseio. A fotogrametria enquadra-se de forma intermediária nos quesitos mencionados. O caráter funcional e prático da metodologia proposta – que usa a técnica de fotogrametria – abre espaço para diversas possibilidades, tendo em vista também o fator custo/benefício. Respeitando suas limitações, a aplicação da técnica impacta em redução de custos e esforços no ato da realização do *as-built*, bem como abre espaço para outras possibilidades, como a modelagem de embarcações com coleta de dados terceirizada.

### **6.1 Sugestões para estudos futuros**

Seguem algumas sugestões de temas para estudos futuros dentro do campo que engloba o presente trabalho:

- Reconstituição computacional do convés e arranjo interno de embarcações de pequeno porte;
- Análise do impacto de cada fonte de incerteza na precisão métrica final;
- Reconstituição computacional por região do objeto de interesse;
- Análise do incremento na precisão métrica, com dependência do aumento na capacidade do equipamento de captura de imagens.

## REFERÊNCIAS

AGISOFT LLC. **Agisoft PhotoScan User Manual**, 2018. Disponível em:  
<[www.agisoft.ru](http://www.agisoft.ru)>

America Society of Photogrammetry (ASP). *Manual of Photogrammetry*. **Falls Church, VA. Chester C.** 4.ed, 1980.

ARANDA-MENA, G.; CRAWFORD, J.; CHEVES, A.; FROESE, T. Building information modelling demystified : does it make business sense to adopt BIM ? **International Journal of Managing Projects in Business**, v. 2, n. 3, p. 419–433, 2009.

BARBOSA, E. G. J. Gestão de tempo e recursos no projeto de embarcações de esporte e recreio: metodologia proposta e exemplo de aplicação. **Centro de tecnologia e geociências da Universidade Federal de Pernambuco**, 2018.

CHEN, W.; CHEN, K.; CHENG, J.; WANG, Q.; GAN, V. Automation in Construction BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders. **Automation in Construction**, v. 91, n. August 2017, p. 15–30, 2018.

EL-OMARI, S.; MOSELHI, O. Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. **Automation in Construction**, v. 18, p. 1–9, 2008.

FADLI, F.; BARKI, H.; SHAAT, A.; MAHDJOURI, L.; BOGUSLAWSKI, P.; ZVEROVICH, V. *3D Capture Techniques for BIM Enabled LCM*. **International Federation for Information Processing (IFIP)**, AICT 467, pp. 183-192, 2016.

FU, K. S.; GONZALES, R. C.; LEE, C. S. . **Robotics: control, sensing, vision, and intelligence**. 1. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 1987.

GOLPARVAR-FARD, M.; BOHN, J.; TEIZER, J.; SAVARESE, S.; PEÑA-MORA, F. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. **Automation in Construction**, v. 20, n. 8, p. 1143–1155, 2011.

GOLPARVAR-FARD, M.; SAVARESE, S.; PEÑA-MORA, F. Integrated Sequential

As-Built and As-Planned Representation with D 4 AR Tools in Support of Decision-Making Tasks in the AEC / FM Industry. **Journal of Construction Engineering and Management**, n. December, p. 1099–1116, 2011.

GONZALES, R. C.; WOODS, E. W. **Digital image processing**. 2. ed. [s.l.] Prentice-Hall, Inc., 2002.

HAFEZZ, M. A.; CHAHROUR, R.; VUKOVIC, V.; DAWOOD, N; KASSEM, M. *Investigating the Potential of Delivering Employer Information Requirements in BIM Enabled Construction Projects in Qatar*. **International Federation for Information Processing (IFIP)**, AICT 467, pp. 159–172, 2016.

KLEIN, L.; LI, N.; BECERIK-GERBER, B. Automation in Construction Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings. **Automation in Construction**, v. 21, p. 161–171, 2012.

KÖNIG, M.; KOCH, C.; HABENICHT, I.; SPIECKERMANN, S. Intelligent bim-based construction scheduling using discrete event simulation. **Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference**, 2012.

LATIFFI, A.A.; BRAHIM, J.; FATHI, M. S. *Roles and Responsibilities of Construction Players in Projects Using Building Information Modeling (BIM)*. **International Federation for Information Processing (IFIP)**, AICT 467, pp. 173–182, 2016.

MARKLEY, J. D.; STUTZMAN, J. R.; HARRIS, E. N. Hybridization of Photogrammetry and Laser Scanning Technology for As-Built 3D CAD Models. **IEEEAC paper**, v. 1, 2008.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. *Introduction to Modern Photogrammetry*. **John Wiley & Sons**. Ed. 1, 2001.

RAN, L. **Transferring best practices enabled by Building information modeling ( BIM ) in Architecture, Engineering and Construction (AEC) to shipbuilding industry: An explorative study**. [s.l.] Aalto University, 2015.

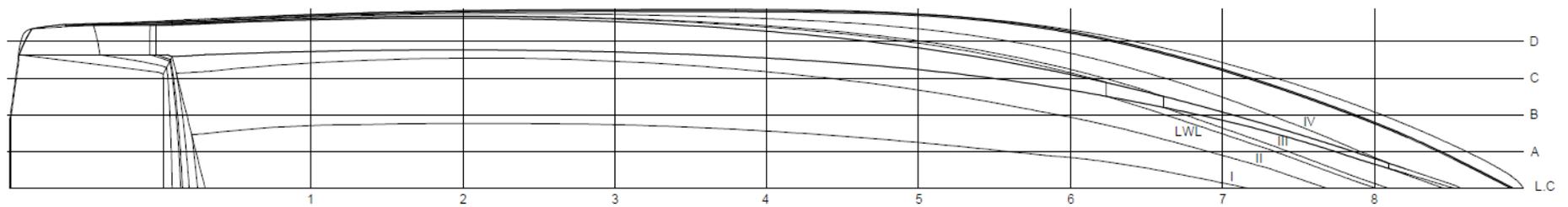
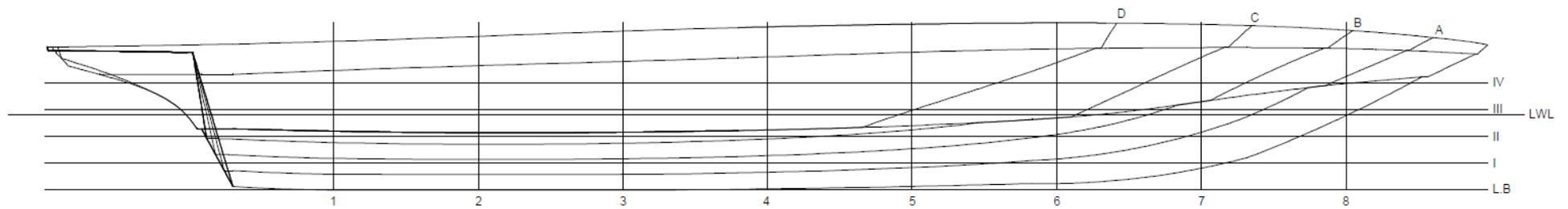
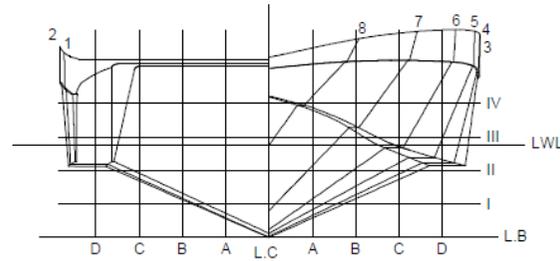
RAN, L.; SINGH, V. *Comparing BIM in Construction with 3D Modeling in Shipbuilding Industries: Is the Grass Greener on the Other Side?*. **International Federation for Information Processing (IFIP)**, AICT 467, pp. 193–202, 2016.

REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. Image-based 3D modelling : a review. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n. September, p. 269–291, 2006.

*The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). Principles of Naval Architecture. Library of Congress Catalog Card No. 88-60829 (USA). Ed. 2, 1988.*

VALENÇA, J. M. DE A. **Aplicações de Fotogrametria à Engenharia de Estruturas**. [s.l.] Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2006.

WONG, J.; YANG, J. Research and application of Building Information Modelling (BIM) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry : a review and direction for future research. **Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Architecture, Engineering & Construction (AEC)**, p. 356–365, 2010.

**ANEXO A: PLANO DE LINHAS DO CASCO DA ALFA 300 COM BASE NA MODELAGEM FOTOGRAFAMÉTRICA**

**ANEXO B: PLANO DE LINHAS DO CASCO DA ALFA 300 COM BASE NA MODELAGEM TRADICIONAL**