

FÁBIO VILLAS BOAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE
CAD APLICADA AO PROJETO DE HÉLICES PARA
VEÍCULOS AQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FÁBIO VILLAS BOAS

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE
CAD APLICADA AO PROJETO DE HÉLICES PARA
VEÍCULOS AQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr Ettore Apolônio de Barros

São Paulo
2006

A.S.N.F

“A Son Never Forget”

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr Ettore Apolônio de Barros ao tempo consumido à minha orientação, cuja amizade, persistência e confiança a mim dedicados, possibilitaram o término deste trabalho.

Ao professor Dr Cláudio Mueller Prado Sampaio, docente pertencente ao departamento de engenharia naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo auxílio fornecido durante e após o exame de qualificação.

Agradeço a todos os meus amigos, aqui representados por Daniel Verga Boeri e Daniel Martins, pelos momentos de apoio e contentamento que amenizaram esta longa jornada.

Também agradeço aos meus padrinhos, Dr Eduardo Sampaio Nardelli e Dra Stela Lachtermacher pelos conselhos, idéias e contribuição com o texto.

A minha avó Elza dos Reis Sampaio Nardelli, cujo exemplo de dedicação e garra, serviram e servem de inspiração para todas as situações adversas da vida.

Por fim, agradeço aos meus queridos pais que desde minha infância sempre me incentivaram e apoiaram tanto nas pequenas como nas grandes coisas e para a realização deste trabalho não foi diferente me deram todo o carinho, amor e exemplo, fundamentais para proporcionar as condições necessárias para a finalização desta e das demais etapas de minha vida. Por tais motivos hoje digo “- Lutei um bom combate”.

RESUMO

Este trabalho aborda o projeto de hélices navais auxiliado por computador, particularizando-os para a aplicação no sistema de propulsão de veículos autônomos de superfície (ASVs). São apresentadas as principais aplicações e características do casco demais sistemas que compõem os ASVs. Em seguida, trata-se da análise dos parâmetros principais que definem a geometria de um hélice naval. É proposta uma ferramenta numérica voltada à geração da superfície do hélice e do seu modelo sólido, a partir dos perfis transversais da pá, cuja distribuição radial é originada em dados de tabelas de séries sistemáticas. O trabalho é complementado por uma apresentação e análise dos métodos principais considerados para a manufatura auxiliada por computador de hélices que podem ser empregados tanto em ASVs como em outros veículos aquáticos não tripulados.

ABSTRACT

This work deals with the computer aided design of marine propellers applied to the propulsion system of autonomous surface crafts (ASVs). The main applications and component systems of ASVs are introduced. An analysis of the propeller main geometric parameters is performed, and a numerical tool is proposed for the surface and solid model generation using data provided by the propeller systematic series for the sectional profile radial description. Finally, it is presented the introduction and analysis of the computer aided manufacturing processes considered for the propulsion of ASVs and other unmanned aquatic vehicles.

Sumário

Capítulo 1 Introdução	1
1.1- Os ASVs	7
1.1.1- ASVs de monitoramento ambiental	9
1.1.2- ASVs para fins militares.....	16
1.1.3- Sistemas de apoio ao desenvolvimento de veículos aquáticos.....	19
1.1.4- Características comuns e Tendências.	22
1.2- Motivação.....	23
1.3- Objetivos da dissertação.....	25
1.4- Estrutura da Dissertação.....	26
Capítulo 2 Sistemas Característicos dos ASVs.....	27
2.1- Equipamentos Embarcados.	28
2.1.1- Equipamentos Comuns aos ASVs.....	29
2.1.1.1- Sistema de navegação.....	29
2.1.1.2- Sistemas de suprimento de energia	32
2.1.1.3- Sistema de comunicação	33
2.1.1.4- Sistema de Processamento Embarcado	34
2.2- Influência da Geometria do Casco.....	36
2.2.1- Análise Hidrostática.	37
2.2.2-Aspectos Hidrodinâmicos.	39
2.2.2.1- Resistência.....	40

2.2.2.2- Susceptibilidade ao impacto de ondas.....	45
--	----

Capítulo 3 Geometria do Hélice.....47

3.2 Parâmetros Geométricos do Hélice	50
3.2.1- Diâmetro.....	51
3.2.2- Passo (PITCH):	52
3.2.3- Deslocamento Axial (Rake)	54
3.2.4- Ângulo de Enviesamento (Skew).....	55
3.2.5- Número de pás.....	56
3.2.6- Área da pá.	57
3.2.7- Perfil da pá.....	59
3.3 Séries Sistemáticas	60
3.3.1 Família Kaplan.	61
3.3.2 Família B-Troost.....	64
3.4- Parametrização de curvas e superfícies.....	67

Capítulo 4 Ferramenta Numérica de Auxílio ao Projeto do Hélice.....71

4.1- Fases de Desenvolvimento	72
4.1.1- Estudo de uma ferramenta numérica de referência.	72
4.1.2- Ambiente CAD apropriado	74
4.1.3- O Uso do MatLab.....	77
4.1.4- Integração do MatLab com o ambiente CAD	78
4.2- Descrição e Operação da Ferramenta Numérica	79
4.2.1- Programa Principal.....	79

4.2.2- Função “Kaplan.m” e “B-Troost.m”	82
4.2.3- Função “Pitch.m”	82
4.2.4- Função “Corda.m”	83
4.2.5- Função “Thickness.m”	84
4.2.6- Função “Camber.m”	85
4.2.7- Função “Skew.m”	86
4.2.8- Função “Rake.m”	87
4.2.9- Função “Perfil.m”	88
4.2.10- Função “Rotacionar.m”	91
4.2.11- Função “Projetar.m”	92
4.2.12- Função “3dPoly.m”	94
4.3- Estudo de Casos.....	97
Capítulo 5 Conclusões & Trabalhos Futuros	108
Referência Bibliográfica	111
Apêndice I Processos de Manufatura	I
I.1- Prototipagem rápida	I
I.1.1- Estereolitografia	III
I.1.2- Manufatura de Objetos por Laminação (LOM).....	IV
I.1.3- Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	V
I.1.4- Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) VI	
I.1.5-Cura Sólida na Base (SGC)	VII
I.1.6- Modelagem Multi Jato (MJT).....	VIII
I.1.7- Conformação Próxima ao Formato Final via Laser	

(LENS)	IX
I.2- Usinagem por CNC	XI
I.2.1- Segmento maquinário.	XII
I.2.2- Segmento de instruções	XIX
I.3- Seleção do Processo.	XXII

Lista de Figuras

Figura 1.1- UGV “Sojourner” enviado ao planeta Marte.	4
Figura 1.2- UAV “Pathfinder”	4
Figura 1.3- UAV “Pioneer”	4
Figura 1.4- ROV Victor, com seu cordão umbilical.	5
Figura 1.5- AUV Infante, destinado a inspeção de oleo-dutos e cabos submarinos.	6
Figura 1.6- ASV “Delfim”	7
Figura 1.7- ASV Caravela.....	10
Figura 1.8- ASV Delfim.....	11
Figura 1.9- ASV Kan-Chan.....	12
Figura 1.10- ASV SESAMO.....	14
Figura 1.11- ASV AutoCat.....	15
Figura 1.12- ASV RiverBoat.....	16
Figura 1.13- ASV Protector.....	18
Figura 1.14- ASV SAIC.....	19
Figura 1.15- Projeto Comportamento em ondas de embarcações de alto desempenho.	21
Figura 1.16- Projeto desenvolvido pela empresa Sirehna.....	21
Figura 2.1- Bússola eletrônica TCM2.....	30

Figura 2.2- Receptor de GPS da NOVATEL, ProPackII.	31
Figura 2.3- IMU modelo VG 700 AA da Crossbow Technology.....	32
Figura 2.4- Equipamento de rede sem fio 9XTEND.....	34
Figura 2.5- PC 104 da empresa RDT USA.....	35
Figura 2.6- Relação entre a altura metacêntrica e a estabilidade.....	38
Figura 2.7- Altura metacêntrica dos catamarãs.....	39
Figura 2.8- Distribuição de velocidade na camada limite.....	42
Figura 2.9- Coeficiente de resistência segundo a forma do objeto.	43
Figura 2.10- Exemplo de SWATH.	46
Figura 3.1- Sistema de coordenadas cartesiano do hélice.....	48
Figura 3.2- Sistema de coordenadas cilíndrico do hélice.	49
Figura 3.3- Diâmetros do hélice.....	51
Figura 3.4- Definição de Passo	52
Figura 3.5- Ilustração do conceito trigonométrico da equação 3.1.....	53
Figura 3.6- Tipos de deslocamento axial.	54
Figura 3.7- Ilustração do ângulo de enviesamento.	55
Figura 3.8- Entidades que compõem um perfil aerodinâmico	60
Figura 4.1- Fluxograma de operação do programa principal.....	81
Figura 4.2- Algoritmo da função “Pitch.m”	83
Figura 4.3- Algoritmo da função “Corda.m”	84

Figura 4.4- Algoritmo da função “Thickness.m”.....	85
Figura 4.5- Algoritmo da função “Camber.m”.....	86
Figura 4.6- Algoritmo da Função “Skew.m”	87
Figura 4.7- Fluxograma da Função “Rake.m”	88
Figura 4.8- Fluxograma da função “Perfil.m”.	90
Figura 4.9- Fluxograma da função “Rotacionar.m”	92
Figura 4.10- Fluxograma da função “Projetar.m”.....	93
Figura 4.11- Fluxograma da função “3dPoly.m”	96
Figura 4.12- Comparação entre os bordos de fuga. a) Bordo de fuga aberto, gerado pela ferramenta do Garcia, b) Bordo de fuga fechado gerado pela ferramenta proposta pelo autor.	98
Figura 4.13- Deformação no sólido gerado utilizando os perfis provenientes da ferramenta numérica implementada por Garcia. Os círculos assinalam os pontos de maior deformação.....	99
Figura 4.14- Sólido gerado por meio ferramenta implementada pelo autor, visivelmente sem discrepâncias.....	100
Figura 4.15- Erro inerente ao excesso de perfis interpolados.	101
Figura 4.16- Após limitar a quantidade de perfis interpolados.	101
Figura 4.17- Modelos de hélices da família Kaplan; A) três pás e EAR de 0,65; B) quatro pás e EAR de 0,70.	102
Figura 4.18- Modelos de hélices da família Kaplan; A) seis pás e EAR de 0,75; B) sete pás e EAR de 0,80.	103
Figura 4.18- Erro na ponta da pá durante processo de obtenção do sólido da pá. A linha azul indica o contorno original da pá. ..	104

Figura 4.19- Erro na ponta da pá corrigido após recuo do ponto.	105
Figura 4.20- Modelo sólido do hélice B-Troost, obtido após todas as correções. Este modelo apresenta bosso cônico.	106
Figura 4.21- Montagem de conjunto do modelo sólido do hélice Kaplan e o Duto 19A, obtido após todas as correções.	107
Figura I.1- Ilustração do processo de estéreolitografia. (UCF, 2005). III	
Figura I.2- Ilustração do processo de LOM. (UCF, 2005).	V
Figura I.3- Ilustração do processo de SLS. (UCF, 2005).	VI
Figura I.4- Ilustração do processo de FDM. (UCF, 2005)	VII
Figura I.5- Ilustração do processo de SGC. (UCF, 2005).	VIII
Figura I.6- Ilustração do processo de MJT. (UCF, 2005)	IX
Figura I.7- Ilustração do processo de LENS. (UCF, 2005).	X
Figura I.8- Exemplo de fresa CNC de 5 eixos.	XIII
Figura I.9- Processo de usinagem de uma pá sem deslocamento axial. O ponto de tangencia	XIV
Figura I.10- Processo de usinagem de uma pá com deslocamento axial. O raio da ferramenta antecede o ponto de tangência entre ela e a superfície gerando um pequeno erro na peça.	XV
Figura I.11- Ampliação da região de tangência da ferramenta com a superfície da pá da apresentada na figura I.10.	XV
Figura I.12- Ilustração do erro gerado entre dois caminhos adjacentes da ferramenta.	XVII
Figura I.13- Simulação do processo de usinagem com máquina CNC de 3 eixos obtida utilizando o programa edgeCAM.	XXII

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Principais dimensões da TCM2.	30
Tabela 2.2- Dimensões do receptor de GPS, ProPackII.....	31
Tabela 2.3- Dimensões da IMU.	32
Tabela 2.4- Dimensões da Bateria.	33
Tabela 2.5- Dimensões do 9XTEND.	34
Tabela 2.6- Dimensões do PC 104.....	36
Tabela 3.1- Correlação entre os eixos dos sistemas de coordenadas do AutoCAD e o proposto pela ITTC.....	50
Tabela 3.2- Valores da série sistemática para a família Kaplan. (KUI-PPER, 1992)	62
Tabela 3.3- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de ataque.....	63
Tabela 3.4- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de fuga.	64
Tabela 3.5- Pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de ataque	64
Tabela 3.6- pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de fuga	64
Tabela 3.7- Valores da série sistemática para a família B-Troost. (KUI-PPER, 1992)	65
Tabela 3.8- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de ataque.....	66

Tabela 3.9- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de fuga.....	66
Tabela 3.10- Pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de ataque.....	66
Tabela 3.11- pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de fuga	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

Ad.....	developed blade area
AE	área expandida
AO.....	área do disco
Ap.....	área projetada
ASV.....	Autonomous Surface Vessel
AUV.....	Autonomous Underwater Vehicles
CAD.....	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAN	Controller Area Network
CCD	Charge Coupled Device
CNC	Computer Numeric Control
CPU.....	Central Processing Unit
DGPS	Differential Global Position System
DLL.....	Dynamic Link Library
DSORlab.....	Laboratório de Sistemas Dinâmicos e Robôs Oceânicos
DSP	Digital Signal Processing

DXF Drawing Interchange Format

EARExpanded Area Ratio

FDM..... Modelagem por Deposição de Material Fundido

FPGA Field Programmable Gate Array

GLONASS..... Global Navigation Satellite System

GPS Gobal Position System

IMU Inertial Measurement Unit

INSInertial Navigation System

ISAIndustrial Standard Architecture

IST.....Instituto Superior Técnico

ITTC..... International Towing Tank Conference

LENS..... Conformação Próxima ao Formato Final via Laser

LOM..... Manufatura de Objetos por Laminação

MIT Massachusetts Institute of Technology

MJT Modelagem Multi Jato

NACA National Advisory Committee for Aeronautics

NASA..... National Aeronautics and Space Administration

PDProporcional Derivativo

PID..... Proporcional Integral Derivativo

POLI Escola Politécnica

PVC Polyvinyl Chloride

ROV Remotely Operated Vehicles

SESAMO SEa Surface Autonomous MOdular unit

SGC Cura Sólida na Base

SLS..... Sinterização Seletiva a Laser

SWATH Small Waterplane Area Twin-Hull

TCP/IPTransmission Control Protocol/ Internet Protocol

UAV Unmanned Aerial Vehicles

UGVUnmanned Ground Vehicles

USP Universidade de São Paulo

UUVUnmanned Underwater Vehicle

Lista de Símbolos

- D : diâmetro do hélice
- d : diâmetro do bosso
- θ_p : ângulo de passo
- P : passo do hélice
- r : raio correspondente à secção
- P/D : razão passo/diâmetro
- EAR : razão de área expandida
- Z : número de pás
- T : empuxo do hélice
- p_0 : pressão sobre o hélice
- p_v : pressão de vapor d'água
- K : coeficiente de correção do EAR
- $K(r)$: coeficiente de correção do comprimento de corda
- t_{max} : espessura máxima da secção
- $Kf(r)$: coeficiente de correção da curvatura da secção
- Ar : coeficiente da espessura da secção da

familia B-Troost

B_r : coeficiente da espessura da secção familia B-Troost
 R : vetor da posição radial dos perfis
 x : posição percentual do ponto sobre a corda.
 f_{max} : curvatura máxima
 x_{max} : posição sobre a corda de máxima curvatura
 x_c : s k e w
 \bar{R} raio da superfície do objeto
 R_F raio da ferramenta
 L distância entre o bosso e o ponto de tangência da ferramenta.
 θ_r ângulo entre a ferramenta e a reta tangente à superfície da pá.
 δ erro inerente ao passo entre os caminhos da ferramenta
 δ_i erro inerente à resolução da máquina CNC
 $L1$ Passo entre os caminhos da ferramenta

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura social, em que a tecnologia progride vertiginosamente, há uma demanda crescente na realização de tarefas de modo eficiente, rápido, preciso e seguro.

O termo tecnologia está intimamente relacionado à melhoria nos padrões de qualidade de vida e surgiu juntamente com a Revolução Industrial no século XIX. Nesta época, ele era utilizado apenas para designar melhorias na indústria. Atualmente, o conceito deste termo está difundido em diversos grupos sociais, não só no industrial como no doméstico, entre outros.

No grupo científico e tecnológico, é comum a realização de tarefas que expõem o homem ao risco. Como exemplo destas tarefas, tem-se: explorações espaciais, marítimas em águas profundas, em crateras vulcânicas, em regiões de acidentes nucleares, entre outras. Para tanto, se faz necessário à presença de dispositivos capazes de executar tais missões, eximindo a presença humana, garantindo assim a integridade física do ser. Entre estes dispositivos têm-se os robôs móveis de campo, que executam essas tarefas com eficiência, precisão e confiabilidade superiores às obtidas pelo próprio ser humano.

A ciência que se focaliza no desenvolvimento de tais dispositivos

é conhecida como robótica. Em particular, o desenvolvimento de robôs móveis é uma das maiores contribuições para a realização de atividades até então consideradas inviáveis aos seres humanos, pelo alto grau de risco associado.

Segundo a literatura, os robôs móveis de campo podem ser classificados sob diversos aspectos. Um aspecto de interesse refere-se ao modo de operação, que pode ser: tele-operado ou autônomo.

- **Robôs Tele-operados**

Os robôs móveis contidos nesta classe são controlados por operadores por meio de controle remoto. Estão em contínua comunicação com uma base de operação, por meio de sinais de rádio, acústicos ou por cordões umbilicais, exigindo supervisão e intervenção humana, o que limita seu raio de ação.

Não possuem uma trajetória pré-definida e por isso são empregados quando um ou mais parâmetros da missão são desconhecidos; como exemplo têm-se missões de resgate a navios naufragados, onde sua localização e posição não são precisamente conhecidas, missões de espionagem e ataque a objetos móveis, missões de localização e destruição de minas terrestres ou aquáticas, entre outras.

Esta classe de robôs possui um grande valor histórico, pois são o berço da tecnologia empregada atualmente nos robôs móveis autônomos.

- **Robôs Autônomos.**

Um robô móvel autônomo pode ser definido como um aparato

provido de sistemas sensoriais e atuadores, gerenciados por um computador de bordo, capaz de instruir a execução de missões definidas pelo usuário. Normalmente, um robô móvel autônomo apresenta fonte de energia própria e depende da eletrônica embarcada para a execução de missões. Tais missões consistem em uma série de instruções pré-programadas e/ ou modificáveis em tempo real por meio de dados ou informações provenientes dos sensores do veículo.

A autonomia desses robôs é dada pela harmonia na integração dos subsistemas implementados a bordo que venham colaborar com os objetivos da missão

Particularmente, os robôs móveis autônomos não são genuinamente autônomos, pois por uma questão de segurança todo robô móvel autônomo possui um sistema que possibilita a intervenção de um operador remoto.

Outro aspecto utilizado para classificar os robôs móveis é o ambiente de atuação, que podem ser: terrestres, aéreos, submarinos ou de superfície aquática.

- Terrestres.

Os robôs móveis de campo desta categoria são chamados de veículos terrestres não tripulados, designados pela sigla UGV (Unmanned Ground Vehicles). Nesta classe estão inclusos os robôs tele-operados e os autônomos, possuem aplicações tanto no ramo civil como no militar, destacando-se a exploração da superfície de outros planetas. Como exemplo tem-se o robô Sojourner (figura 1.1), desenvolvido pelo Jet Propulsion Laboratory Mars Rover,

enviado em missão ao planeta Marte.

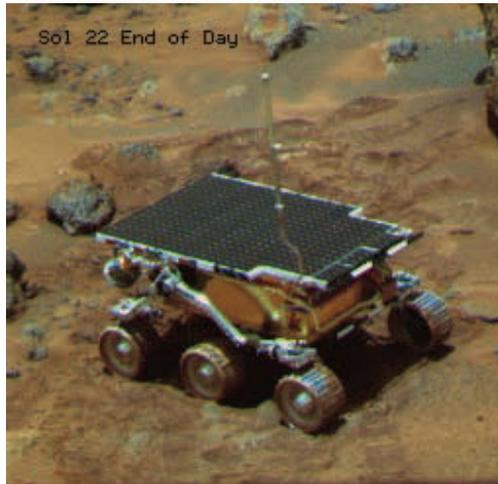


Figura 1.1- UGV “Sojourner” enviado ao planeta Marte.

- Aéreos.

São denominados veículos aéreos não tripulados, designados pela sigla UAVs (Unmanned Aerial Vehicles).

Tais robôs podem ser implementados com sistemas de asa fixa, rotores ou balões de gás com a finalidade de obter a força de sustentação necessária.

Surgiram durante a segunda guerra mundial com o objetivo de desempenhar missões militares. Atualmente, têm sido empregados no ramo civil, em aplicações como: controle de pragas em lavouras, fiscalização do avanço do desmatamento florestal e telecomunicação. Como exemplo desta classe, têm-se os UAVs, “Pathfinder” (figura 1.2) e “Pioneer” (figura 1.3).



Figura 1.2- UAV “Pathfinder”.



Figura 1.3- UAV “Pioneer”.

- Submarinos.

Os robôs desta classe são conhecidos como veículos submarinos não tripulados designados pela sigla UUVs (Unmanned Underwater Vehicle).

Pode-se afirmar que das pesquisas sobre robôs móveis de campo, grande parte estão relacionados a esta categoria, pelo fato de apresentarem amplo campo de atuação. No Brasil e no mundo, tal interesse é motivado, em grande parte, pela indústria petrolífera e mais recentemente por problemas ambientais, como poluição dos oceanos, pesca predatória de espécies protegidas, entre outros.

Os Tele-operados são conhecidos por ROVs (Remotely Operated Vehicles), ficam constantemente conectados a um navio suporte por meio de um cordão umbilical, pelo qual são transmitidos os sinais de controle do operador e a energia necessária para alimentar os subsistemas a bordo. (figura 1.4)



Figura 1.4- ROV Victor, com seu cordão umbilical.

Os autônomos são conhecidos por AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) por não serem conectados ao barco suporte por cordão umbilical, a região de exploração é bem maior que a dos ROVs. Em verdade eles nem necessitam de um barco suporte, o que reduz o seu custo operacional tornando-o muito inferior aos dos ROVs. Como exemplo tem-se o AUV INFANTE (figura 1.5).

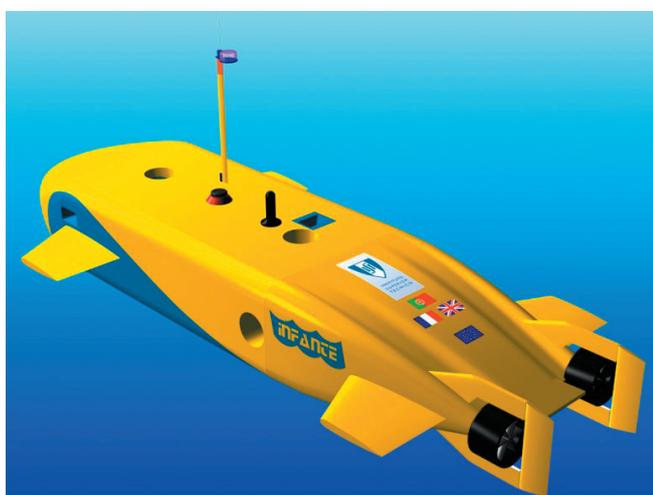


Figura 1.5- AUV Infante, destinado a inspeção de oleo-dutos e cabos submarinos.

- Aquáticos de Superfície

São conhecidos por embarcações autônomas de superfície, designados pela sigla ASVs (Autonomous Surface Vessel). Embora sejam, relativamente mais simples que os robôs das outras categorias, sua importância só passou a ser reconhecida recentemente por possuírem algumas aptidões que se sobrepujam às das demais categorias. Dentre essas aptidões pode-se citar a questão de segurança do equipamento, versatilidade, custo, entre outros. Em virtude destas aptidões, tais robôs são empregados para desempenhar missões do tipo: elo de comunicação entre um AUV

e a embarcação de base, monitoramento ambiental, levantamento batimétrico, resguardo de fronteiras e portos. Como exemplo desta categoria de robôs autônomos tem-se o ASV Delfim (figura 1.6).



Figura 1.6- ASV “Delfim”.

1.1- Os ASVs

A história dos ASVs está mesclada com a história da engenharia naval. No princípio, tais dispositivos eram modelos em escala de embarcações reais, empregados na validação de métodos de predição numérica e analítica. Esses métodos, utilizados na engenharia naval, visam a coleta de informações a respeito da dinâmica e manobrabilidade das embarcações reais. Recentemente, ASVs também são empregados em atividades secundárias, como plataformas de teste para o desenvolvimento de subsistemas destinados a veículos submarinos autônomos, com o

objetivo de reduzir o custo da etapa de desenvolvimento e garantir certa segurança aos equipamentos embarcados.

Atualmente, os ASVs têm sido empregados não só como ferramentas no auxílio da arquitetura naval, mas também como um sistema mecatrônico integral, capaz de executar as missões pré-definidas, interagindo com o meio que o cerca.

Portanto, para o caso dos ASVs, é possível afirmar que nos últimos anos houve uma inversão de valores, a mecatrônica deixou de ser apenas uma ferramenta no auxílio do desenvolvimento da pesquisa naval e passou a utilizar a engenharia naval como uma de suas ferramentas no auxílio do desenvolvimento dos ASVs e seus dispositivos, ou seja, meros modelos em escala de navios, utilizados para fins de pesquisa naval, deram lugar a plataformas complexas de diversos subsistemas, integrados de modo a compor um sistema mecatrônico real, capaz de realizar missões.

Os ASVs constituem uma classe de robôs cujo potencial só passou a ser efetivamente explorado na última década, fenômeno constatado pelo crescente e repentino aparecimento de artigos e trabalhos em congressos.

Essas embarcações podem ser classificadas baseada no caráter da missão a ser desempenhada, de acordo com a divisão nos tópicos abaixo:

- Monitoramento Ambiental;
- Militares;
- Sistemas de apoio ao desenvolvimento de veículos aquáticos.

Esta classificação agrega valores a parâmetros importantes para o cumprimento satisfatório da missão. Dentre eles pode-se citar: velocidade de cruzeiro, geometria de casco, estabilidade transversal,

manobrabilidade, entre outros. Fundamentando-se nesta classificação, conforme o caráter da missão, serão expostos alguns projetos, com suas características relevantes, alguns em fase de desenvolvimento e outros já em operação.

1.1.1- ASVs de monitoramento ambiental

Os ASVs destinados a missões de caráter ambiental, além de possuírem os sistemas padrões, como: propulsão, navegação, energia e controle, levam também equipamentos específicos para a missão como sonares, coletores de amostras, entre outros. Sendo que alguns desses equipamentos só funcionam sob determinadas condições de operação, exigindo assim tipos específicos de casco.

Geralmente, ASVs desta categoria são desenvolvidos para navegarem em baixas velocidades. Em certos casos, há dois regimes de velocidade, um utilizado durante a fase do experimento (coleta de amostras, levantamento batimétrico) e outro utilizado durante a fase de deslocamento até a região do experimento. Independente dos regimes utilizados, tais veículos devem possuir autonomia suficiente para cumprir a missão sem a necessidade de intervenção humana, como abastecimento de combustível ou recarregar baterias.

Abaixo, como exemplo, são apresentados alguns projetos com suas principais características.

► Projeto Caravela, desenvolvido pelo laboratório de Sistemas Dinâmicos e Robôs Oceânicos (DSORlab) do Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa, Portugal. Tem por meta o desenvolvimento de um ASV para operar em mar aberto capaz de executar inúmeras missões de caráter ambiental, como levantamento batimétrico,

estudo da vida marinha, entre outros, perfazendo uma trajetória predeterminada. A embarcação possui sistema de comunicação via satélite o que possibilita responder a comandos de um operador remoto e o envio de dados. Possui um radar para evitar obstáculos e garantir a sua integridade física. O objetivo principal deste projeto é o desenvolvimento de uma plataforma de custo relativamente baixo e de grande autonomia, permanecendo longos períodos em alto mar, coletando dados.

O sistema de propulsão utiliza dois hélices, os quais são acionados por motores diesel-elétrico, o que permite à embarcação atingir velocidades médias de aproximadamente 2 m/s. Todos os subsistemas são embarcados em um casco do tipo deslocamento (figura 1.7) cujas dimensões são: 7 m de comprimento, 2 m de largura e 6 m de altura. Os equipamentos específicos às medições, como os transdutores acústicos, são alojados em um corpo cilíndrico, com forma de torpedo, fixo a uma quilha que se estende abaixo do casco (IST, 2004); (VANZWIETEN, 2003).



Figura 1.7- ASV Caravela.

► Projeto MAST- III Asimov, também desenvolvido pelo

laboratório de Sistemas Dinâmicos e Robôs Oceânicos (DSORlab) do Instituto Superior Técnico (IST). Tem por propósito o desenvolvimento de um ASV, denominado Delfim, para operar em mar aberto em cooperação com um veículo autônomo submarino (INFANTE), e capaz também de executar missões de levantamento batimétrico. A embarcação possui sistema de comunicação utilizando transdutores acústicos o que possibilita enviar e receber dados do AUV, também possui um outro canal de comunicação, via rádio, que possibilita a troca de dados com o navio suporte; possui ainda um sistema de navegação fundamentado na integração entre o DGPS, unidade Doppler e sensores de atitude (INS).

O veículo é propulsionado por hélices, acionados por dois motores elétricos, os quais possibilitam que a embarcação navegue com velocidades de até 2,58 m/s. O casco do tipo catamarã e possui as seguintes dimensões: 3,5 m de comprimento, 2 m de largura entre cascos e peso total, incluindo o equipamento, de 320 kg.

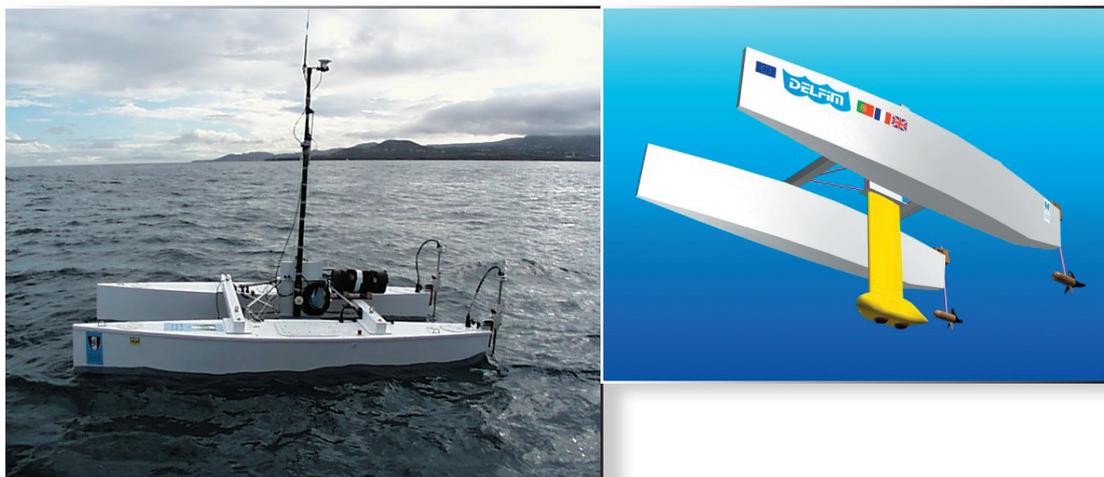


Figura 1.8- ASV Delfim.

Os transdutores acústicos, responsáveis pela comunicação e levantamento batimétrico, são alojados dentro de um corpo, cuja geometria é otimizada, de modo a gerar baixo arrasto, e este é fixo ao restante do casco por meio de uma quilha que se estende abaixo

da superfície (figura 1.8). (ALVES et al., 2003); (PASCOAL et al., 2003); (VANZWIETEN, 2003); (SANTOS, 2002).

► Projeto Kan-Chan, desenvolvido pela Yamaha Motor Co, cujo objetivo era desenvolver um ASV capaz de realizar análises de partículas coloidais (aerosol), responsáveis por grande parte do aquecimento global, dispersas na atmosfera sobre os oceanos. A principal meta é percorrer grandes áreas em mar aberto, diferentemente dos sistemas até então utilizados, que consistiam em observatórios fixos em ilhas remotas, para tal o Kan-Chan foi desenvolvido para permanecer grandes períodos em alto mar coletando dados.



Figura 1.9- ASV Kan-Chan.

Objetivando o cumprimento adequado da missão, o Kan-Chan deve deslocar-se lentamente entre os locais de coleta de dados e durante a coleta ele deve permanecer parado. Para tanto, o casco utilizado é o Yamaha 26 II S (figura 1.9), com comprimento de 7,99m, 2,8m de largura e peso de 3500 kg, que segundo o fabricante

possui baixa resistência e uma boa capacidade de manter o curso. Os instrumentos de análise são fixados no topo de um mastro, posicionado na popa.

A propulsão é realizada por hélice, utilizando motor elétrico, permitindo que a embarcação atinja velocidades de até 2 m/s. É equipado com geradores de energia AC e DC, a diesel, um gerador eólico e seis baterias de 12V-80Ah, capazes de manter o Kan-Chan em operação contínua durante 700h.

O controle da embarcação é realizado por um microcomputador e sensores como: GPS, velocímetro, bússola, anemômetro, entre outros (YAMAHA, 2000).

► Projeto SESAMO (SEa Surface Autonomous MOdular unit), desenvolvido pela parceria entre o Instituto di Studi sui Sistemi Intelligenti per L'Automazione de Genova e o Instituto per la Dinamica dei Processi Ambientali de Veneza; com objetivo de desenvolver um ASV, capaz percorrer trajetórias pré-definidas, coletando amostras de finas camadas da superfície do oceano (interface ar-água). Tal pesquisa objetiva o estudo da influência da interação entre a atmosfera e as águas do oceano, como os efeitos do acúmulo de poluentes nestas camadas, que promovem o desequilíbrio do ecossistema, afetando de forma nociva o estado larval de diversas espécies marinhas, e também contribuindo para o aquecimento global.

Para a realização da missão, a embarcação é equipada com um coletor de amostras, apto a diferenciar amostras orgânicas e inorgânicas, armazenando-as em reservatórios distintos, com capacidades distintas. Este equipamento impõe uma série de restrições como: obriga a embarcação fazer inúmeras viagens entre

o local de coleta e o navio suporte, o qual para não contaminar as amostras, deve permanecer no mínimo a 1 km de distância do local de amostragem; obriga o casco a ter uma boa estabilidade transversal, pois o eixo transversal do coletor deve permanecer paralelo à linha d'água (superfície).

Em resposta a essas e outras restrições o veículo é propulsionado por dois motores elétricos, que permitem a embarcação operar em dois regimes de velocidade, um durante a coleta de amostras (velocidade baixa), e outro para a translação entre o barco suporte e a região de coleta (velocidade alta). O casco é do tipo catamarã, cujas dimensões são as seguintes: 2,4 m de comprimento, 1,8 m de largura e a distância entre cascos de 0,9 m (figura 1.10).

A embarcação possui sistema de comunicação via rede sem fio de alta velocidade, o que possibilita responder a comandos de um operador remotamente, a transmissão de dados e imagens de uma câmera de vídeo instalada a bordo (CACCIA, 2003); (CACCIA, 2004).



Figura 1.10- ASV SESAMO.

► Projeto AutoCat, desenvolvido no laboratório de AUVs do MIT, que desenvolve ASVs desde o início da década de noventa, é o terceiro de uma série de ASVs desenvolvidos nesta instalação.

Seus antecessores eram destinados a missões de caráter de apoio ao desenvolvimento de veículos aquáticos.

Em virtude do histórico apresentado por esta instituição, o ASV AutoCat é considerado um sistema robusto, dotado de um sistema de controle baseado em lógica “Fuzzy”, tendo como sensores o DGPS, INS e bússola eletrônica.

É empregado em missões relacionadas à arqueologia náutica, sendo equipado com transdutores de alta frequência capazes de traçar o perfil do terreno logo abaixo da superfície. Ele também executa missões de caráter ambiental como: rastrear vida marinha.

O equipamento é embarcado em um casco do tipo catamarã de 1,8m de comprimento, cuja distância entre cascos é de 1m e que pesa aproximadamente 100 kg (figura 1.11). Este conjunto é propulsionado por motores elétrico e ou à gasolina, que permite à embarcação atingir velocidades de 4 m/s.



Figura 1.11- ASV AutoCat.

O sistema de comunicação é capaz de transmitir os dados obtidos à distância de 20 milhas náuticas. E seu sistema de energia garante uma autonomia de 4 horas (MIT, 2004).

► Projeto privado da empresa OCEANSCIENCE que produz

o ASVs denominado RiverBoat, cujo o casco é do tipo trimarã (figura 1.12), desenvolvido para missões de caráter ambiental, realizando medidas em rios. Por se tratar de um produto comercial, o comprador é que especifica o equipamento, como opcionais a empresa fornece: sistema de comunicação que permite a transferência de dados para um operador em terra e o sistema de navegação utiliza o GPS (OCEANSCIENCE, 2003).



Figura 1.12- ASV RiverBoat.

1.1.2- ASVs para fins militares

Os ASVs destinados a missões de caráter militar, assim como os oceanográficos, além de possuírem os sistemas considerados padrões, como propulsão, navegação, energia e controle, levam também equipamentos específicos à missão como sonares, armamento, câmeras entre outros.

Geralmente, missões desse caráter exigem alta velocidade e grande autonomia, pois os ASVs desempenham funções do tipo: espionagem, ataque e abordagem a outras embarcações.

Abaixo, como exemplo, são apresentados alguns projetos com algumas de suas peculiaridades. O número reduzido de projetos aqui

apresentados deve-se ao fato das informações serem confidenciais, pouco divulga. A comunidade científica civil, só tem acesso a essas informações a partir do momento que os veículos entram em operação, mesmo assim as informações são restritas.

► Projeto Protector desenvolvido pela empresa Rafael sediada em Israel, especializada em equipamentos militares autônomos.

O ASV Protector foi desenvolvido para desempenhar missões de patrulhamento em portos e enseadas, vigilância, reconhecimento e ataque.

Por se tratar de uma plataforma de ataque, todos os seus subsistemas são robustos, por exemplo, o sistema de navegação é composto pela integração entre o GPS, a INS e radar, o sistema de comunicação é composto de dois canais de alta velocidade, um para o envio de imagens e outro para a transferência de dados.

O sistema de armamento é composto por uma metralhadora 30 mm, montada sobre uma base estabilizada denominada “Typhoon”, o sistema de rastreamento de alvo é confeccionado em uma base estabilizada denominada “TOPLITE”, composto por mira à laser e câmera CCD, assim como os utilizados em modernos aviões de caça e helicópteros de combate. A integração entre o sistema de armamento e rastreamento de alvo, torna o Protector uma poderosa e precisa arma contra o terrorismo.

Todos os subsistemas são alojados em um mono-casco de planeio (figura 1.13), com 11 m de comprimento, apresenta boa maneabilidade, ou seja, capacidade de manobra. É construído com tecnologia “stealthy”, isto é, ele é praticamente “invisível” ao radar, tornando a embarcação furtiva, característica ideal para missões de espionagem.

O sistema de propulsão pertence à categoria jato de água, acionado por motor a diesel, que permite a embarcação atingir velocidades de 20 m/s (RAFAEL, 2004).

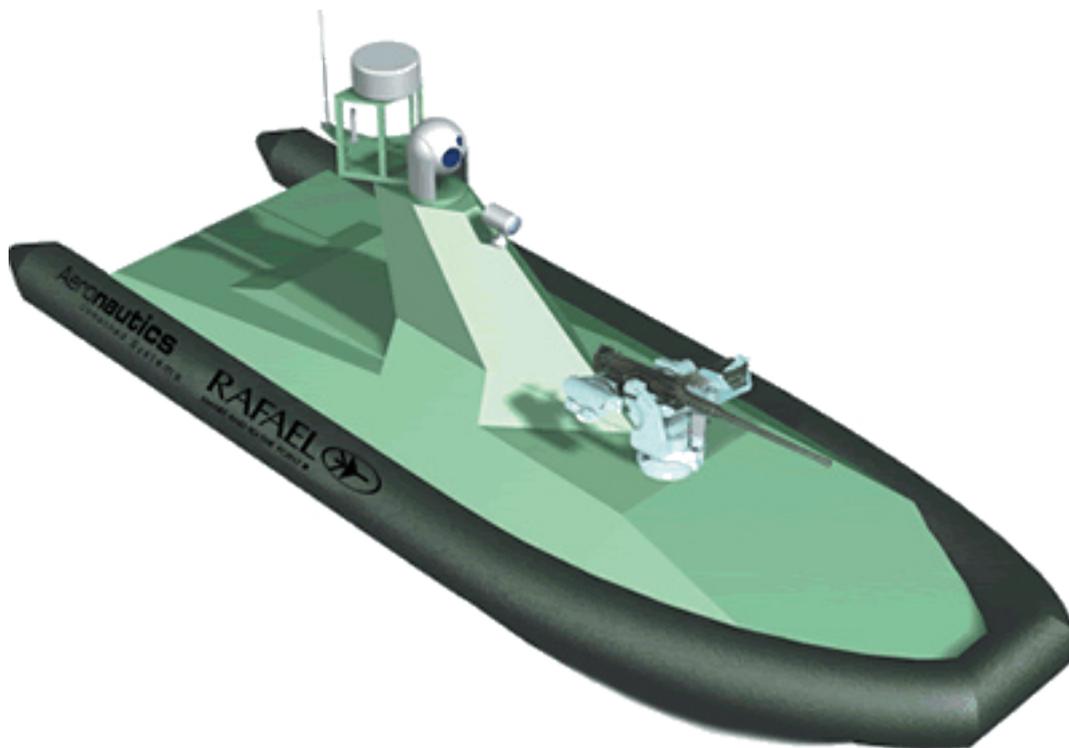


Figura 1.13- ASV Protector.

► Projeto privado da empresa SAIC sediada em San Diego, Estados Unidos. O ASV desenvolvido por tal empresa, é destinado a missões de caráter militar tais como: patrulhamento costeiro, interdição de narcóticos, procura e resgate, reconhecimento, entre outras.

Para o cumprimento satisfatório das possíveis missões, este ASV é munido dos seguintes sensores: Doppler, sonar de alta resolução de varredura frontal e lateral, câmeras com visão noturna e de infravermelho, direcionadas por laser, microfones e armamento não letal.

O sistema de navegação utiliza o DGPS de alta precisão,

para indicar os pontos restantes de uma trajetória predeterminada definida pelo usuário.

Ele possui três canais de comunicação por radio frequência de alta velocidade para a transmissão de dados, imagem e sinais de controle (figura 1.14) (SAIC, 2005).



Figura 1.14- ASV SAIC.

Têm-se ainda, dois projetos semelhantes aos citados acima, o projeto do ASV ODYSSEY, desenvolvido pela empresa RadixMarine (RADIX, 2003) e o projeto do ASV SPARTAN, desenvolvido pela marinha norte americana (USN, 2005).

1.1.3- Sistemas de apoio ao desenvolvimento de veículos aquáticos

Os ASVs de apoio ao desenvolvimento de veículos aquáticos, além

de embarcarem os sistemas considerados padrões como: propulsão, navegação, energia e controle, também são equipados com os sistemas em desenvolvimento como: sensores e algum tipo de mecanismo. Em alguns casos, é abordado o aperfeiçoamento dos sistemas padrões, no intuito de melhorar o desempenho das embarcações.

Geralmente nestes casos as informações divulgadas, por meio de artigos, dissertações e outros, enfatizam os sistemas em desenvolvimento, por isso tem-se pouca informação a respeito dos outros sistemas, como um todo.

Abaixo são citados alguns exemplos desta categoria.

► Projeto Comportamento em Ondas de embarcações de alto desempenho, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Naval e Oceânica em conjunto com o Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica (POLI) da Universidade de São Paulo (USP). Teve por finalidade a construção de um ASV para operar em diversos ambientes executando trajetórias predeterminadas. A embarcação possui sistema de comunicação via rede sem fio que possibilita enviar e receber dados a um operador em terra, possui ainda um sistema de navegação fundamentado na integração entre o DGPS e uma unidade de medida inercial (IMU). O objetivo principal deste projeto é o desenvolvimento de uma plataforma de baixo custo para análise do comportamento em ondas de embarcações de superfície de alto desempenho.

O veículo é propulsado por dois motores elétricos, que permitem a embarcação atingir aproximadamente a velocidade de 3 m/s. O casco do tipo deslocamento cujas dimensões são as seguintes, 2 m de comprimento, 0,44 m de largura e 0.0675 m de

calado. (figura 1.15) (FERREIRA, 2003).



Figura 1.15- Projeto Comportamento em ondas de embarcações de alto desempenho.

► Projeto privado da empresa Sirehna, sediada em Nantes , França. Tem por objetivo o desenvolvimento de sistemas de navegação para ASVs de alta velocidade, para tal usaram como plataforma de teste um “jet-ski” (figura 1.16). Esse sistema é de grande valia para missões de caráter militar pois o ASV deve ser veloz o suficiente para perseguir, abordar e impedir embarcações não autorizadas de entrarem no território de um país (VANZWIETEN, 2003).



Figura 1.16- Projeto desenvolvido pela empresa Sirehna.

Outros projetos pertencentes a esta categoria são: o ASV ARTEMIS e Kayak, ambos desenvolvidos pelo laboratório de AUVs do MIT (MIT, 2004). Esses projetos visavam o desenvolvimento de sistemas de controle e navegação para ASVs, os quais, atualmente estão implementados no ASV AutoCat, citado anteriormente.

1.1.4- Características comuns e Tendências.

Com a análise dos projetos apresentados, é notório o uso do Sistema de Posicionamento Global (GPS), em verdade, é possível afirmar que esta é uma das grandes vantagens dos ASVs, o que torna o sistema de navegação desses robôs preciso o suficiente para executar diversos tipos de missão.

Outra característica notória é a configuração do casco, os ASVs destinados a missões de caráter ambiental utilizam multi-cascos, visando uma boa estabilidade transversal, exigida pelos equipamentos instalados a bordo; já os ASVs para missões de caráter militar, utilizam mono-cascos de planeio ou semi-planeio, visando a navegação em alta velocidade, exigida por missões deste tipo.

Ao examinar o processo histórico do desenvolvimento de ASVs e de todos robôs móveis de campo, nota-se que a tendência é o desenvolvimento de robôs móveis de campo capazes de operar em cooperação entre si, de modo a abranger uma região de estudo maior, possibilitando o estudo de fenômenos naturais por completo e sua influência sobre um determinado ecossistema.

1.2- Motivação.

Sendo dois terços do planeta Terra cobertos por oceanos e considerando tal proporção, pouco se conhece a seu respeito, tendo em vista que grande parte dos recursos necessários para a manutenção da vida sobre o restante do planeta é proveniente de tal ambiente, há a necessidade de intensificar a exploração e preservação de tal região. Uma forma segura, precisa e de baixo custo é o emprego dos robôs móveis de campo, em particular os ASVs.

No âmbito nacional, o emprego de tal categoria, também pode ser significativo, haja vista que o Brasil possui uma das maiores costas litorâneas do mundo e dada sua posição geográfica privilegiada, onde há o encontro de diversas correntes marítimas provenientes tanto do hemisfério norte, como do círculo polar antártico, o que torna a região rica em vida marinha. Este papel de auxílio ao monitoramento ambiental, bem como o de patrulhamento, também podem ser estendidos a águas interiores (rios e grandes reservatórios). Além disso, veículos de tecnologia semelhante, os modelos rádio controlados de embarcações de superfície, auxiliam a investigação da manobrabilidade para desenvolvimentos na indústria naval.

Outros motivos estão relacionados à dificuldade da realização de pesquisas em alto mar com embarcações oceanográficas convencionais, pois estas necessitam de uma tripulação suporte numerosa, cuja disponibilidade é restrita a curtos períodos durante o ano, restringindo o tempo de duração das pesquisas e encarecendo o custo das expedições.

Grande parte das pesquisas envolvendo os ASVs e outros veículos autônomos, de maneira geral, está relacionadas ao sistema de controle

e navegação de tais embarcações. Não menos importante, do ponto de vista da implementação de ASVs e outros veículos autônomos aquáticos, é o sistema de propulsão. Especificamente o elemento propulsor (o hélice), porém poucas são as pesquisas sobre este assunto, relacionando-as aos ASVs.

Em alguns casos dá-se preferência por adquirir propulsores, a um custo muito elevado, de empresas especializadas, ou em estaleiros convencionais, onde tais artefatos, de dimensões reduzidas, não fazem parte da linha de produção; muitas vezes ignorando a possibilidade de produzi-los na universidade com recursos próprios, já existentes. A aquisição destes elementos no mercado nautimodelista também é inviável, uma vez que em tal mercado, há uma debilidade com relação à especificação dos parâmetros relevantes para a escolha do hélice e para o dimensionamento do restante do sistema de propulsão.

O hélice, por possuir uma superfície complexa, exige uma série de cuidados durante todo o processo de desenvolvimento, ou seja, da etapa de projeto até a etapa de manufatura. Durante a etapa de desenho (CAD), muitas das ferramentas numéricas, necessárias para a obtenção dos pontos da sua superfície, são inexistentes nos programas de CAD convencionais, exigindo a criação de ferramentas ou mesmo, a alteração das já existentes (GARCIA, 1999). Em certos casos, recorre-se à implementação de sistemas de CAD/CAM dedicados à modelagem e elaboração da tática de manufatura do hélice. Geralmente, por serem sistemas dedicados ao hélice, eles reduzem o tempo de processo em até 50%, diferença significativa pertinente ao custo do produto final. (YOUN et al, 2003)

Nos sistemas dedicados, é comum o uso de curvas B-Spline como forma de parametrização das superfícies das pás do hélice. (KANO et

all, 2005); (VICKERS, 1977); (YE et al, 1996); (YOUN et al, 2003); (YANG et al, 2003).

Durante a etapa de manufatura, mesmo utilizando-se controle numérico, corre-se o risco de não obter o resultado almejado, pelo fato de não haver um método quantitativo de seleção de parâmetros, tais como: o tipo, o tamanho, o passo e o caminho da ferramenta. Estes, geralmente, são determinados pela experiência do operador (KUO, 2001).

1.3- Objetivos da dissertação

Os estudos realizados neste trabalho, visam o cumprimento das seguintes metas:

- Apresentar à comunidade acadêmica uma nova modalidade de veículos autônomos, com a análise dos projetos existentes.
- Analisar os sistemas empregados nos ASVs diferenciando-os de outros veículos aquáticos e robôs móveis.
- Contribuir com aspectos relevantes para o desenvolvimento do sistema de propulsão, propondo uma ferramenta numérica capaz de calcular os pontos da superfície do hélice e obter o sólido.
- Analisar a viabilidade do uso de alguns métodos de manufatura auxiliada por computador (CAM), para o desenvolvimento dos hélices destinados aos ASVs.

1.4- Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado tem início no capítulo 1, no qual é apresentada uma breve introdução sobre o assunto de robôs móveis de campo, enfatizando os ASVs e avaliando os principais projetos desenvolvidos na atualidade, focando as principais características de cada projeto, quanto à geometria do casco, sistema de propulsão e sistema de navegação, conforme o caráter da missão desempenhada.

No capítulo 2, desenvolve-se uma breve revisão dos principais conceitos de engenharia naval (estabilidade, resistência e comportamento em ondas), necessários para determinar as características físicas do casco para o cumprimento satisfatório da missão.

No capítulo 3, são apresentados os elementos de maior importância, que definem a geometria do hélice, bem como as séries sistemáticas, que determinam a geometria de cada família de hélices, que serão utilizadas para implementar uma ferramenta numérica capaz de definir os pontos da superfície do hélice.

O capítulo 4 descreve as fases despendidas neste projeto de mestrado, assim como a ferramenta numérica implementada pelo autor. Este capítulo é finalizado com uma seção de estudo de casos, onde são apresentados os resultados obtidos pela ferramenta numérica.

O capítulo 5 expõe a conclusão do autor para este trabalho de mestrado e é finalizado com uma proposta para trabalhos futuros.

No apêndice I, são retratados alguns métodos de manufatura de precisão, economicamente viáveis, para hélices, ou seja, prototipagem rápida e usinagem CNC.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS CARACTERÍSTICOS DOS ASVs.

A geometria dos cascos é um fator importante tanto no desenvolvimento de embarcações reais como no desenvolvimento de ASVs. Para os ASVs tal fator é estabelecido conforme os requisitos impostos pelas missões a serem desempenhadas pela embarcação. Da mesma forma, tem-se a dependência dos equipamentos embarcados nos ASVs em relação às missões. No entanto, algumas categorias são comuns à maioria dos casos.

No presente capítulo serão abordados fatores como, arranjo do equipamento embarcado, estabilidade, resistência ao deslocamento e comportamento em ondas; que direta ou indiretamente afetam o dimensionamento do sistema de propulsão.

Tem-se como objetivo a apresentação de sistemas embarcados que garantem a autonomia dos ASVs bem como, a discussão dos aspectos de arquitetura naval, voltados ao projeto desse tipo de veículo.

2.1- Equipamentos Embarcados.

O arranjo do equipamento é um fator crucial empregado na escolha do tipo de casco e de suas principais dimensões, como comprimento e volume, pois este deve possuir o espaço necessário para abrigar todo o equipamento e que possibilite uma montagem rápida e fácil; visando inclusões posteriores.

Um tópico algumas vezes negligenciado é o fato de que alguns equipamentos devem ser mantidos a uma determinada distância dos outros, a fim de evitar interferências eletromagnéticas ou aquecimento por radiação. Outro ponto negligenciado está relacionado à disposição dos cabos, pois estes devem possuir um comprimento adequado para não comprometer a montagem dos equipamentos, mas também não devem ser muito longos para evitar acúmulo de peso desnecessário, além do mais, cabos de sinais devem ser isolados de fontes de ruído eletromagnético, como motores elétricos, antenas de comunicação, entre outros.

Uma vez conhecido o tipo de missão a ser realizada pelo ASVs, deve-se fazer um levantamento da dimensão e peso dos equipamentos para poder estipular a melhor configuração destes e o espaço requerido pelos mesmos.

Neste requisito, os multi-cascos e SWATHs (Small Waterplane Area Twin-Hull) apresentam melhores resultados, pois possuem uma área de convés muito maior que dos mono-cascos, o que permite uma boa acomodação e distribuição dos equipamentos embarcados. Também possuem uma maior capacidade de carga que permite portar mais equipamentos. (DUBROVSKIY, 1997).

Algumas classes de equipamentos são comuns a todos os ASVs e no próximo tópico serão apresentados alguns dos representantes dessas

classes.

2.1.1- Equipamentos Comuns aos ASVs.

Pode-se considerar como equipamento comum, aqueles equipamentos necessários, presentes em todos os ASVs, para que este cumpra sua missão satisfatoriamente.

Estes equipamentos podem ser divididos em três classes, como serão apresentados no texto que se sucede. Para cada equipamento citado no texto é apresentada uma breve explanação sobre sua função junto com uma tabela com as dimensões e peso, com o intuito de facilitar a abstração durante o processo de escolha do casco.

Deve-se ter consciência que os equipamentos aqui apresentados, não são os únicos do mercado, são apenas exemplos.

2.1.1.1- Sistema de navegação.

O principal objetivo dos equipamentos embarcados, pertencentes à classe do sistema de navegação, é fornecer ao estimador de estados do sistema, como o filtro de Kalman ou filtro de partículas, dados relevantes para que este possa estimar precisamente o estado da embarcação como: velocidade, rumo e posição, possibilitando ao ASV uma boa interação com o meio em que se encontra.

► Bússola.

A bússola é responsável por dados como rumo, que pode ser tanto em relação ao norte magnético, como em relação a uma posição inicial determinada pelo usuário, “pitch” e “roll”.

Bússolas eletrônicas, como a da marca TCM, (figura 2.1),

atualmente são muito empregadas em ASVs, substituindo outras tecnologias, dado o seu baixo custo e precisão. A comunicação entre este modelo de bússola e o computador embarcado é realizada pela interface RS232.

Tabela 2.1- Principais dimensões da TCM2.

modelo	dimensões (mm)			peso (g)
	comprimento	largura	altura	
TCM2	64	51	14	20

Por se tratar de um equipamento sensível a campos magnéticos ele deve permanecer isolado de qualquer fonte de ruído eletromagnético.

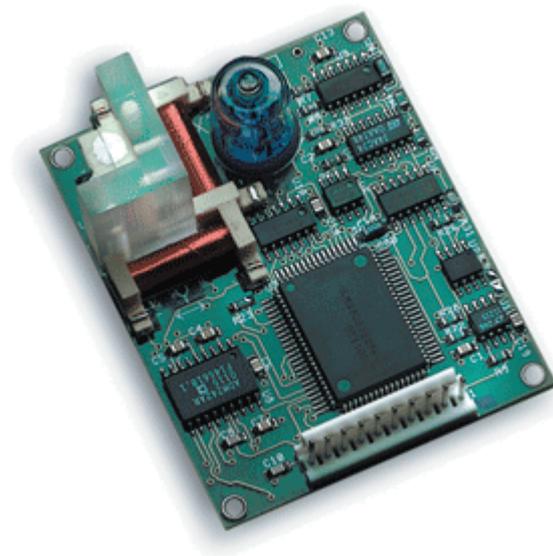


Figura 2.1- Bússola eletrônica TCM2.

► Sistemas de posicionamento por satélites.

Atualmente existem alguns sistemas de posicionamento por satélite como o GLONASS e GPS. Devido à grande disseminação no mercado o GPS é o mais utilizado na implementação do sistema de navegação para ASVs.

O GPS é responsável por dados como a posição, velocidade e em alguns casos do “pitch” e/ou “roll” (dependendo da configuração adotada na montagem). Este sistema permite operar de forma diferencial (DGPS), o que aumenta sua precisão, diminuindo o erro das medidas que podem passar de 10 m para até 2 cm.

Exemplificando esta classe tem-se os equipamentos fornecidos pela empresa canadense NOVATEL, como é o caso do equipamento ProPackII, (figura 2.2), que permite operar em modo diferencial.

A comunicação entre o receptor e o computador embarcado é efetuada através da interface RS232



Figura 2.2- Receptor de GPS da NOVATEL, ProPackII.

Tabela 2.2- Dimensões do receptor de GPS, ProPackII.

modelo	dimensões (mm)			peso (g)
	comprimento	largura	altura	
ProPack II	185	154	71	1000

► Unidade de Medida Inercial

A unidade de medida inercial designada pela sigla IMU (Inertial Measurement Unit) geralmente é composta por giroscópios, acelerômetros e inclinômetros, sensores capazes de medir a atitude

da embarcação.

Equivocadamente a IMU é chamada de INS (Inertial Navigation System), porém a INS é o sistema de navegação completo, dotado de uma IMU e um computador dedicado, responsável pelos cálculos para achar a posição e velocidade da embarcação.

Como modelo desta classe tem-se as IMUs fornecidas pelo fabricante Crossbow Technology, restringindo mais as opções tem-se deste fabricante o modelo VG 700 AA, (figura 2.3). A comunicação entre esta IMU e o computador embarcado é realizado por meio da interface RS232.



Figura 2.3- IMU modelo VG 700 AA da Crossbow Technology.

Tabela 2.3- Dimensões da IMU.

modelo	dimensões (mm)			peso (g)
	comprimento	largura	altura	
VG 700 AA	152.4	127	101.6	1600

2.1.1.2- Sistemas de suprimento de energia

Os equipamentos pertencentes a esta classe são responsáveis por todo o suprimento de energia dos demais equipamentos. Existem inúmeros métodos de obtenção de energia, porém todos necessitam de baterias para acumular e fornecer a carga exigida pelos demais

equipamentos.

Atualmente no mercado existem diversos modelos de bateria, com capacidades de carga, volume e peso distintos. O preço e disponibilidade das baterias no mercado são fatores que impossibilitam o uso de determinados modelos; geralmente eles são inversamente proporcionais aos três parâmetros citados anteriormente.

Em determinados projetos de ASVs, no intuito de reduzir o peso e volume destinados as baterias, são utilizadas células voltaicas, que captam a luz solar e transformam-na em energia elétrica, aumentando assim a autonomia da embarcação.

Para exemplificar esta classe tem-se um modelo de níquel-cádmio de 12 volts, com capacidade de 16 A/h, utilizada no projeto “Comportamento em Ondas”.

Tabela 2.4- Dimensões da Bateria.

modelo	dimensões (mm)			peso (g)
	comprimento	largura	altura	
Ni-Cd 12V	135	85	85	8000

2.1.1.3- Sistema de comunicação

O sistema de comunicação varia de um projeto para outro e depende muito da arquitetura utilizada.

A comunicação entre o computador embarcado e o computador do usuário, com o objetivo de monitorar o andamento da missão e o desempenho do sistema, geralmente, pode ser estabelecida por equipamentos de rede sem fio baseados no protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol).

Durante o processo de escolha deste equipamento deve-se tomar

cuidado, pois grande parte dos sistemas de rede sem fio comercializados no mercado atualmente, são desenvolvidos para operarem em ambientes fechados como casas, escritórios e indústrias. Nestes equipamentos o alcance é de aproximadamente 200m, que para sistemas autônomos de campo não é satisfatório.

Exemplificando esta classe de equipamentos têm-se os desenvolvidos pela empresa Maxstream, que possuem modelos com alcance de até 64km, com a antena apropriada, como é o caso do modelo 9XTEND, (figura 2.4).



Figura 2.4- Equipamento de rede sem fio 9XTEND.

Tabela 2.5- Dimensões do 9XTEND.

modelo	dimensões (mm)			peso (g)
	comprimento	largura	altura	
9XTEND	139,7	69.9	28.6	200

2.1.1.4- Sistema de Processamento Embarcado

Esta classe varia conforme a arquitetura adotada, podendo ser uma arquitetura distribuída e neste caso são utilizados FPGAs, DSPs, microcontroladores, interligados por meio de uma rede, conhecida

por CAN. A arquitetura empregada, também pode ser centralizada em um computador de bordo, tal arquitetura geralmente é empregada em projetos acadêmicos.

O computador embarcado é responsável pela integração de todos os demais equipamentos, pela execução, controle e coordenação da missão.

Em sistemas moveis é comum o uso de computadores baseados no barramento 104, o qual é uma versão compacta do barramento ISA. Esses computadores são conhecidos como PC 104.

Estes computadores são constituídos por vários módulos (variam conforme a aplicação), o conjunto final é extremamente compacto e consome pouca energia cerca de 1 à 2 Watts por módulo.

Os módulos mais empregados nos ASVs são: CPU, expansão de portas seriais (RS232), Conversor AD/DA, disco rígido ou memória flash, Rede 10/100 kb/s e conversor DC/DC.

Como exemplar desta categoria tem-se o PC 104 comercializado pela RTD USA (figura 2.5).



Figura 2.5- PC 104 da empresa RDT USA.

Tabela 2.6- Dimensões do PC 104.

modelo	dimensões (mm)			peso (g)
	comprimento	largura	altura	
Pc104 RTD	190	156	166	3200

2.2- Influência da Geometria do Casco.

Segundo a inversão de valores citada no capítulo anterior, para se determinar a geometria do casco mais adequada à missão, utiliza-se como ferramenta os conceitos de arquitetura naval que tratam do projeto e construção de embarcações.

Os cascos podem ser classificados sob dois aspectos, o primeiro baseia-se no modo de navegar, ou melhor, no princípio que possibilita a navegação das embarcações, que podem ser de deslocamento, semiplaneio e planeio; o segundo aspecto baseia-se na configuração do casco, que pode ser mono-casco ou multi-casco. Tais aspectos estão embasados tendo como contexto o desenvolvimento de ASVs.

Estes dois aspectos garantem uma grande variedade de cascos. Geralmente os cascos utilizados em projetos de ASVs são ditos de alta performance por apresentarem características peculiares quanto à resistência, manobrabilidade, controlabilidade, estabilidade entre outros; fica a cargo do projetista quantificar de modo adequado às características mais apropriadas à missão a ser executada pelo ASV.

Em determinados projetos de ASVs, como o desenvolvido na “Florida Atlantic University” (LEONESSA, 2004), foram feitas pesquisas de forma a encontrar um casco capaz de satisfazer qualquer tipo de missão, porém cascos multifuncionais não são aconselháveis, pois mesmo desenvolvendo todo o seu potencial, ele continua não sendo

a opção mais adequada, dada a quantidade de requisitos exigidos pelas mais diversas missões.

2.2.1- Análise Hidrostática.

A hidrostática dita a estabilidade do casco sob a ação da força da gravidade e do empuxo. A estabilidade é uma característica concernente a todos os corpos, e envolve o conceito de equilíbrio. Somente corpos que estão em equilíbrio estável têm estabilidade, ou seja, quando têm a tendência de voltar à configuração inicial em relação ao meio que os envolve, uma vez que dela é afastado. (MANNING, 1961).

A estabilidade de um casco pode ser avaliada pela altura metacêntrica, distância entre o centro de gravidade e o metacentro do navio, (figura 2.6), também conhecida como braço restaurador.

Existem três situações possíveis relacionadas à altura metacêntrica, que pode ser negativa, nula ou positiva. Quando esta altura é negativa, a embarcação é considerada instável; quando esta altura é nula, diz-se que a estabilidade é neutra e quando a altura é positiva a embarcação é considerada estável, (figura 2.6).

O critério de estabilidade para embarcações é dividido em duas componentes, longitudinal e transversal.

Pelo fato da maioria das embarcações possuírem o comprimento muito maior que a largura, apresentam maior estabilidade longitudinal que transversal. (GILLMER, 1982). A estabilidade longitudinal é praticamente a mesma para navios de mesmo comprimento, exceto para o caso dos SWATHs, que possuem uma pequena área de flutuação, comprometendo as duas componentes. (MANNING, 1964; DUBROVSKIY, 1997).

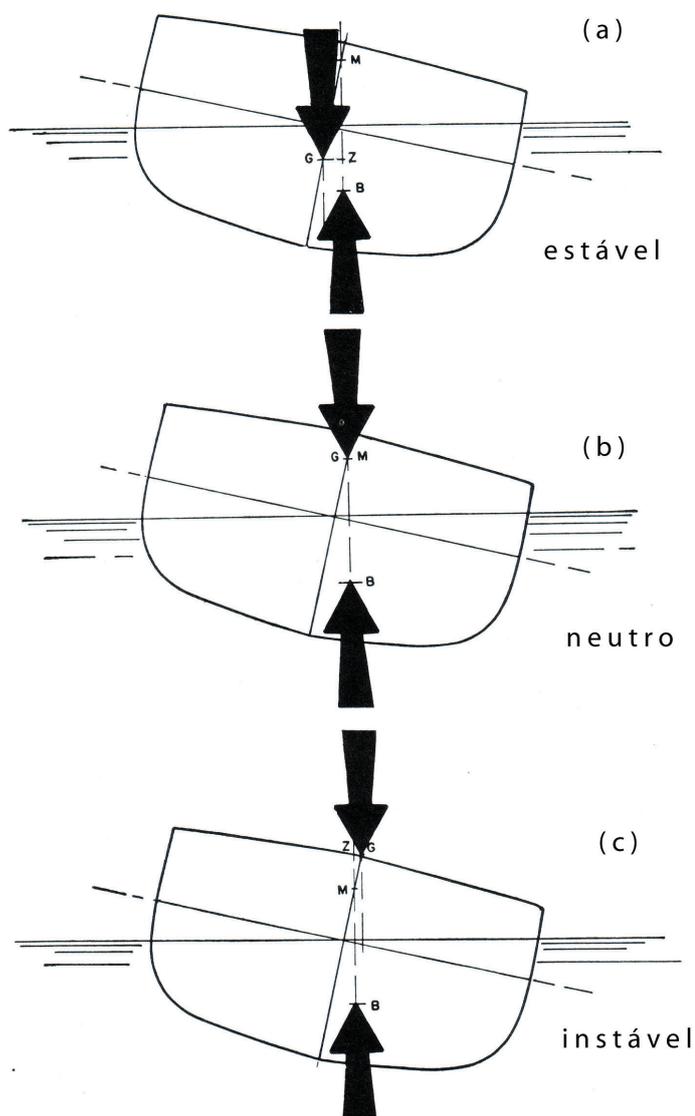


Figura 2.6- Relação entre a altura metacêntrica e a estabilidade.

A estabilidade transversal analisada com relação ao modo de navegar das embarcações, deve levar em consideração a estabilidade em diferentes regimes de velocidade. Embarcações de planeio e semi-planeio, navegando em baixas velocidades possuem estabilidade transversal idêntica aos cascos de deslocamento, porém em velocidades de planeio tornam-se relativamente mais estáveis transversalmente. (LEWIS, 1989).

Analisando a estabilidade transversal com relação à configuração dos cascos, deve levar em consideração que nos multi-cascos o centro de gravidade da embarcação e o metacentro de cada um dos cascos não está sobre a mesma normal, o que aumenta muito a força restauradora, (figura 2.7).

Como exemplo têm-se os catamarãs (embarcações de dois cascos), que possuem estabilidade transversal de 8 a 10 vezes superior a dos mono-cascos, tornando-os mais apropriados para plataformas de pesquisa e para o desenvolvimento de ASVs de caráter ambiental.

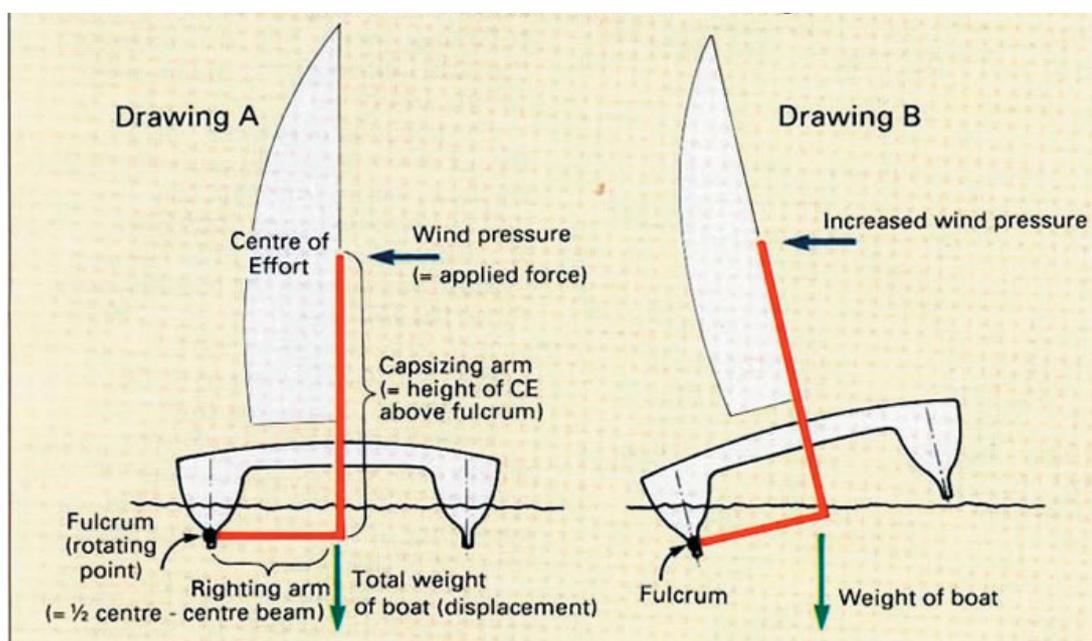


Figura 2.7- Altura metacêntrica dos catamarãs

2.2.2-Aspectos Hidrodinâmicos.

A análise hidrodinâmica dita a resistência ao avanço e o comportamento em ondas dos cascos.

Quanto menor a resistência ao avanço apresentada pelo casco, menor será o empuxo requerido para que a embarcação atinja a velocidade desejada, conseqüentemente menor será o empuxo gerado pelo hélice,

possibilitando o uso de motores de menor potência, o que diminui o consumo de energia das baterias, aumentando assim a autonomia da embarcação.

Com relação à suscetibilidade do casco ao impacto de ondas, é desejável que esta seja a menor possível. Segundo a teoria de controle moderno, o impacto de ondas é considerado um distúrbio, que é uma variável não manipulável de entrada da planta de controle. A modelagem matemática de tais distúrbios é complexa e inexata, dificultando todo o processo de elaboração do controlador de rumo (piloto automático) da embarcação, porém dependendo da suscetibilidade do casco ao impacto de ondas, tais distúrbios podem ser desprezados.

2.2.2.1- Resistência.

A resistência é a força que se opõem ao movimento de avanço da embarcação. Ela está relacionada ao deslocamento (volume de água deslocada pelo peso da embarcação), coeficiente de bloco (razão entre o volume deslocado de água e o volume do paralelepípedo), comprimento da linha d'água, superfície molhada e a velocidade. (TORNBLAD, 1987).

Por depender de vários fatores, torna-se extremamente difícil à obtenção de um método numérico exato, apto a estimar a resistência do casco, porém existem métodos empírico e semi-empíricos, fundados em resultados obtidos por meio de testes realizados em tanques de reboque.

Na concepção da engenharia naval, estes testes são realizados com modelos em escala da embarcação real, para tanto todos os parâmetros envolvidos neste teste devem ser proporcionais a escala, por exemplo

para fazer a correspondência entre as velocidades da embarcação real e do modelo é utilizado o número de Froude, tornando a velocidade adimensional.

No entanto, nem sempre é possível fazer essa correspondência, a este problema é atribuído o nome de fator escala, por exemplo é impossível fazer a correspondência entre os escoamentos, por meio do número de Reynolds e ao mesmo tempo manter a correspondência entre as velocidades, por meio do número de Froude. Outro exemplo é com relação a rugosidade da superfície do casco, mesmo porque os materiais utilizados no modelo são diferentes dos utilizados na embarcação real.

Tendo como contexto o desenvolvimento de ASVs, estes testes são bem precisos, pois os cascos utilizados durante os testes não possuem nenhum fator de escala com o casco utilizado em campo.

A resistência normalmente é dividida em quatro componentes: a resistência de fricção, a resistência de forma, a resistência de onda e a resistência ao vento. (LAMMEREN, 1948)

A resistência de fricção está relacionada à fenômenos inerentes ao escoamento de fluidos sobre uma superfície, proveniente da viscosidade do fluido. (LAMMEREN, 1948)

As partículas do fluido em contato direto com a superfície de um sólido aderem-se a esta superfície, de modo que a velocidade relativa entre as partículas e a superfície é nula, a uma dada distância da superfície a velocidade relativa das partículas é correspondente à velocidade do escoamento potencial, (figura 2.8). (HARVALD, 1983)

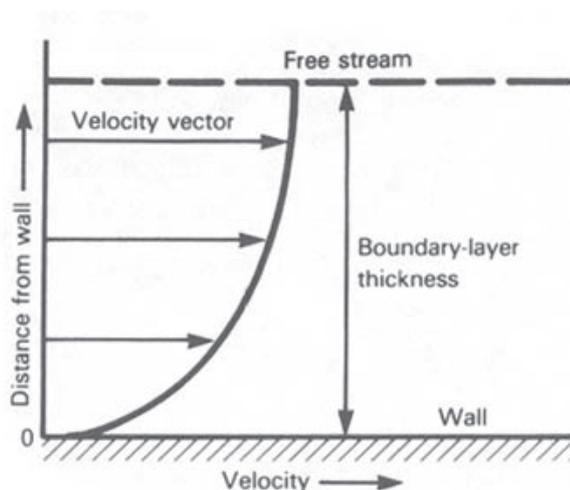


Figura 2.8- Distribuição de velocidade na camada limite.

Esta transição entre as velocidades relativas gera uma força tangencial em cada um dos pontos da superfície, a integração dessas forças tangenciais sobre toda a superfície molhada do casco é responsável pela resistência de fricção, também conhecida como resistência tangencial. (HARVALD, 1983)

A resistência de pressão está relacionada ao fenômeno de separação do escoamento numa superfície sujeita a um fluxo de fluido e os vórtices gerados em consequência deste fenômeno, oriundos da viscosidade do fluido, gerando alterações no campo de pressão no casco. (HARVALD, 1983) (LAMMEREN, 1948)

As partículas do fluido na parte posterior da camada limite, em decorrência da fricção com a superfície do objeto, perdem parte do seu momento, perdas maiores ocorrem devido à zona de alta pressão formada logo atrás do sólido. (HARVALD, 1983)

Em virtude da variação de pressão há uma inversão no escoamento entre a parede do objeto e o restante do escoamento laminar, gerando vórtices.

Este fenômeno gera uma força de resistência, que se opõem à conversão de velocidade em pressão, normal à superfície. Por este

motivo, esta resistência também é denominada de resistência normal. O fenômeno de separação do escoamento é dependente da geometria do objeto por isso tal resistência também é nomeada de resistência de forma, (figura 2.9). (HARVALD, 1983) (LAMMEREN, 1948)

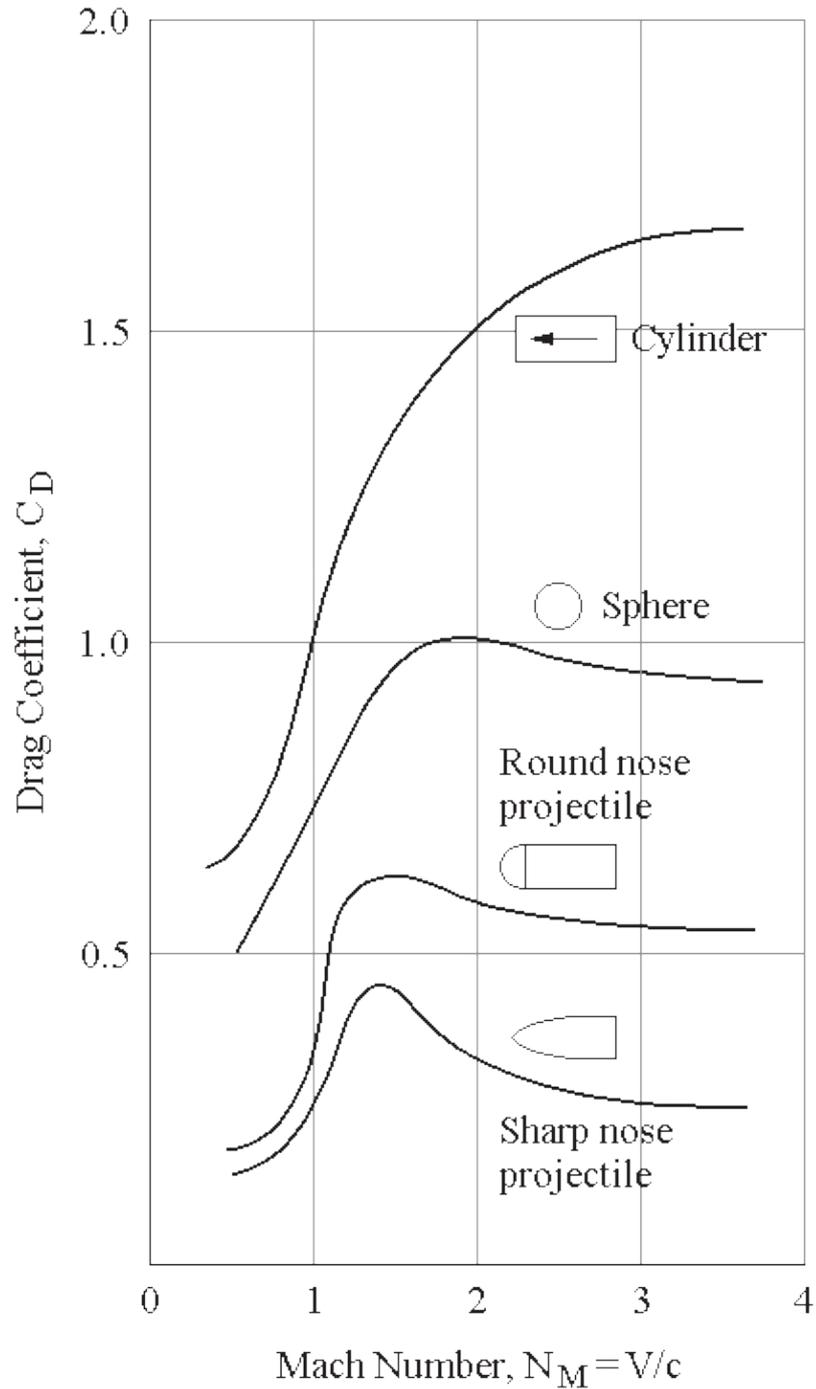


Figura 2.9- Coeficiente de resistência segundo a forma do objeto.

A resistência de onda, diferente das outras componentes apresentadas

anteriormente, não está relacionada à viscosidade do fluido e sim à conservação de energia. Esta componente pode ser dividida em duas outras componentes: a de transposição de onda, geralmente ignorada e a de formação de onda. (HARVALD, 1983) (LAMMEREN, 1948)

Pela teoria de conservação de energia, toda energia aplicada a um sistema não é perdida, mas transformada em outra espécie de energia. O mesmo ocorre quando um objeto desloca-se próximo, ou na interface entre dois fluidos, parte da energia cinética aplicada ao objeto é dissipada para o fluido, convertida em energia de natureza potencial, gerando assim ondas gravitacionais.

Ressaltando, este fenômeno só pode ser observado quando o objeto desloca-se próximo ou na interface entre fluidos. (HARVALD, 1983)

A quarta componente é a resistência do vento, proveniente de estruturas posicionadas sobre o casco. No caso dos ASVs esta componente é desprezada pelo fato deles não possuírem grandes estruturas acima d'água.

Um termo muito encontrado na arquitetura naval é resistência residual, que é a combinação entre a resistência de pressão e a de onda e pode ser definida como a diferença entre a resistência total e a resistência de fricção. (HARVALD, 1983) (LAMMEREN, 1948)

Em relação ao modo de navegar, pelo fato da superfície molhada ser maior, as embarcações de deslocamento possuem uma resistência maior que as de planeio e semi-planeio, em condições normais de operação, ou seja, no regime de velocidade nominal de projeto.

Com relação à configuração do casco, fica evidente que os multi-cascos possuem, uma resistência de fricção maior que os mono-cascos, pelo fato da superfície molhada ser maior. Outro fator de acréscimo na resistência nos multi-cascos, é a interferência hidrodinâmica gerada

pela proximidade dos cascos. (LEWIS, 1989).

No caso especial dos SWATHs, por possuírem uma área molhada 75% maior, se comparados aos mono-cascos de mesmo deslocamento, a resistência de fricção é muito maior.(LEWIS, 1989).

2.2.2.2- Susceptibilidade ao impacto de ondas.

O comportamento em ondas de um casco está relacionado à área de linha d'água.

As ondas ao se chocarem lateralmente com o casco, dissipam uma pequena parte de sua energia potencial, convertida em energia cinética, alterando o rumo da embarcação. Como resposta a este distúrbio, a planta de controle envia um sinal corretivo aos atuadores.

A geometria do casco, também influencia o comportamento da embarcação sob a ação de ondas. Os multi-cascos, por possuírem uma área de linha d'água maior que os mono-cascos, são mais suscetíveis ao impacto de ondas. Já o SWATH, dada a sua configuração peculiar, (figura 2.10), possui uma área de linha d'água reduzida, esta característica o torna menos suscetível ao impacto de ondas, em relação aos outros tipos de configuração de casco.

A consideração da perturbação de ondas afeta o projeto do piloto automático do ASV. Quanto maior a frequência das ondas e a susceptibilidade do casco ao impacto, maior pode ser a frequência de variação do sinal corretivo (ângulo do leme, ou rotação de propulsores por exemplo), aumentando o consumo de energia, afetando a autonomia da embarcação. Este consumo pode até ser desprezado para missões de curto período, porém, em missões de longa duração, pode ser significativo.

Uma alternativa seria a de se evitar que o controlador responda a tais perturbações. A implementação desta solução pode envolver a utilização de controladores tidos como clássicos (PD e PID) em conjunto com filtros de rejeição de banda, ou o emprego de controladores robustos, projetados para proporcionar ao sistema pequena sensibilidade às perturbações das ondas.

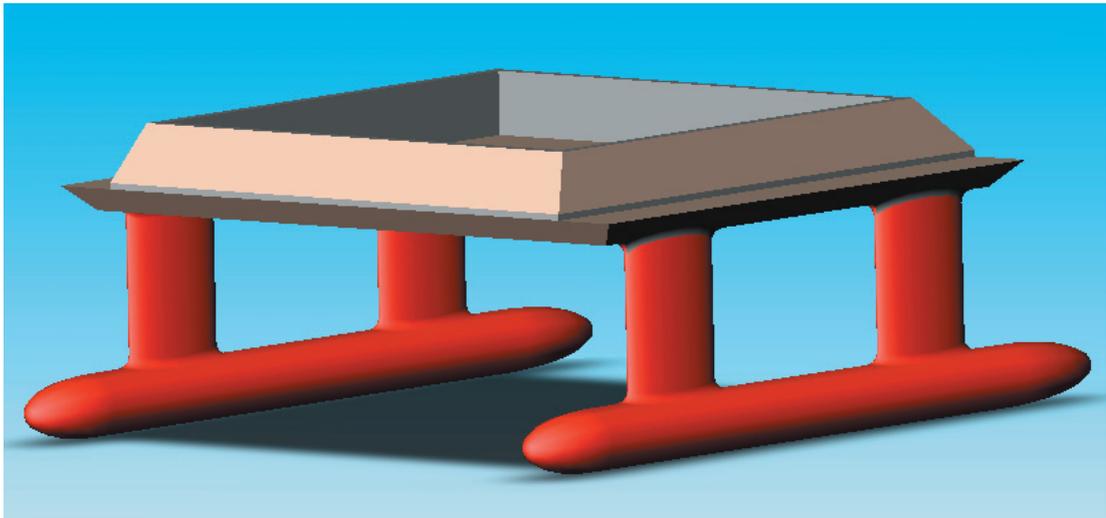


Figura 2.10- Exemplo de SWATH.

CAPÍTULO 3

GEOMETRIA DO HÉLICE.

Desde o princípio da navegação, o homem busca métodos para propeler as embarcações. Dentre todos os métodos inventados até o presente momento, o mais difundido é a propulsão a hélice.

O hélice mesmo sendo o mais utilizado, possui uma geometria peculiar, complexa, a qual inspira diversos temas de pesquisa, tanto com relação a melhorias no desempenho e conseqüentemente mudanças geométricas, como nos processos de fabricação de tais elementos.

Estes elementos de propulsão são classificados em famílias, cada uma com sua geometria particular. A geometria de cada família é descrita por um conjunto de tabelas, conhecidas como séries sistemáticas.

No presente capítulo, serão abordados os parâmetros que definem a geometria do hélice.

3.1- Sistemas de Coordenadas.

Para a descrição geométrica de um objeto e seu movimento no espaço, torna-se imprescindível a utilização de um sistema de coordenadas. Para descrever a geometria do hélice, também é necessário adotar um sistema de coordenadas apropriado.

Atualmente, o sistema de coordenadas adotado para a solução de problemas envolvendo os hélices, é o mesmo estabelecido durante

a décima ITTC (International Towing Tank Conference), de modo a atender as necessidades para análises tanto geométricas como hidrodinâmicas. (CARLTON, 1994)

O sistema de coordenadas proposto pela ITTC é local e solidário ao hélice, cujo eixo X coincide com o eixo de avanço, o eixo Y é perpendicular ao eixo de avanço e é denominado “linha de referência do hélice” ou “diretriz”, enquanto o eixo Z é estabelecido de forma a obter um sistema destorro, ou seja, os eixos positivos obedecem a regra da mão direita, (figura 3.1). Os eixos Y e Z definem um plano denominado por plano do hélice.

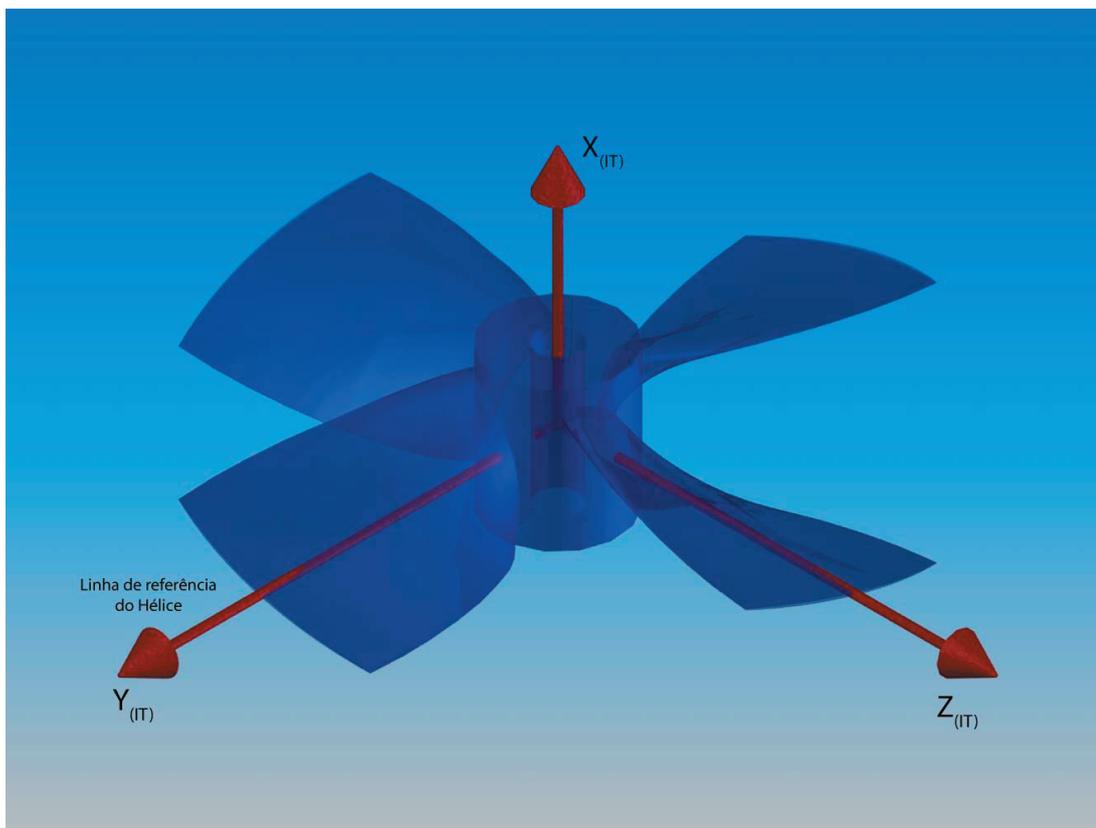


Figura 3.1- Sistema de coordenadas cartesiano do hélice.

Nesta dissertação, além do sistema de coordenadas anterior, será utilizado um sistema cilíndrico de coordenadas, com o objetivo de auxiliar a obtenção das secções de uma pá do hélice. Sua origem coincide

com a do sistema cartesiano definido. O cilíndrico S corresponde a uma circunferência cujo raio é dado em função de R . Da intersecção entre S e a pá do hélice, são obtidas as secções da pá, (figura 3.2).

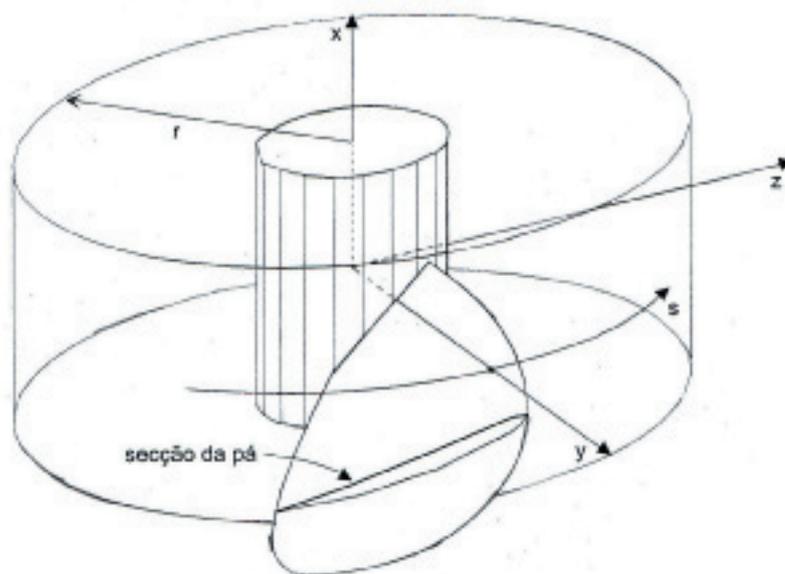


Figura 3.2- Sistema de coordenadas cilíndrico do hélice.

Em determinadas situações, é conveniente planificar o cilindro S , obtendo o plano XS , deste modo qualquer ponto sobre o cilindro S , pode ser representado pelo par ordenado (s,x) .

O programa AutoCAD, por manipular objetos em um ambiente 3D, possui um sistema de coordenadas cartesiano próprio, que difere do sistema proposto pela ITTC. Geralmente, quando há necessidade de se converter as coordenadas de um sistema para outro, deve-se realizar rotações, utilizando matrizes de rotação, e ou translações. Neste caso em particular, tais operações são desnecessárias, basta alterar a nomenclatura dos eixos (tabela 3.1).

Tabela 3.1- Correlação entre os eixos dos sistemas de coordenadas do AutoCAD e o proposto pela ITTC.

SISTEMA	Eixos do Hélice		
ITTC	X	Y	Z
AutoCAD	Y	Z	X

Doravante, quando se fizer necessário, as coordenadas apresentarão índices indicando o sistema em que estão expressas. Para o sistema do AutoCAD será atribuído o índice CAD, por exemplo, $X_{(CAD)}$; para o sistema da ITTC, será atribuído o índice IT, por exemplo, $X_{(IT)}$.

3.2 Parâmetros Geométricos do Hélice

Diversos são os parâmetros que definem a geometria do hélice. Parte deles são obtidos pelas séries sistemáticas e para defini-los, basta citar a família a qual o hélice pertence. O restante é definido de acordo com as especificações do projeto.

Um hélice é composto por um cubo central, denominado “bosso”, no qual o eixo de transmissão é fixado. Ao redor do bosso, são presas as pás. As pás do hélice possuem duas superfícies, a superior é denominada de “superfície de sucção”, a inferior é denominada de “superfície de pressão”, tomando como referencial o eixo X(CAD). As duas arestas formadas pelo encontro das superfícies são conhecidas por: “bordo de ataque” e “bordo de fuga”. Tendo em vista o sentido da rotação, o bordo de ataque precede o de fuga.

As secções das pás possuem um perfil semelhante aos das asas dos aviões e por isso recebem o nome de “perfil alar”. Ao comprimento linear de cada um dos perfis é dado o nome de “corda”.

Na descrição geométrica completa do hélice são necessários os

seguintes parâmetros:

3.2.1- Diâmetro

O diâmetro total do hélice, designado pela letra “D”, figura (3.3), corresponde ao diâmetro do círculo obtido pela projeção da trajetória da ponta da pá do hélice no plano YZ(IT). Esta medida é primordial na descrição da geometria do hélice, pois dela é proveniente a medida do raio, utilizado no adimensionamento dos demais parâmetros.

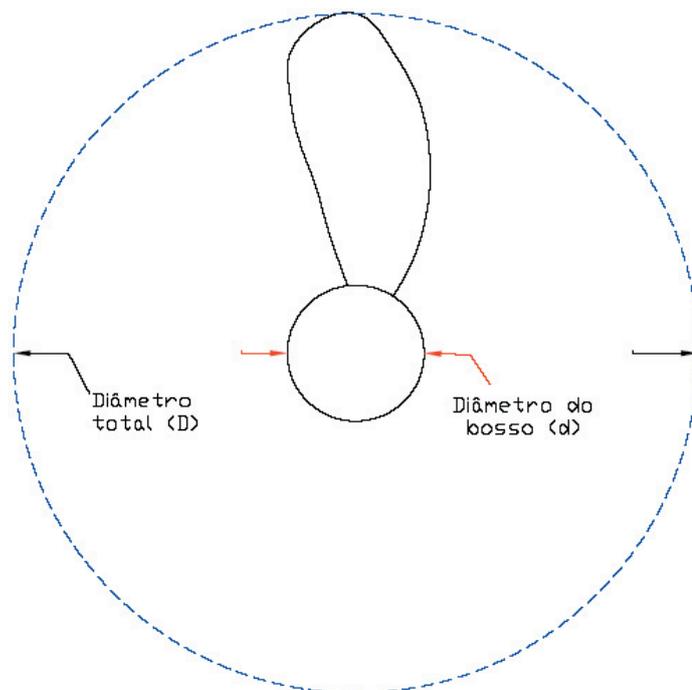


Figura 3.3- Diâmetros do hélice.

O diâmetro do bossô é designado pela letra “d”, (figura 3.3), cuja medida, para hélices de passo fixo, variam entre 18 a 20 % do diâmetro total, dependendo da família (TORNBLAD, 1987).

3.2.2- Passo (PITCH):

O termo passo vem de uma antiga analogia com os parafusos, usada para aproximar a ação do hélice. Esta analogia diz que o hélice penetra na água, assim como o parafuso penetra na madeira (TORNBLAD, 1987).

Teoricamente o passo é a distância percorrida pelo hélice ao longo do eixo X(IT), a cada revolução, (figura 3.4). Na prática, o hélice impulsiona a embarcação a uma distância menor, e a esta diferença entre as distâncias é atribuído o nome de “slip”.

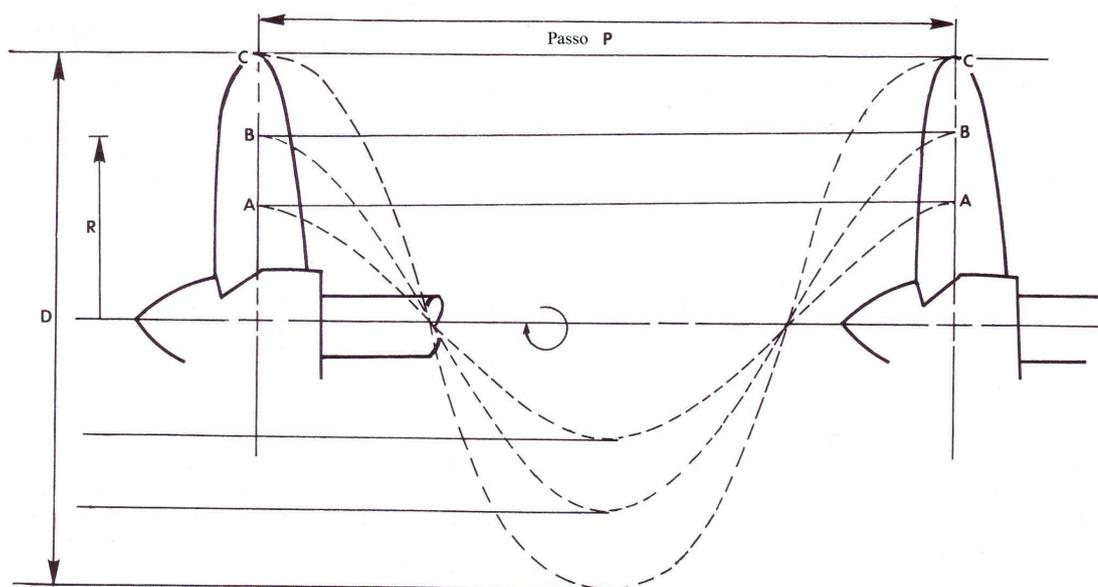


Figura 3.4- Definição de Passo

Parte da complexidade da superfície do hélice está relacionada ao passo, pois para que o hélice percorra a distância do passo, todas as secções da pá do hélice devem percorrer a mesma distância. Portanto, o ângulo de passo varia em função do raio, obedecendo à equação (3.1), conhecida como razão de passo (CARLTON, 1994).

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r} \right) \quad (3.1)$$

Sendo:

θ_p o ângulo de passo;

P o passo;

r o raio correspondente à secção;

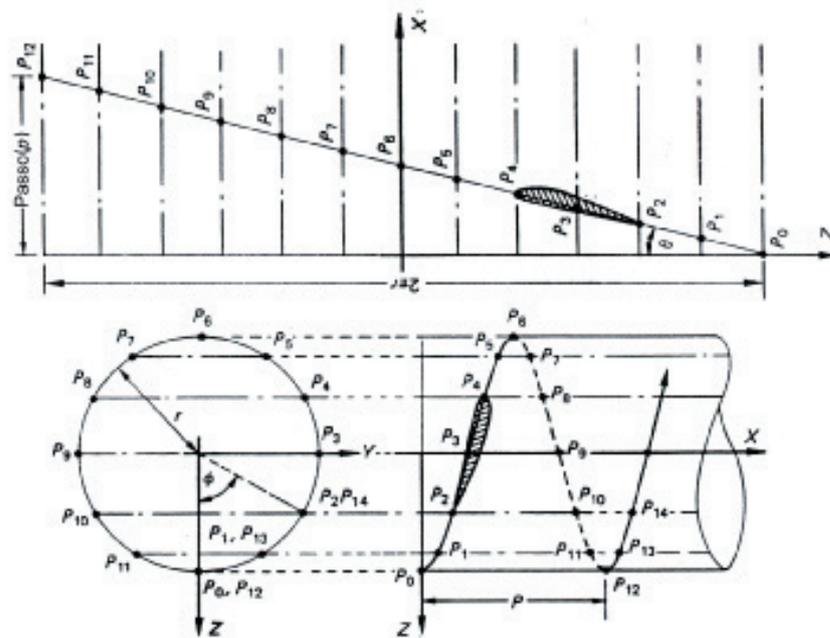


Figura 3.5- Ilustração do conceito trigonométrico da equação 3.1.

A equação (3.1) pode ser demonstrada aplicando-se conceitos básicos de trigonometria, conceito ilustrado na figura (3.5), na qual se tem a planificação da trajetória helicoidal descrita por uma dada secção da pá após uma revolução. Nesta planificação nota-se um triângulo retângulo, no qual o cateto menor corresponde

ao passo e o cateto maior corresponde ao perímetro do círculo correlato à secção. Sendo o ângulo formado pela intercessão do cateto maior com a hipotenusa o ângulo de passo da secção.

Normalmente, o passo a 70% do raio total é definido como o passo típico ou nominal. Frequentemente também é expresso de forma adimensional pela razão entre o passo e o diâmetro do hélice (P/D) (TORNBLAD, 1987).

3.2.3- Deslocamento Axial (Rake)

O deslocamento axial também é conhecido como inclinação da lâmina da pá e trata-se de um desvio na posição do ponto médio da corda das secções da pá em relação ao plano YZ(IT). Ele pode ser expresso como o ângulo de inclinação da pá inteira, ou pelo deslocamento local de cada secção em função do raio. Este deslocamento pode ser; tanto positivo como negativo, (figura 3.6).

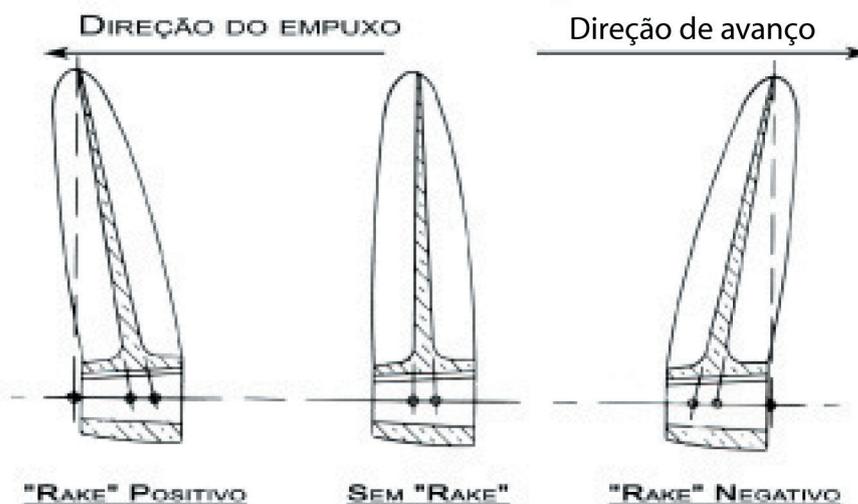


Figura 3.6- Tipos de deslocamento axial.

A principal vantagem de se aplicar o deslocamento axial na pá dos hélices, se deve ao aumento da área da pá e o conseqüente aumento do empuxo gerado, sem aumentar o diâmetro do hélice.

3.2.4- Ângulo de Enviesamento (Skew)

Este ângulo gera um deslocamento do ponto médio das cordas dos perfis das diversas secções da pá, em relação a linha de referência do hélice, (figura 3.7) tal deslocamento é proporcional ao produto entre o raio da secção em questão, pelo ângulo de enviesamento. (TORNBLAD, 1987).

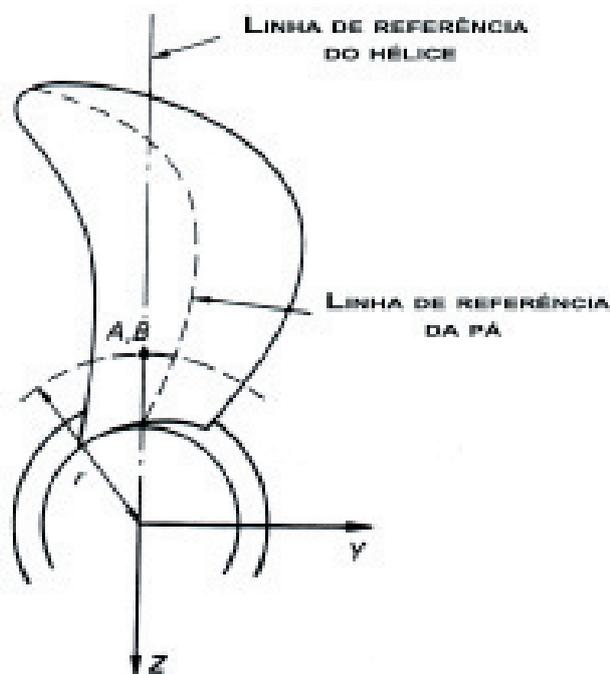


Figura 3.7- Ilustração do ângulo de enviesamento.

Este parâmetro pode ser expresso como o ângulo entre a linha

de referência da pá e a linha de referência do hélice, ou pelo deslocamento do ponto médio da corda como dito acima.

O ângulo de enviesamento é empregado com o intuito de reduzir a amplitude dos pulsos de vibração gerados pela pá, pois deste modo às secções da pá do hélice cortam a água mais suavemente, reduzindo assim a força da tensão superficial da água.

Geralmente hélices de velocidade moderada possuem baixos valores de ângulo de enviesamento, até mesmo nulo. Já hélices de velocidades médias e altas possuem valores mais altos.

3.2.5- Número de pás.

Não existe número ideal de pás para o hélice. Geralmente, este parâmetro varia de 2 a 7. Hélices que possuem o número de pás acima destes valores são empregados em casos muito particulares, como é o caso do hélice de 8 pás utilizado em submarinos nucleares.

O aumento do número de pás pode parecer vantajoso, pois o mesmo empuxo será gerado por um hélice de menor diâmetro. No entanto, tal aumento ocasiona um acréscimo na interferência do fluxo entre as pás, reduzindo a eficiência das mesmas.

Outro aspecto significativo na consideração sobre o aumento no número de pás é a elevação da frequência dos pulsos de vibração induzidos, porém a amplitude destes pulsos é reduzida.

Este parâmetro usualmente é definido conforme os requisitos do projeto. Não serve como regra geral, mas hélices de duas pás são habitualmente empregados em pequenas embarcações com motores de popa e em veleiros. Hélices com três pás são utilizados

em pequenos navios pesqueiros, navios costeiros e patrulheiros. Hélices com quatro pás são aplicados na maioria dos navios cargueiros e de passageiros. Hélices com cinco ou mais pás são empregados em casos que há necessidade de grande empuxo, porém a vibração também é um fator crucial, como é o caso dos superpetroleiros e navios de contêiner (TORNBLAD, 1987).

Estendendo a aplicação para veículos aquáticos não tripulados, os ASVs utilizam hélices de 3 à 5 pás e os ROVs utilizam hélices de 3 à 4 pás.

3.2.6- Área da pá.

Devido à forma complexa das pás, esta medida não é simples de se obter diretamente. Há duas medidas de área utilizadas. A primeira delas é a área projetada (A_p) da pá, que é definida como o somatório das áreas das sombras de cada uma das pás projetadas em um plano, gerada por uma fonte de luz colimada que incide diretamente sobre a pá. Outra medida utilizada é a área real (developed blade area = A_d) e pode ser definida como o somatório das áreas reais de uma das superfícies, de cada uma das pás (TORNBLAD, 1987).

Como se pode presumir, a área projetada sempre é menor que a área real, porém esta diferença é mínima e pode ser negligenciada. (GERR, 1989)

Este valor geralmente é expresso de forma adimensional como na razão de área da pá, obtida pela divisão entre a área expandida (AE), pela área do disco (AO), também conhecida como razão de área expandida, designada pela sigla EAR (Expanded Area

Ratio). Esta medida é a mais empregada durante a etapa de projeto. (TORNBLAD, 1987) (GERR, 1989).

A razão de área expandida da pá está diretamente relacionada à eficiência do hélice, pois quanto maior esta medida, maior será o arrasto gerado pela pá, ou seja, menos eficiente torna-se o hélice, já valores pequenos podem resultar em cavitação.

No intuito de se obter um valor apropriado para a EAR, a título de se evitar o fenômeno da cavitação, Keller propôs uma fórmula, na qual valores como pressão de vapor d'água são levados em consideração. Esta é expressa pela equação (3.2) (KUIPPER, 1992).

$$EAR = \left(\frac{(1,3 \cdot 0,3 \cdot Z) \cdot T}{(p_o - p_v) \cdot D^2} \right) + K \quad (3.2)$$

Sendo:

EAR a razão de área expandida;

Z o número de pás;

T o empuxo do hélice;

p_o a pressão sobre o hélice;

p_v a pressão de vapor d'água;

D o diâmetro;

K é um fator de correção.

Segundo Kuipper, o fator de correção K assume apenas dois valores; zero para cascos mais esbeltos, assim como nas embarcações militares; 0,2 para o restante das embarcações.

3.2.7- Perfil da pá.

Como descrito anteriormente, os perfis da pá do hélice são obtidos pela intersecção de uma superfície cilíndrica com a pá.

Atualmente, existe uma grande variedade de tipos de perfil para fins aerodinâmicos; desses, poucos são apropriados para uso em hélices. Geralmente, os mais apropriados são aqueles que possuem uma distribuição de pressão constante ao longo da corda, gerando uma grande força de sustentação com baixo risco de cavitação (TORNBLAD, 1987).

Destes poucos perfis adequados para hélice, os que são mais empregados pelos fabricantes são os perfis desenvolvidos pela NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), atual NASA (KUIPPER, 1992).

Esta agência, dada a experiência acumulada pelo histórico em pesquisas que datam desde a década de trinta, com perfis, desenvolveu alguns métodos que combinam duas das entidades que definem um perfil aerodinâmico, a distribuição de espessura e a linha de curvatura.(CARLTON, 1994)

As entidades que compõem e definem um perfil aerodinâmico (figura 3.8) são: o bordo de fuga e o de ataque, cuja definição é semelhante a da pá do hélice; a corda que é definida como a reta que une o bordo de ataque ao bordo de fuga; a linha média, também denominada linha de curvatura, que é definida como a linha eqüidistante entre a superfície de sucção e a de pressão; a curvatura é definida como a distância máxima entre a corda e a linha média; a espessura é definida como a maior distância, perpendicular à linha média, entre a superfície de pressão e a de

sucção.(ABBOTT, 1949)

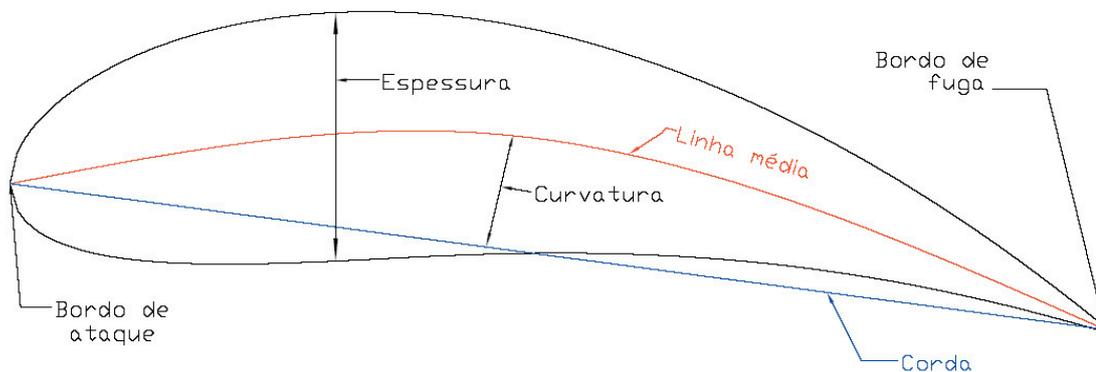


Figura 3.8- Entidades que compõem um perfil aerodinâmico

Tanto a curvatura como a espessura, são adimensionados em função da corda e suas respectivas posições, sobre a corda, também são fornecidas adimensionadas da mesma forma.

O método desenvolvido pela NACA, independente da série, consiste em descrever tanto a linha média como a distribuição de espessura, por meio de polinômios, de forma a obter o perfil desejado. Maiores detalhes sobre estes métodos serão apresentados nos capítulos subseqüentes.

3.3 Séries Sistemáticas

As séries sistemáticas são um conjunto de tabelas que definem a geometria de cada uma das famílias de hélice.

Essas tabelas são constituídas por números adimensionais, que possibilitam a parametrização da geometria do hélice, com relação a poucas variáveis.

A principal meta das séries sistemáticas é padronizar a geometria das famílias de hélice, tornando o ato de projetar e selecionar hélices, uma tarefa sistemática.

Nos tópicos subseqüentes, será apresentada a série sistemática

de duas famílias de hélices, aplicáveis ao projeto de veículos como: ASVs, ROVs e AUVs; utilizadas para o desenvolvimento da ferramenta numérica proposta pelo autor, que será apresentada no próximo capítulo.

3.3.1 Família Kaplan.

A família de Hélices Kaplan, (figura 3.1), foi desenvolvida para uso em dutos ou turbinas. Ela é largamente empregada em embarcações que operam em baixas velocidades e alto carregamento como: rebocadores, propulsores laterais de grandes embarcações e robôs submarinos. Os dutos são empregados com o objetivo de regularizar o escoamento sobre o hélice, conseqüentemente reduzir as oscilações de empuxo e torque. (PADOVEZI, 1997)

Nestas hélices, a corda da secção da ponta da pá é maior que a corda da secção da raiz. Tal peculiaridade geométrica permite que esta família usufrua das vantagens de operar junto à camada limite da parte interna do duto, reduzindo as perdas de empuxo na ponta da pá. (PADOVEZI, 1997)

O contorno da pá é uma das características, visualmente, mais marcante em um hélice. Apenas observando-se o contorno da pá de um hélice é possível distinguir a família a que pertence. Esta característica é determinada pela distribuição radial do comprimento de corda que nesta família é calculada pela equação (3.3). (KUIPPER, 1992)

$$Cr(r) = \frac{K(r) \cdot D \cdot EAR}{Z} \quad (3.3)$$

Sendo:

D o diâmetro total;

EAR a razão de área expandida;

Z o número de pás;

K(r) um fator próprio da família Kaplan;

O fator K(r) e os demais parâmetros geométricos estão relacionados na tabela (3.2).

Tabela 3.2- Valores da série sistemática para a família Kaplan. (KUIPPER, 1992)

r/R	K(r)	Skew/Cr	t _{max} /D	Xt _{max} /Cr	Kf(r)	Rake
0,2	1,322	0,050	0,040	0,35	0,287	Não possui deslocamento axial
0,3	1,508	0,028	0,0352	0,398	0,183	
0,4	1,667	0,013	0,030	0,460	0,115	
0,5	1,831	0,006	0,0245	0,491	0,072	
0,6	1,970	0,00	0,0190	0,50	0,00	
0,7	2,084	0,00	0,0138	0,50	0,00	
0,8	2,167	0,00	0,0092	0,50	0,00	
0,9	2,218	0,00	0,0061	0,50	0,00	
1	2,419	0,00	0,0050	0,50	0,00	

A espessura da pá é determinada segundo os esforços estruturais a que o hélice é submetido. A série sistemática contém os valores máximos de espessura para cada uma das secções da pá, adimensionados em função do diâmetro total do hélice, sob a variável t_{max}. A série também contém a posição da espessura máxima sobre a corda do perfil, sob o valor de Xt_{max}.

A curvatura máxima das secções, para esta família, é calculada pela equação (3.4), conhecida como distribuição radial de máxima curvatura.(KUIPPER, 1992)

$$f_{\max} = \frac{t_{\max}}{2} - Kf(r) \cdot t_{\max} \quad (3.4)$$

Sendo:

t_{\max} a espessura máxima da secção;

$Kf(r)$ um fator próprio da família Kaplan;

Nas séries sistemáticas, a geometria das secções da pá é definida de uma forma diferente da utilizada em perfis aerodinâmicos. Como ponto de referência é utilizado a posição de espessura máxima sobre a corda. Todos os pontos tanto da superfície de sucção como de pressão, são dados em porcentagem da corda com relação a este ponto de referência e adimensionados em relação à espessura máxima.(KUIPPER, 1992)

Deste modo, a geometria é definida em quatro partes: a primeira são os pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de ataque, tabela (3.3); a segunda são os pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de fuga, tabela(3.4); a terceira são os pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de ataque, tabela(3.5); a quarta são os pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de fuga, tabela(3.6). (KUIPPER, 1992)

Tabela 3.3- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de ataque.

r/R	20%	40%	60%	80%	90%	95%
0,2	97,92	90,83	77,19	55,00	38,75	27,40
0,3	97,63	90,06	75,62	53,02	37,87	27,57
0,4	97,22	88,89	73,61	50,00	34,72	25,83
0,5	96,77	87,10	70,46	45,84	30,22	22,24
0,6	96,47	85,89	68,26	43,58	28,59	20,44
0,7	96,58	86,33	69,24	45,31	30,79	22,88
0,8	96,76	87,04	70,84	48,16	34,39	26,90
0,9	97,17	88,09	72,94	51,75	38,87	31,87
1	97,00	88,00	73,00	52,00	39,25	32,31

Tabela 3.4- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de fuga.

r/R	Bordo de fuga	80%	60%	40%	20%
0,2	--	38,23	63,65	82,40	95,00
0,3	--	39,05	66,63	84,14	95,86
0,4	--	40,56	66,94	85,69	96,25
0,5	--	41,77	68,59	86,42	96,60
0,6	--	43,58	68,26	85,89	96,47
0,7	--	45,31	69,24	86,33	96,58
0,8	--	48,16	70,84	87,04	96,76
0,9	--	51,75	72,94	88,09	97,17
1	--	52,00	73,00	88,00	97,00

Tabela 3.5- Pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de ataque

r/R	20%	40%	60%	80%	90%	95%	Bordo de ataque
0,2	0,21	1,46	4,37	10,52	16,04	20,62	33,33
0,3	0,12	0,83	2,72	6,15	8,28	10,30	21,18
0,4	--	0,42	1,39	2,92	3,89	4,44	13,47
0,5	--	0,17	0,51	1,02	1,36	1,53	7,81

Tabela 3.6- pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de fuga

r/R	Bordo de fuga	80%	60%	40%	20%
0,2	20,21	7,29	1,77	0,1	--
0,3	13,85	4,62	1,07	--	--
0,4	9,17	2,36	0,56	--	--
0,5	6,62	0,68	0,17	--	--

3.3.2 Família B-Troost

Hélices B-Troost, (figura 4.21), são considerados convencionais, portanto, esta família é muito difundida no meio naval. Sua aplicação é vasta, abrangendo desde pequenas embarcações de passeio, até transportadores de maior porte.

Embora possua uma geometria distinta da família Kaplan, as equações utilizadas no cálculo dos parâmetros, distribuição radial de comprimento de corda e distribuição radial de máxima curvatura,

são idênticas às equações (3.3) e (3.4), respectivamente. A diferença encontra-se nos valores numéricos dos fatores empregados em cada caso. Para a B-Troost, estes fatores e os outros parâmetros geométricos, estão listados na tabela (3.7).

Além do contorno da pá ser diferente da Kaplan, outro diferencial está na inclinação da pá, pois hélices da família B-Troost possuem um deslocamento axial de 15°.

Tabela 3.7- Valores da série sistemática para a família B-Troost. (KUIPPER, 1992)

r/R	K(r)	Skew/Cr	Xt _{max} /Cr	Ar	Br	Kf	Rake
0,2	1,662	0,117	0,350	0,0526	0,0040	0,330	15°
0,3	1,882	0,113	0,350	0,0464	0,0035	0,271	
0,4	2,050	0,101	0,351	0,0402	0,0030	0,193	
0,5	2,152	0,086	0,355	0,0340	0,0025	0,101	
0,6	2,187	0,061	0,389	0,0278	0,0020	0,023	
0,7	2,144	0,024	0,443	0,0216	0,0015	--	
0,8	1,970	-0,037	0,486	0,0154	0,0010	--	
0,9	1,582	-0,149	0,50	0,0092	0,0005	--	
1	--	--	0,50	0,0030	0,00	--	

A espessura máxima de cada secção da pá, para esta família, é calculada pela equação de distribuição radial de espessura máxima, equação (3.5).

$$t_{\max} = D \cdot (Ar - Br \cdot Z) \quad (3.5)$$

Sendo:

D o diâmetro total do hélice;

Ar fator dado na tabela (3.7);

Br fator dado na tabela (3.7);

Z o número de pás do hélice;

O método de obtenção da geometria de cada secção da pá é idêntico ao método empregado na família Kaplan, e os valores estão listados nas tabelas seguintes.

Tabela 3.8- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de ataque.

r/R	20%	40%	60%	80%	90%	95%	Bordo de ataque
0,2	98,60	94,50	87,00	74,40	64,35	56,95	--
0,3	98,40	94,00	85,80	72,50	62,65	54,90	--
0,4	98,20	93,25	84,30	70,40	60,15	52,20	--
0,5	98,10	92,40	82,30	67,70	56,80	48,60	--
0,6	98,10	91,25	79,35	63,60	52,20	43,35	--
0,7	97,60	88,80	74,90	57,00	44,20	35,00	--
0,8	97,00	85,30	68,70	48,25	34,55	24,45	--
0,9	97,00	87,00	70,00	45,15	30,10	22,00	--

Tabela 3.9- Pontos da superfície de sucção entre o ponto de referência e o bordo de fuga.

r/R	Bordo de fuga	80%	60%	40%	20%
0,2	--	53,35	72,65	86,90	96,45
0,3	--	50,95	71,60	86,80	96,80
0,4	--	47,70	70,25	86,55	97,00
0,5	--	43,40	68,40	86,10	96,95
0,6	--	40,20	67,15	85,40	96,80
0,7	--	39,40	66,90	84,90	96,65
0,8	--	40,95	67,80	85,30	96,70
0,9	--	45,15	70,00	87,00	97,00

Tabela 3.10- Pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de ataque

r/R	20%	40%	60%	80%	90%	95%	Bordo de ataque
0,2	0,45	2,30	5,90	13,45	20,30	26,20	40,00
0,3	0,05	1,30	4,60	10,85	16,55	22,20	37,55
0,4	--	0,30	2,65	7,80	12,50	17,90	34,50
0,5	--	--	0,70	4,30	8,45	13,30	30,40
0,6	--	--	--	0,80	4,45	8,40	24,50
0,7	--	--	--	--	0,40	2,45	16,05
0,8	--	--	--	--	--	--	7,40

Tabela 3.11- pontos da superfície de pressão entre o ponto de referência e o bordo de fuga

r/R	Bordo de fuga	80%	60%	40%	20%
0,2	30,00	18,20	10,90	5,45	1,55
0,3	25,35	12,20	5,80	1,70	--
0,4	17,85	6,20	1,50	--	--
0,5	9,70	1,75	--	--	--
0,6	5,10	--	--	--	--

3.4- Parametrização de curvas e superfícies.

As séries sistemáticas apenas definem os pontos dos perfis que descrevem a pá do hélice, porém não descrevem uma superfície. Por isso, tomando como ponto de partida tais perfis fornecidos pelas séries sistemáticas, é necessária a interpolação entre os mesmos para que a superfície do hélice seja construída.

A superfície do sólido pode ser definida pela parametrização de curvas que passam pelos pontos dos perfis calculados. A parametrização consiste em uma aproximação por polinômios que definem partes da curva.

Toda curva possui certo número de propriedades e estas são utilizadas como meio de distinção entre tais entidades. Exemplificando, tem-se que toda curva é definida por meio de pontos de controle, quando passam por estes pontos de controle, diz-se que realizou uma interpolação, caso contrário foi realizado uma aproximação. Quando a alteração de um ponto de controle afeta toda a curva, indica que tal entidade possui controle global, quando a alteração de um ponto de controle afeta apenas parte da curva, ela possui controle local.

Outra propriedade importante vinculada às curvas é a continuidade, principalmente se a curva for utilizada para definir uma superfície funcional, ou seja, uma superfície com restrições físicas. Existem quatro categorias de continuidade, a continuidade geométrica zero ($G0$), que ocorre quando o ponto final de uma curva é o ponto inicial da outra. A continuidade geométrica um ($G1$), que ocorre quando a direção dos vetores tangentes é igual. A continuidade paramétrica um ($C1$), que ocorre quando os vetores tangentes são iguais em amplitude e a continuidade paramétrica de ordem “n”, que ocorre quando a derivada

de ordem “n” dos vetores tangentes é igual em amplitude.

Na parametrização o comportamento da curva em relação a cada um dos eixos é definida por polinômios independentes, conforme a equação (3.7). Dada à dificuldade de encontrar uma única curva que se aproxime à desejada, geralmente, são utilizados polinômios de 3º grau (cúbicas), equação (3.7). Isto se deve ao fato que curvas de menor grau podem ser não coplanares, além de oferecerem pouco controle da forma da curva. Já curvas de maior grau podem originar oscilações indesejáveis e necessitam de mais cálculo.

As coordenadas de qualquer ponto de uma curva são dadas em função de um parâmetro “t”, cujo valor varia de 0 a 1 conforme a equação (3.6).

$$Q(t) = [x(t), y(t), z(t)] \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} x(t) = a_x \cdot t^3 + b_x \cdot t^2 + c_x \cdot t + d_x \\ y(t) = a_y \cdot t^3 + b_y \cdot t^2 + c_y \cdot t + d_y \\ z(t) = a_z \cdot t^3 + b_z \cdot t^2 + c_z \cdot t + d_z \end{cases}, 0 \leq t \leq 1 \quad (3.7)$$

As equações (3.7) podem ser escritas na forma matricial, de acordo com a equação (3.8).

$$Q(t) = T \cdot C = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \\ d_x & d_y & d_z \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Sendo:

T o vetor dos parâmetros ;

C a matriz de coeficientes ou de base.

Atualmente existem três tipos de curvas paramétricas mais

empregados nos programas de CAD: Hermite, Bèzier, Spline (B-Spline), cada qual com propriedades distintas, capazes de solucionar grande parte dos problemas relacionados à modelagem geométrica de objetos.

As curvas de Hermite são definidas por dois pontos de controle e dois vetores tangentes a eles, obtidos pelas derivadas nos pontos. Este tipo de curva interpola os pontos de controle, sendo esta uma das vantagens do uso deste tipo de curva, a outra se deve a simplicidade de construção, porém como desvantagens têm-se apenas a continuidade $G1$, não garantindo a continuidade entre os segmentos de curva e o controle, assim como nas curvas de Bèzier, também é global.

As curvas de Bèzier foram inicialmente desenvolvidas para o desenho de carrocerias de automóveis e são fundamentadas no algoritmo de Casteljau. Tal curva é determinada por quatro pontos de controle sendo que ela interpola apenas o primeiro e o último ponto.

Das grandes vantagens deste tipo de curva, tem-se a simplicidade de construção, não havendo necessidade de se conhecer os vetores tangentes. Como desvantagens, têm-se a continuidade apenas do tipo $G1$, o que não garante a continuidade entre os segmentos de curva. Além disso o controle é global.

As curvas Splines, foram desenvolvidas com base em uma longa régua de metal flexível, utilizada para delinear cascos de embarcações, aviões, entre outros. Deste modo são curvas mais suaves, em comparação às curvas de Hermite.

A B-spline é um tipo específico da curva spline e é definida por quatro pontos de controle, os quais não interpolam a curva, sendo esta sua principal desvantagem, como vantagens têm-se o controle local e este tipo de curva possui continuidade $C0$, $C1$ e $C2$, por isso são

muito empregadas em sistemas de CAD tanto nos comerciais como nos dedicados. Suas equações são:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot N_{i,k}(t)$$

$$N_{i,k}(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k} - t_i} \cdot N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1} - t}{t_{i+k+1} - t_{i+1}} \cdot N_{i+1,k-1}(t)$$

Sendo:

P_i os pontos de controle;

n o número de pontos do polígono de controle;

k o grau da curva B-spline;

$N_{i,k}(t)$ funções de mistura “blending”, cujo grau é $k-1$.

A superfície do hélice será representada pelo conjunto de curvas B-splines, geradas para interpolar os pontos correspondentes de todos os perfis, sendo este um dos métodos existentes, presente em alguns dos programas de CAD comerciais.

Como um dos objetivos deste trabalho de mestrado é a obtenção do modelo sólido do hélice, utilizando-se programas comerciais de CAD, tais equações foram empregadas de forma indireta, como será exposto no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

FERRAMENTA NUMÉRICA DE AUXÍLIO AO PROJETO DO HÉLICE.

Como dito em capítulos anteriores, pesquisas envolvendo ASVs, na sua grande maioria, abordam assuntos relacionados à navegação e controle, sendo o elemento propulsor negligenciado, dando-se preferência por obtê-los no mercado.

Tal ocorrência acarreta em aumento do custo do projeto e funcionamento inadequado do sistema.

Estes problemas não se restringem ao âmbito nacional, porém, no país tal situação é agravada por só recentemente esta categoria de robôs móveis de campo, ter entrado na lista de pesquisas, ou seja, o mercado ainda está defasado, não suprimindo todas as necessidades tecnológicas deste nicho.

A obtenção dos hélices poderia ser efetuada em estaleiros, porém, pelo fato desses elementos de propulsão, de dimensões tão reduzidas, não pertencerem à linha de produção, sua manufatura, nestes estabelecimentos, implica em aumento de custo.

Uma solução viável, em relação a custo, seria a obtenção de tais elementos, no mercado nautimodelista, porém, geralmente, os hélices produzidos para atender este mercado, não obedecem aos padrões exigidos pela engenharia naval, ou seja, não possuem as curvas dos

coeficientes de torque (Kq) e de empuxo (Kt), em função da razão de avanço (J), além de utilizarem materiais inapropriados, maleáveis, que em funcionamento alteram as características de propulsão dos hélices.

Em resposta a estes problemas, foi idealizada uma ferramenta numérica, capaz de calcular pontos da superfície do hélice, possibilitando a obtenção de um sólido, ou seja, um objeto dotado de massa e volume, por meio de técnicas de desenho auxiliada por computador (CAD).

Neste capítulo serão abordadas as fases de projeto para o desenvolvimento da ferramenta numérica, assim como a sua descrição e operação, finalizando com o estudo de casos.

4.1- Fases de Desenvolvimento

Desde sua concepção até a elaboração, a ferramenta numérica passou por diversas fases, que serão abordadas e discutidas a seguir.

A fase inicial está relacionada ao estudo da geometria de hélices e das séries sistemáticas. Os resultados obtidos nesta fase foram apresentados no capítulo anterior, não havendo necessidade de novas ressalvas.

Em seguida, passou-se à análise de uma ferramenta numérica, desenvolvida anteriormente, para o mesmo propósito.

4.1.1- Estudo de uma ferramenta numérica de referência.

De acordo com o conhecimento do autor, o único trabalho em âmbito nacional que propõem o desenvolvimento de uma ferramenta numérica para o projeto de hélices até o momento foi realizado por

Garcia, (GARCIA, 1997). A qualidade e o grau de detalhe disponível para o seu conhecimento, por se tratar de um trabalho desenvolvido neste departamento, qualificou-o como referência de partida para a concepção de uma nova ferramenta numérica. Os motivos para busca de uma ferramenta alternativa serão apresentados a seguir.

A ferramenta desenvolvida por Garcia, efetua uma modelagem matemática para interpolar a superfície da pá do hélice, empregando curvas “B-Spline”. Dispensa-se assim, o uso de funções de interpolação e otimização já existentes em programas de CAD comerciais, para se calcular explicitamente a superfície do hélice, embora esta não seja apresentada. A partir do cálculo da superfície, obtêm-se pontos que definem os perfis das pás. Os pontos de cada um dos perfis são interligados por meio de segmentos de reta.

Traçar uma curva “B-Spline” exige o uso de pontos de controle, ou seja, uma vez calculados os pontos por onde a curva deve passar, é necessário calcular os pontos de controle. Qualquer eventual erro numérico que ocorra durante o cálculo dos pontos de controle, resultam numa geometria totalmente inesperada. Sendo assim, para se gerar os perfis a partir de curvas B-Spline, pode ser necessária a utilização de polinômios de grau elevado, o que computacionalmente, torna-se instável, gerando geometrias imprevistas, (GARCIA, 1997). Este fato pode explicar a representação simplificada dos perfis por segmentos de reta, conforme mencionado anteriormente.

O programa de Garcia disponibiliza o mesmo número de perfis fornecido pelas tabelas da série sistemática e o cálculo da superfície do hélice é utilizado somente para a geração dos pontos destes perfis

A ferramenta numérica proposta por Garcia, foi implementada em linguagem C++, no compilador Visual C++ 5.0, utilizado para gerar

arquivos DLL (Dynamic Link Library). Estes arquivos são executados internamente no AutoCAD, tornando-se uma ferramenta interna do programa, dependente da versão do programa AutoCAD, na qual foi gerada.

Os recursos fornecidos pelo programa AutoCAD, são voltados ao ambiente gráfico, sendo nem sempre adequados aos cálculos necessários para o projeto do hélice, ou seja, não são utilizados de forma otimizada.

Com base nos argumentos apresentados na discussão anterior, foram concebidas as principais diretrizes para a implementação de uma nova ferramenta numérica:

- ▶ Uso de linguagem de fácil utilização e entendimento ao usuário, permitindo alterações posteriores e inclusão de mais séries sistemáticas.
- ▶ Maior versatilidade, permitindo a sua execução em mais de uma plataforma.
- ▶ Desenvolvimento de um código simples e inteligível.
- ▶ Precisão maior, calculando um maior número de pontos da superfície da pá do hélice.

4.1.2- Ambiente CAD apropriado

Uma vez instauradas as diretrizes a terceira fase de projeto consistiu em procurar um ambiente CAD apropriado.

Tal busca visava encontrar um programa de CAD, provido dos recursos necessários para a implementação da ferramenta. Porém, deste modo, haveria uma contradição com as diretrizes propostas anteriormente, pois desta maneira a ferramenta deveria ser implementada utilizando

as linguagens de difícil utilização, compatíveis com este ambiente e seria uma ferramenta interna de um dos programas investigados, conseqüentemente, dependente da versão do mesmo.

No intuito de satisfazer por completo as diretrizes, houve uma mudança de foco em tal busca, passando a centrar seus esforços em encontrar um programa de CAD capaz de satisfazer determinadas condições, caso a ferramenta numérica fosse implementada em outro ambiente.

Estas condições inerentes à obtenção de modelos sólidos de hélice estão listadas abaixo:

- ▶ Capacidade de salvar arquivos de código não restrito, possibilitando a escrita de tais arquivos em outros ambientes.

- ▶ Capacidade de lidar com importação e exportação de curvas tridimensionais, sem a perda de dados.

- ▶ Capacidade de gerar superfícies por meio de interpolação entre duas ou mais curvas tridimensionais.

- ▶ Capacidade de gerar sólidos dada uma superfície.

Particularmente, dos programas analisados, nenhum pode ser considerado uma plataforma de CAD totalmente completa, pois se constatou que cada um possui um tipo de debilidade, impossibilitando o uso de um programa exclusivo na obtenção de um modelo sólido de hélice.

O programa AutoCAD por exemplo foi o primeiro e único programa de CAD a lançar no mercado uma extensão de arquivos de código não restrito, facilitando a exportação e importação de desenhos entre os diversos programas existentes no mercado. Embora tal fato tenha seus méritos e seja muito útil para o desenvolvimento da ferramenta

numérica, todas as outras ferramentas contidas no AutoCAD são limitadas, o que dificulta a obtenção de modelos sólidos de superfícies complexas, apenas utilizando seu ambiente.

O programa Inventor 9 é produzido pela mesma empresa do AutoCAD, a Autodesk. Próprio para modelar sólidos, a estrutura adotada pela Autodesk, impossibilita a importação de curvas tridimensionais, mesmo utilizando arquivos DXF, com isso a coordenada Z(cad) é desprezada e as curvas tridimensionais são projetadas em um plano.

O programa Rhinoceros é indicado para finalidade artística, por isso a precisão dos comandos não é boa, em certos casos, como na interpolação entre curvas tridimensionais, ocorrem alguns desvios, porém seu desempenho em relação à importação de curvas tridimensionais é excelente.

O programa SolidWorks 2004 apresentou o melhor resultado de todos os investigados. Assim como o Inventor 9 ele é próprio para gerar sólidos, porém, a estrutura adotada por seu fabricante, permite a importação de curvas tridimensionais e o resultado da interpolação entre elas é excelente, contudo, assim como os programas citados anteriormente a obtenção de um sólido a partir de uma superfície é impraticável.

Já o programa Catia V5R11, dentre todos os investigados, pode ser considerado o mais completo. Ele é não só uma plataforma de CAD, mas também de CAE e CAM, por isso é muito empregado nas empresas. Justamente por ser uma plataforma integrada, ele se torna extremamente complexo. Portanto, pode-se afirmar que ele peca pelo excesso de requisitos necessários para a execução dos seus comandos, muitas vezes tornando-os extremamente complexos, de difícil utilização.

Sua habilidade de importar curvas tridimensionais de arquivos DXF

é semelhante ao Inventor 9. Em relação à interpolação de curvas o resultado é comprometido, dada a quantidade de requisitos necessários para a execução de tal comando. Entretanto sua habilidade em gerar sólidos a partir de uma superfície é excelente.

No intuito de sanar a debilidade de cada um dos programas, eles foram empregados em conjunto. Para o caso do hélice, o conjunto que apresentou os melhores resultados foi à cooperação entre o SolidWorks 2004 e o Catia V5R11.

Uma vez encontrados os programas de CAD ideais para a obtenção do modelo sólido do hélice, iniciou-se a próxima fase de projeto.

4.1.3- O Uso do MatLab.

Uma vez constatado que a ferramenta numérica deveria ser implementada fora do ambiente CAD, surgiu a necessidade de encontrar um ambiente adequado. Para isso foi cogitado o uso do programa MatLab.

O programa MatLab é muito empregado em engenharia, dada sua habilidade ímpar em efetuar cálculos. Ele possui um ambiente de programação poderoso, mas ao mesmo tempo simples.

Os programas desenvolvidos neste ambiente não são compilados em linguagem de máquina, que os torna acessíveis a qualquer usuário, permitindo mudanças posteriores.

Todas as qualidades presentes no Matlab, como estrutura de programação orientada a objeto, permitem estruturar a ferramenta numérica de modo a facilitar alterações posteriores e reduzir o uso dos recursos computacionais. Garantindo o cumprimento das diretrizes propostas anteriormente.

O MatLab também possibilita a implementação de uma interface gráfica, tornando a ferramenta numérica amigável a todo usuário.

4.1.4- Integração do MatLab com o ambiente CAD

Embora o MatLab seja uma excelente plataforma de cálculo para implementação da ferramenta numérica, os resultados desses cálculos devem ser convertidos em um desenho de CAD. Pelo fato do MatLab ser um ambiente de programação, originalmente ele não possui este recurso.

Esta fase do projeto consistiu em pesquisar métodos para realizar a integração do MatLab com o ambiente CAD.

Averiguou-se que esta integração poderia ser efetuada de duas maneiras, a primeira utilizando-se arquivos IGES, a segunda utilizando-se arquivos DXF. Para a seleção foram realizados testes comparativos entre estes arquivos e concluiu-se que a estrutura empregada em arquivos DXF era mais simples de se interpretar e reproduzir no ambiente de programação do MatLab.

Outro fator não decisivo, mas que contribuiu para a escolha deste tipo de arquivo, foi a disponibilidade de referências bibliográficas, facilitando o processo de integração.

Terminada esta seleção e com todas as outras fases concluídas, iniciou-se a implementação da ferramenta numérica. Ao longo desta etapa deparou-se com certas dificuldades e erros que serão comentados nos tópicos subseqüentes.

4.2- Descrição e Operação da Ferramenta Numérica

A ferramenta numérica foi implementada valendo-se das vantagens da estrutura de programação orientada a objeto, permitindo que programas sejam modulados em subprogramas, denominados funções. Deste modo, os programas tornam-se mais manipuláveis, pois cada uma das funções pode ser testada separadamente, facilitando alterações posteriores e até utilizações em outros programas.

Um programa, geralmente, possui diversas variáveis, sendo parte delas, apenas para satisfazer a lógica interna do programa, o valor dessas variáveis lógicas não tem utilidade para o usuário, quando se estrutura o programa em diversas funções, as variáveis lógicas, ao fim da execução de cada função, não ficam acumuladas na memória do computador, liberando recursos computacionais para a execução da próxima função.

A ferramenta numérica em sua totalidade é composta por um programa principal e 12 funções adjacentes, que serão descritos nos próximos tópicos.

4.2.1- Programa Principal.

O programa principal tem por finalidade armazenar na memória as variáveis de entrada do usuário e gerenciar a execução das funções, fornecendo e armazenando apenas as variáveis necessárias.

Por possuir o papel de gerenciador, no programa principal, evitou-se ao máximo o uso de controladores de fluxo e sentenças condicionais, melhorando seu desempenho. Tal artifício, só foi empregado nas

variáveis de entrada do usuário, para evitar a entrada de valores incorretos.

Executando o programa principal, nomeado “HéliceKa.m”, o usuário é indagado a fornecer o diâmetro total do hélice, em milímetros, a razão passo/diâmetro, o número de pás, a razão de área expandida, a quantidade de perfis a serem calculados e a família de hélice.

Estes dados são armazenados em variáveis, designadas segundo a convenção adotada na descrição dos parâmetros geométricos do hélice, ou seja, D, Pd, Z e EAR, respectivamente. A quantidade de perfis a ser calculado é armazenada sob a variável “delta”, este valor possibilita, por meio de interpolação, calcular não só os perfis fornecidos nas séries sistemáticas mas também os intermediários.

A princípio este valor foi limitado à faixa de 50 a 100 perfis, porém conforme o progresso do trabalho, descobriu-se que não havia vantagem em utilizar números tão elevados, primeiro pelo fato de exigir mais recurso computacional e segundo por tornar evidentes erros de arredondamento presentes nas séries sistemáticas.

Constatou-se que para a família Kaplan valores na faixa de 15 a 20 perfis eram suficientes para obter a precisão almejada, já a família B-Troost demonstrou ser mais passível a erros numéricos, portanto, a faixa é ainda menor, entre 9 a 15 perfis. Para satisfazer as duas famílias de hélice, o número de perfis calculados foi limitado à faixa de 9 a 20, cabendo ao usuário policiar-se durante o uso da ferramenta.

Após acumular na memória essas variáveis o programa principal calcula um vetor da posição radial dos perfis em função do diâmetro total e o número de perfis a ser calculado. Na seqüência ele executa as funções de forma ordenada e acumula na memória os valores de retorno. A seqüência de operação do programa principal, pode ser representada pelo fluxograma, (figura 4.1).

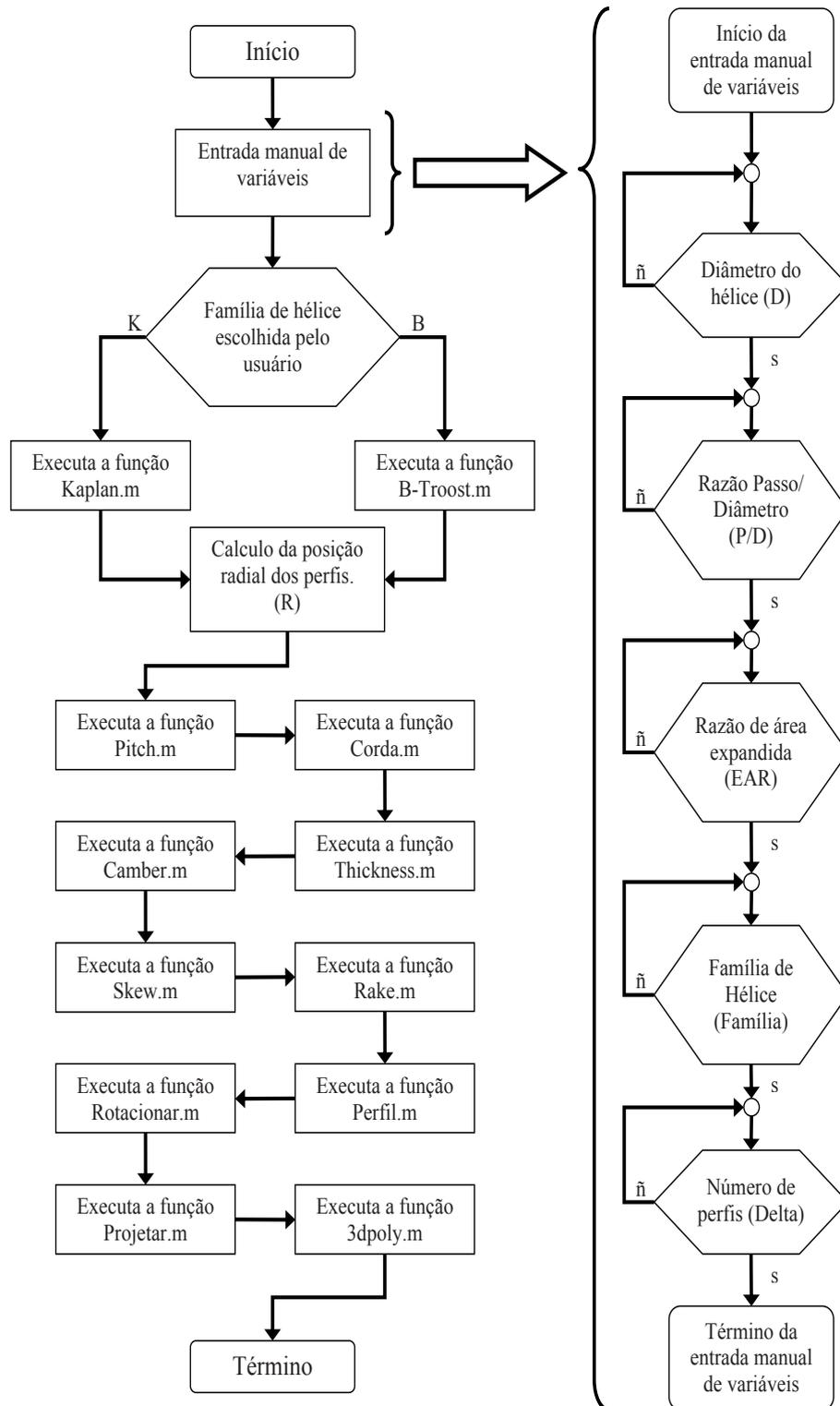


Figura 4.1- Fluxograma de operação do programa principal.

4.2.2- Função “Kaplan.m” e “B-Troost.m”

Estas duas funções são responsáveis por fornecer os parâmetros geométricos das séries sistemáticas, apresentadas no capítulo anterior, e são executadas segundo a escolha do usuário.

Além de disponibilizar apenas os dados necessários, não sobrecarregando a memória do computador, esta maneira de fornecer os dados das séries sistemáticas, por meio de funções distintas, facilita a inclusão de mais séries sistemáticas, exigindo alterações mínimas no programa principal e nas outras funções.

4.2.3- Função “Pitch.m”

Esta função tem por meta calcular a distribuição radial do ângulo de passo, para tal, aquisita do programa principal, valores como a razão passo diâmetro e a posição radial dos perfis, retornando um vetor com os valores da distribuição radial de passo.

Para o cálculo destes valores, esta função utiliza a equação (3.1), por ser um cálculo simples, esta função não utiliza sentenças condicionais, como exposto no algoritmo, (figura 4.2).

Esta função utiliza interpolação linear para calcular o passo dos perfis intermediários aos fornecidos pela série sistemática, satisfazendo o número de elementos presentes no vetor de posição radial dos perfis.

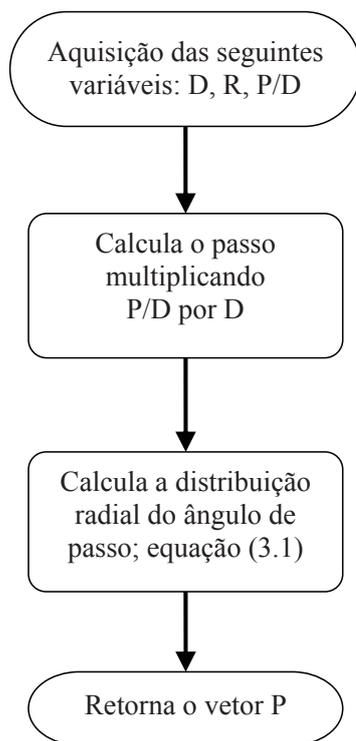


Figura 4.2- Algoritmo da função “Pitch.m”.

4.2.4- Função “Corda.m”

A função corda é responsável pelo cálculo da distribuição radial do comprimento de corda dos perfis. Para realizar tais cálculos, ela aquire do programa principal os dados necessários e aplica a equação (3.3), os valores obtidos são retornados ao programa principal, por meio de um vetor, (figura 4.3).

Esta função também utiliza interpolação linear para calcular o comprimento de corda dos perfis intermediários aos fornecidos pela série sistemática, satisfazendo o número de elementos presentes no vetor de posição radial dos perfis.

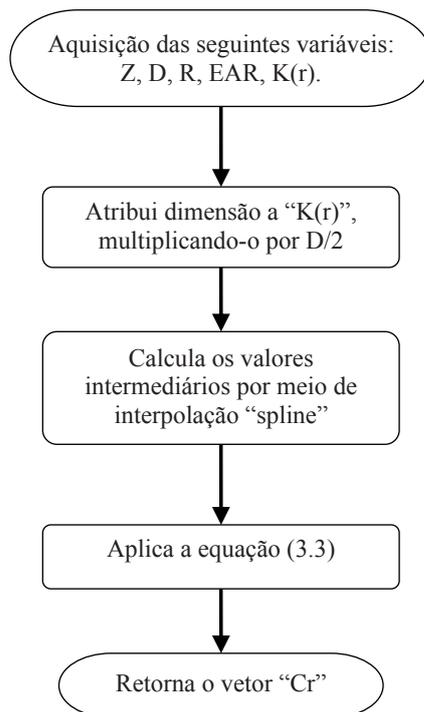


Figura 4.3- Algoritmo da função “Corda.m”.

4.2.5- Função “Thickness.m”

Esta função é responsável pelo cálculo da espessura máxima dos perfis e também pela posição sobre a corda dos perfis de máxima espessura. Como apresentado no capítulo anterior, cada uma das famílias de hélices possui métodos distintos de calcular estes valores. Na família Kaplan estes dados são obtidos diretamente da série sistemática, já a família B-Troost, utiliza a equação (3.5), portanto, há necessidade de sentenças condicionais para distinguir o método a ser utilizado, (figura 4.4).

Seja qual for o método, esta função utiliza a interpolação “spline” para obter os valores intermediários aos fornecidos pela série sistemática. Ao final dos cálculos, esta função, retorna dois vetores, um com a espessura máxima e o outro com a posição sobre a corda.

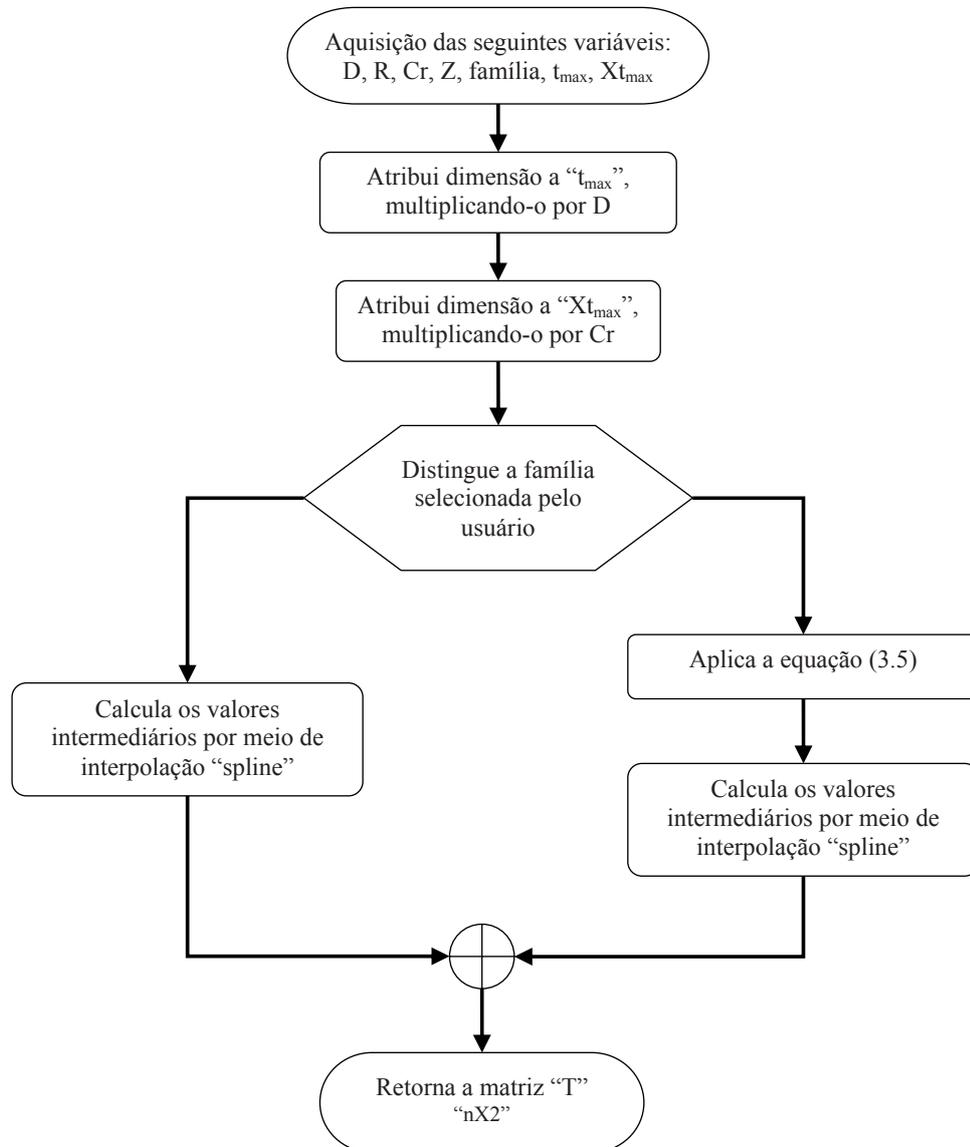


Figura 4.4- Algoritmo da função “Thickness.m”.

4.2.6- Função “Camber.m”

A função “Camber.m” é encarregada para o cálculo da curvatura máxima dos perfis. Tanto a família Kaplan como a família B-Troost, utilizam a equação (3.4) para este parâmetro, logo, não há necessidade do uso de sentenças condicionais.

Esta função aquisita do programa principal os dados necessários

para a realização dos cálculos e em seguida retorna os valores obtidos, na forma de um vetor, (figura 4.5).

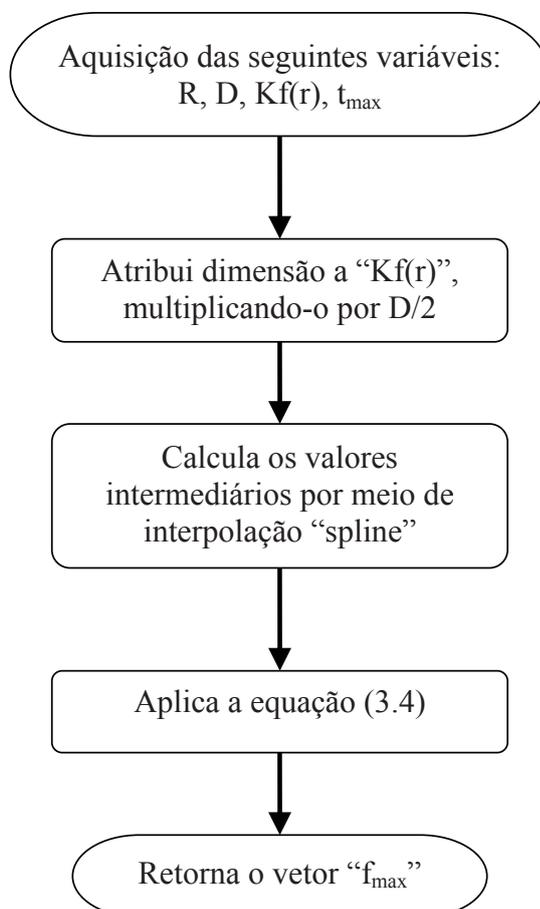


Figura 4.5- Algoritmo da função “Camber.m”

4.2.7- Função “Skew.m”

Esta função é incumbida de calcular o deslocamento do ponto médio da corda de cada um dos perfis. Este cálculo é simples, pois tal dado é fornecido diretamente na série sistemática, a principal tarefa é calcular o deslocamento dos perfis intermediários aos fornecidos pela série sistemática, por meio de interpolação “spline” .

Após a conclusão deste cálculo, a função retorna um vetor com os valores obtidos, (figura 4.6).

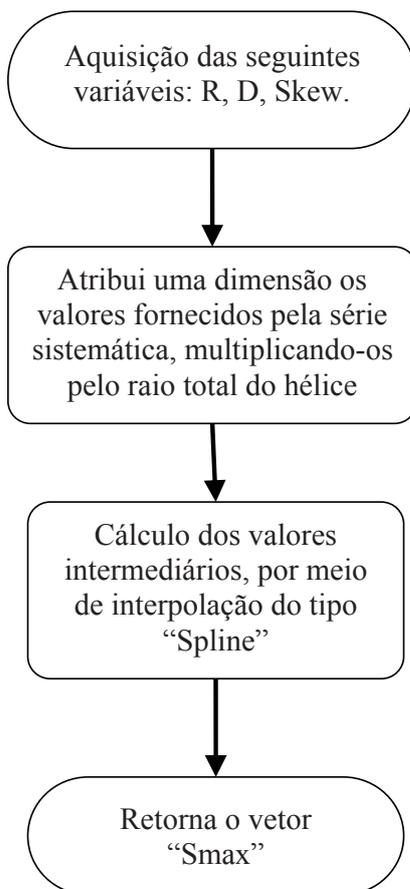


Figura 4.6- Algoritmo da Função “Skew.m”

4.2.8- Função “Rake.m”

A função “Rake.m” calcula a inclinação da pá do hélice, essa inclinação pode ser traduzida em um valor a ser subtraído da coordenada $Y_{(CAD)}$, para este cálculo, a função utiliza a seguinte equação:

$$yr = R \cdot \tan(Rake) \quad (4.1)$$

Sendo:

R o vetor de posição radial dos perfis;

“Rake” o ângulo de deslocamento radial.

Esta função é simples, não necessitando de sentenças condicionais

e nenhum tipo de interpolação, pois o vetor “R” possui o valor de todos os perfis a serem calculados, (figura 4.7).

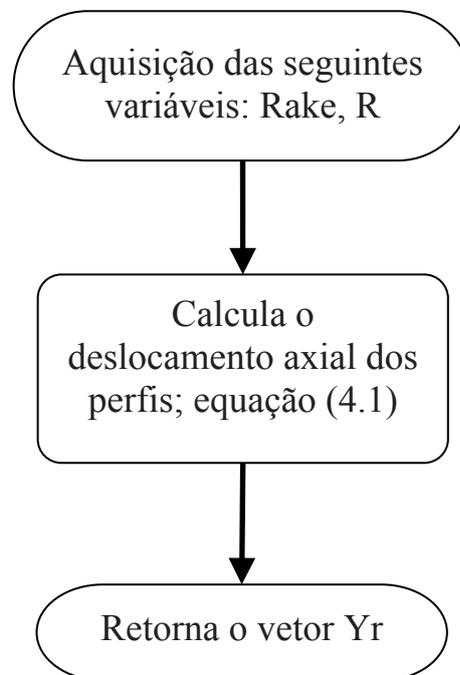


Figura 4.7- Fluxograma da Função “Rake.m”

4.2.9- Função “Perfil.m”

Esta função, é incumbida de calcular as coordenadas das superfícies de pressão e sucção, de cada perfil.

Para estes cálculos, poderiam ser utilizados os dados das tabelas, fornecidos pelas séries sistemáticas. Porém a quantidade de pontos gerados por este método é limitada, afetando a qualidade da geometria gerada. Outra opção, a adotada pelo autor, consiste em utilizar as equações dos perfis NACA, (4.2 e 4.3). A série de perfis utilizada foi a NACA de quatro dígitos, dada sua semelhança geométrica com os perfis da série sistemática. A vantagem deste método se deve pela possibilidade de calcular a quantidade de pontos necessária. Para o caso do hélice, constatou-se que 300 pontos eram suficientes.

O sistema de numeração para a família NACA de quatro dígitos é totalmente baseado na geometria do perfil. O primeiro número, corresponde à curvatura máxima, em porcentagem da corda. O segundo número, indica a posição sobre a corda de máxima curvatura, em décimos da corda. Os dois últimos números, correspondem à espessura máxima do perfil, em porcentagem da corda. (ABBOTT, 1949).

A primeira etapa realizada pela função “Perfil.m”, é o cálculo da distribuição de espessuras ao longo da corda dos perfis, utilizando a seguinte equação: (ABBOTT, 1949)

$$yt = \frac{t_{\max}}{0,2} \cdot (0,2969 \cdot \sqrt{x} - 0,126 \cdot x - 0,3516 \cdot x^2 + 0,2843 \cdot x^3 - 0,1015 \cdot x^4) \quad (4.2)$$

Sendo:

t_{\max} a razão entre a máxima espessura e a corda do perfil;

x a posição percentual do ponto sobre a corda.

A segunda etapa, é o cálculo das ordenadas da linha média dos perfis, valendo-se da equação seguinte:

$$\left\{ \begin{array}{l} yc = \frac{f_{\max}}{x_{\max}^2} \cdot (2 \cdot x_{\max} \cdot x - x^2) \\ \end{array} \right. \quad \{x \in R/0 \leq x \leq x_{\max}\} \quad (4.3a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} yc = \frac{f_{\max}}{(1 - x_{\max})^2} \cdot [(1 - 2 \cdot x_{\max}) + 2 \cdot x \cdot x_{\max} - x^2] \\ \end{array} \right. \quad \{x \in R/x_{\max} < x \leq 1\} \quad (4.3b)$$

Sendo:

f_{\max} a curvatura máxima, expressa como fração da corda;

x_{\max} posição sobre a corda de máxima curvatura;

A ordenada final dos perfis é dada pela soma de $yt+yc$.

Ao final dos cálculos, esta função retorna duas matrizes “mXn”, sendo “m” a quantidade de pontos do perfil e “n” número de perfis, (figura 4.8).

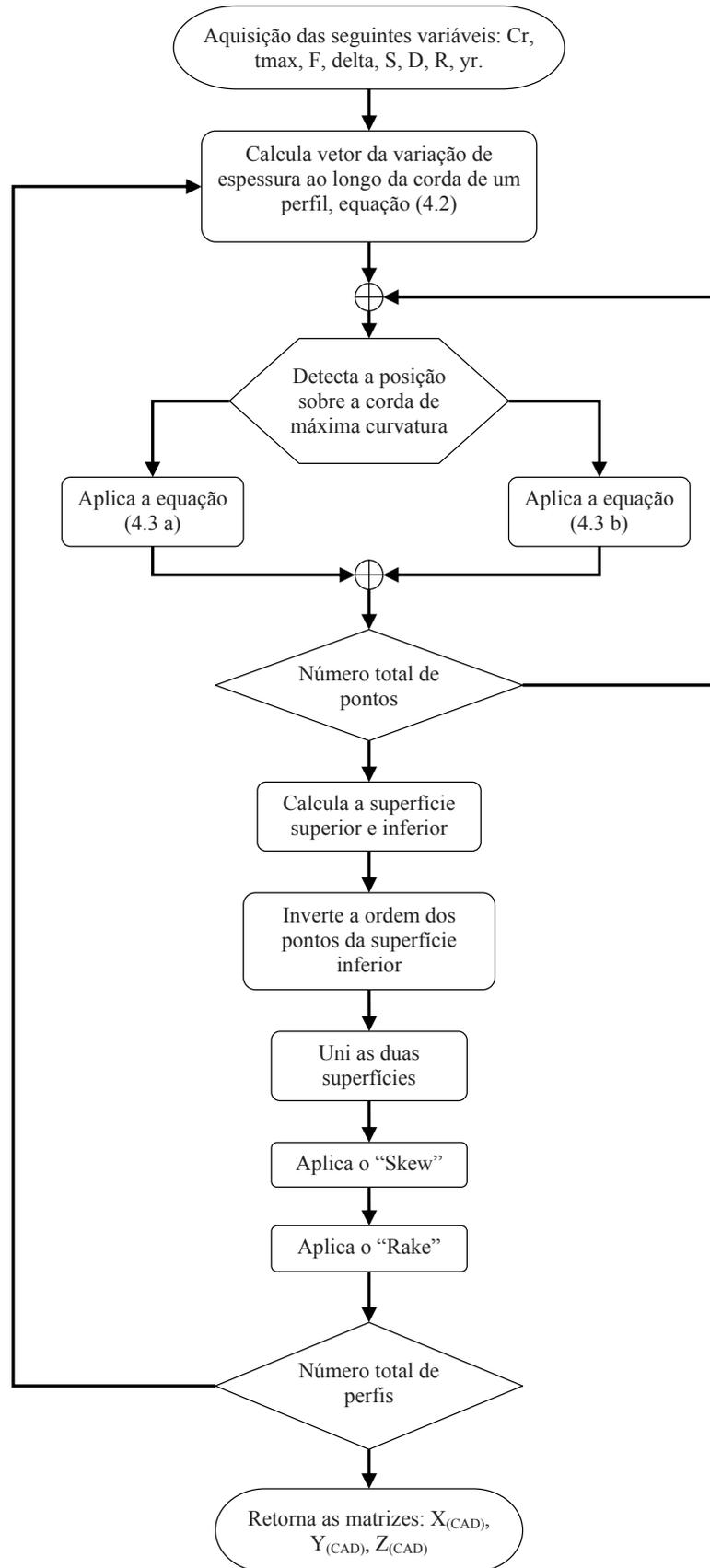


Figura 4.8- Fluxograma da função “Perfil.m”.

Um problema identificado, independentemente do método empregado, é o fato das superfícies de pressão e sucção não se encontrarem no bordo de fuga, deixando o perfil “aberto”, este erro também foi constatado na ferramenta desenvolvida por Garcia. Como solução para este erro, a ordem dos pontos da superfície de sucção foi invertida, desta forma os programas de CAD interpretam que há um segmento de reta entre estes dois pontos, “fechando” o perfil, sem alterar sua geometria.

4.2.10- Função “Rotacionar.m”

Esta função, é responsável pela rotação das coordenadas dos perfis, segundo o ângulo de passo de cada secção.

Para realizar esta rotação, existem diversos métodos e o mais empregado é a rotação do sistema de coordenadas, no entanto nestes casos é necessário utilizar matrizes de rotação, que dado o volume de cálculo e a necessidade de sentenças condicionais, reduziriam o desempenho da função.

O método adotado pelo autor, consiste em transformar as coordenadas cartesianas dos pontos dos perfis em coordenadas polares, deste modo obtêm-se dois valores, um é a distância entre o ponto e a origem do sistema de coordenadas, descrevendo um reta denominada “Ro”, o segundo é o ângulo formado entre a reta “Ro” e o eixo positivo X(CAD), este ângulo é denominado “Theta”. A rotação se dá pela soma de “Theta” com o ângulo de passo. Em seguida estas novas coordenadas polares são transformadas em coordenadas cartesianas e estes valores são retornados ao programa principal na forma de duas matrizes.

Como este cálculo deve ser realizado com cada um dos perfis, é

necessário o uso de controle de fluxo, (figura 4.9).

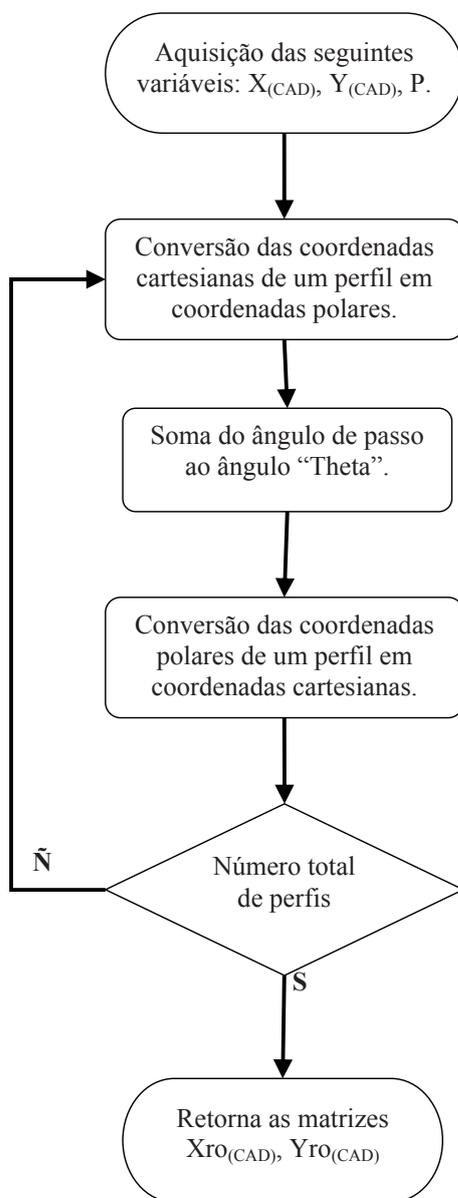


Figura 4.9- Fluxograma da função “Rotacionar.m”

4.2.11- Função “Projetar.m”

Esta função, é responsável pela projeção das coordenadas bidimensionais dos perfis, sobre a superfície do cilindro correspondente. Para executar esta projeção, a função utiliza a equação da circunferência, adaptada para o sistema de coordenadas do hélice, conforme a equação

abaixo:

$$Z_{(CAD)} = \sqrt{r^2 - (x - x_c)^2} \quad (4.4)$$

Sendo:

- r o vetor de posição radial dos perfis;
- x o vetor de coordenadas X(CAD) dos perfis;
- xc o “skew”;

O controle de fluxo é inevitável, uma vez que o cálculo deve ser realizado para cada um dos perfis, (figura 4.10).

Os hélices podem ser projetados para operarem, tanto no sentido horário, como no sentido anti-horário. Esta função, normalmente, gera coordenadas para hélices, que operam no sentido horário. Para a inversão do sentido de operação basta inverter o sinal dos valores contidos no vetor retornado por esta função.

Este método de inversão no sentido de operação, requer menos cálculo, não afetando o desempenho da ferramenta numérica.

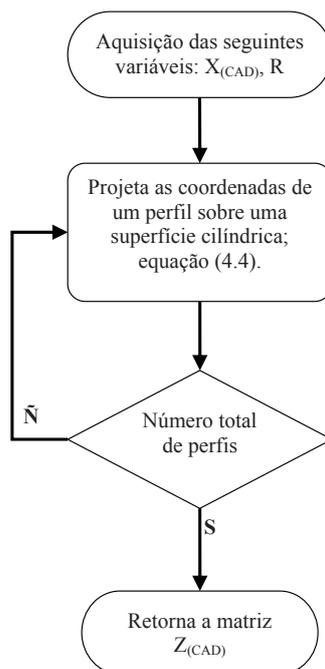


Figura 4.10- Fluxograma da função “Projetar.m”.

4.2.12- Função “3dPoly.m”

Esta função é responsável pela integração do MatLab com o ambiente CAD, para tal, ela explora os recursos dos arquivos de formato DXF para traduzir as coordenadas calculadas pelas outras funções, em pontos espaciais no ambiente CAD.

O formato dos arquivos DXF (Drawing Interchange Format), foi desenvolvido com o intuito de permitir a troca de desenhos entre o AutoCad e outros programas. Todas as versões do AutoCad aceitam este formato e atualmente grande parte dos programas de CAD também.

O arquivo DXF armazena os dados do desenho na forma de texto “ASCII”, que pode ser facilmente lido e traduzido por outros sistemas de CAD.

A estrutura dos arquivos DXF, desenvolvida pela AUTODESK, está organizada em cinco seções: o cabeçalho (HEADER), tabelas (TABLES), blocos (BLOCKS), entidades (ENTITIES), rodapé (END OF FILE). Em determinados casos, as informações contidas nas seções podem ser omitidas, em casos mais extremos a seção inteira pode ser omitida e mesmo assim o arquivo continua legível.

Na seção do cabeçalho, estão contidas informações gerais sobre o arquivo. A seção é iniciada e as principais variáveis do desenho são configuradas, como: unidades, versão do AutoCAD utilizada, camadas, dimensões, limite do desenho, tipo de linha, cor, entre outras, porém grande parte destas informações podem e devem ser omitidas, pois assim, além do tamanho do arquivo ficar reduzido, facilita a leitura do mesmo, por outros programas de CAD. Em verdade, a única informação indispensável nesta seção é o comando de início da seção, pois sem ela o arquivo torna-se ilegível.

A seção das tabelas, é composta por um conjunto de tabelas, cada qual contendo detalhes de configuração das variáveis. Como a maioria, ou quase todas as variáveis são omitidas no cabeçalho, esta seção pode ser inteiramente omitida e mesmo assim o arquivo ainda será legível.

A seção de blocos, contém informações a respeito dos blocos inseridos no desenho, estes blocos podem ser outros arquivos, ou até mesmo os blocos anônimos, como: hachuras e cotas. Caso o desenho não possua nenhum dos blocos citados, esta seção também pode ser omitida por inteiro.

Na seção de entidades, estão contidas dados das entidades do desenho, ou seja, coordenadas de um ponto, uma reta, uma superfície ou um sólido. Nesta seção são utilizados os comandos comuns ao AutoCAD, sucedidos por uma seqüência de bits de sinalização responsáveis por diferenciar dados do usuário dos dados de configuração do comando. Cada comando exige uma série configurações que devem ser fornecidas na ordem correta, tornando o arquivo legível, pouca ou quase nenhuma informação pode ser omitida nesta seção, por isso ela é responsável por 90% ou mais do tamanho do arquivo final.

A seção do rodapé é responsável pelo encerramento do desenho, geralmente, constituída por uma única linha de comando, não podendo ser omitida, caso contrário todo o arquivo se torna inválido.

A função desenvolvida para a ferramenta numérica, utiliza o comando “3dpoly” do AutoCad, para converter matrizes geradas no MatLab em curvas tridimensionais no ambiente CAD.

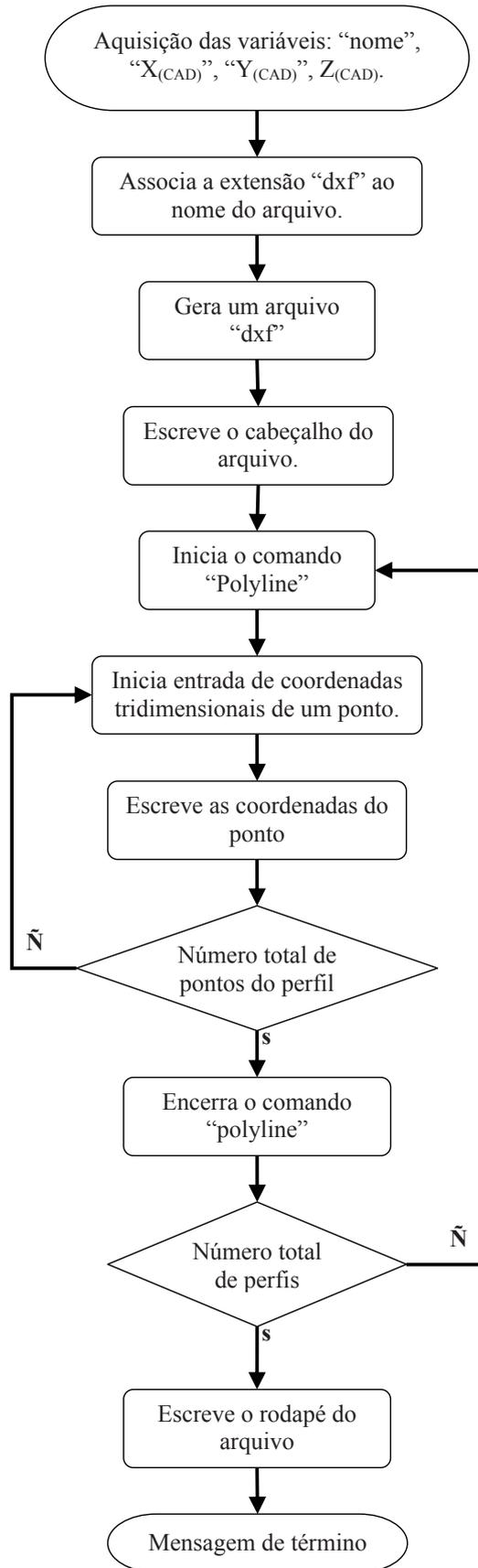


Figura 4.11- Fluxograma da função "3dPoly.m".

Esta integração é possível graças a um comando nativo do MatLab, inicialmente desenvolvido para escrever seqüências de caracteres em outros dispositivos, viabilizando a comunicação entre eles, porém com as devidas configurações e a lógica empregada, tal comando possibilita ao usuário escrever uma seqüência de caracteres em arquivos, cuja extensão é fornecida pelo usuário.

Ao cabo de sua implementação, para validar tal função, foram executados diversos testes, não só para o hélice, mas para outras geometrias e constatou-se que tal função é versátil, podendo ser empregada nas inúmeras etapas do desenvolvimento de ASVs e também para gerar maquetes virtuais do leito dos oceanos e rios, por meio dos dados obtidos em levantamento batimétrico.

A lógica utilizada nesta função pode ser analisada no fluxograma apresentado na figura 4.11.

4.3- Estudo de Casos

No presente tópico, serão apresentadas as situações empregadas durante o processo de validação da ferramenta numérica proposta pelo autor.

Haja vista que uma das propostas do autor consistia em gerar uma ferramenta numérica superior à ferramenta desenvolvida por Garcia, o processo de validação tem por início a comparação entre os resultados obtidos pelas duas ferramentas. Como em sua dissertação, Garcia, apenas apresenta os resultados para a família Kaplan, o autor restringiu tal comparação a esta família de hélices.

Um primeiro ponto a ser levado em consideração, relaciona-se ao fechamento do bordo de fuga dos perfis gerados, como apresentado

abaixo (figura 4.12). Os perfis gerados pela ferramenta numérica do Garcia, são abertos (figura 4.12a), impossibilitando a obtenção de um modelo sólido do hélice, para tanto é necessário a intervenção do usuário para realizar tal tarefa, que acaba alterando a geometria do perfil. Já os perfis gerados pela ferramenta do autor são fechados, não necessitando da intervenção humana, (figura 4.12b).

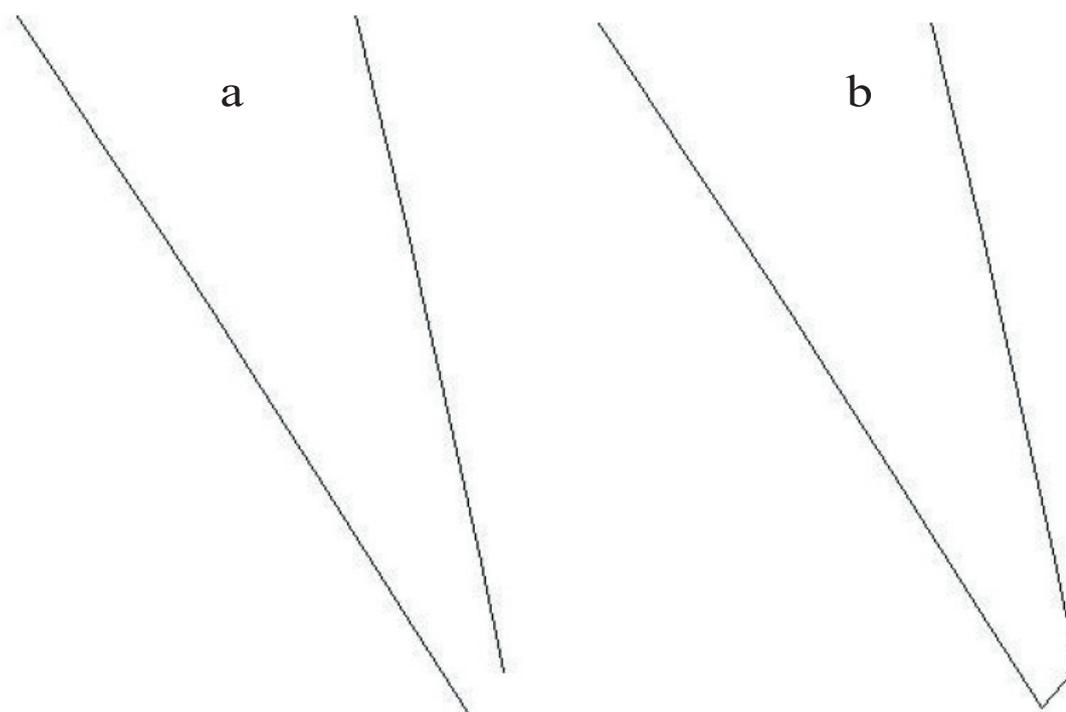


Figura 4.12- Comparação entre os bordos de fuga. a) Bordo de fuga aberto, gerado pela ferramenta do Garcia, b) Bordo de fuga fechado gerado pela ferramenta proposta pelo autor.

Durante o processo de obtenção do modelo sólido do hélice, ou seja, durante o processo de interpolação entre as curvas tridimensionais, os programas de CAD realizam uma homogeneização entre as curvas, segmentando-as com o mesmo número de intervalos.

Pelo fato de ter utilizado os perfis descritos nas séries sistemáticas, a ferramenta do Garcia, gera perfis com quantidade diferente de pontos, tal fato, dificulta o processo de homogeneização, que acaba gerando distorções nas faces do sólido (figura 4.13). Já a ferramenta do autor,

utiliza as equações NACA de quatro dígitos, deste modo é possível gerar cada um dos perfis com a mesma quantidade de pontos, evitando discrepâncias nas faces do sólido gerado, (figura 4.14).

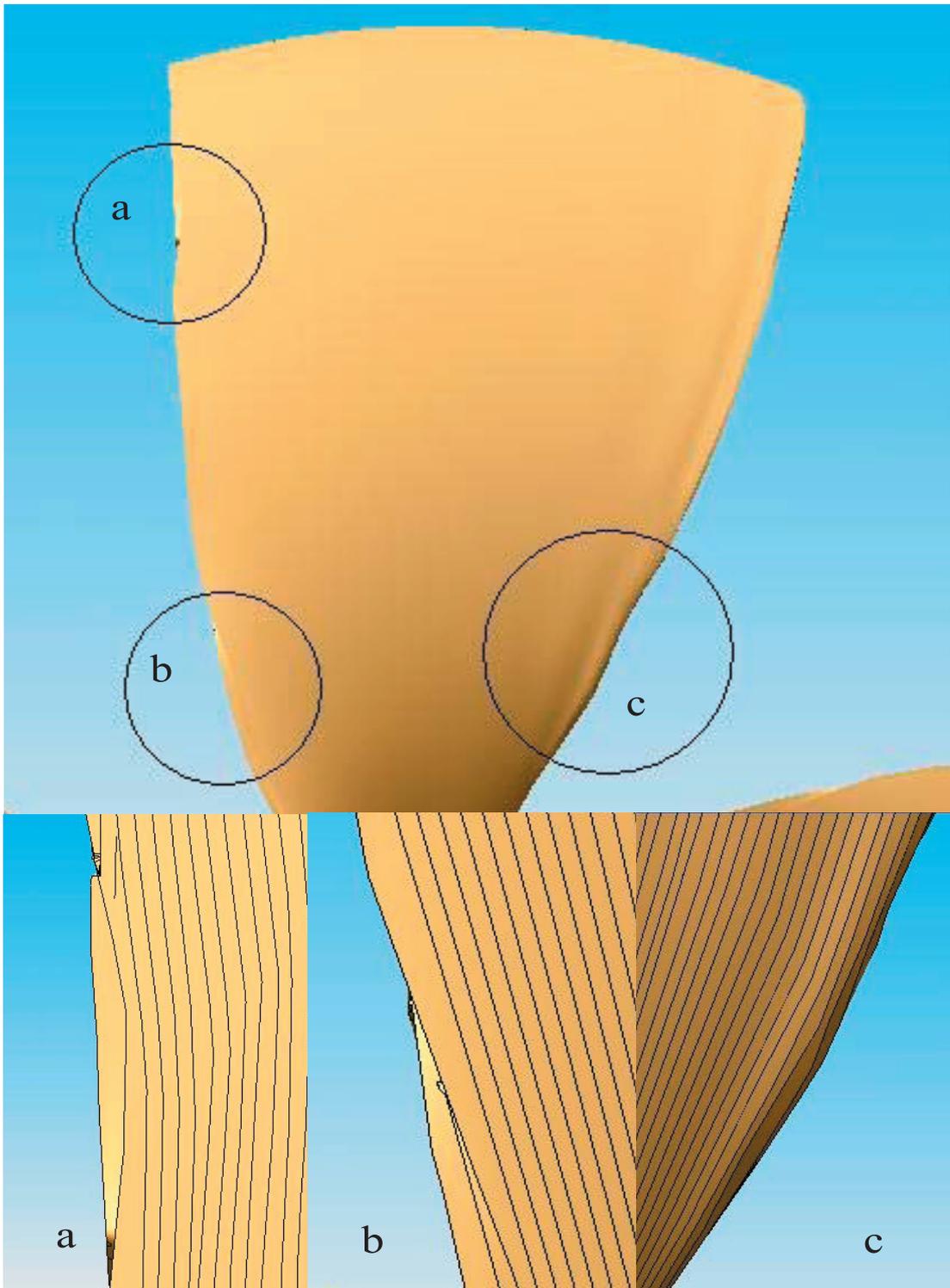


Figura 4.13- Deformação no sólido gerado utilizando os perfis provenientes da ferramenta numérica implementada por Garcia. Os círculos assinalam os pontos de maior deformação.

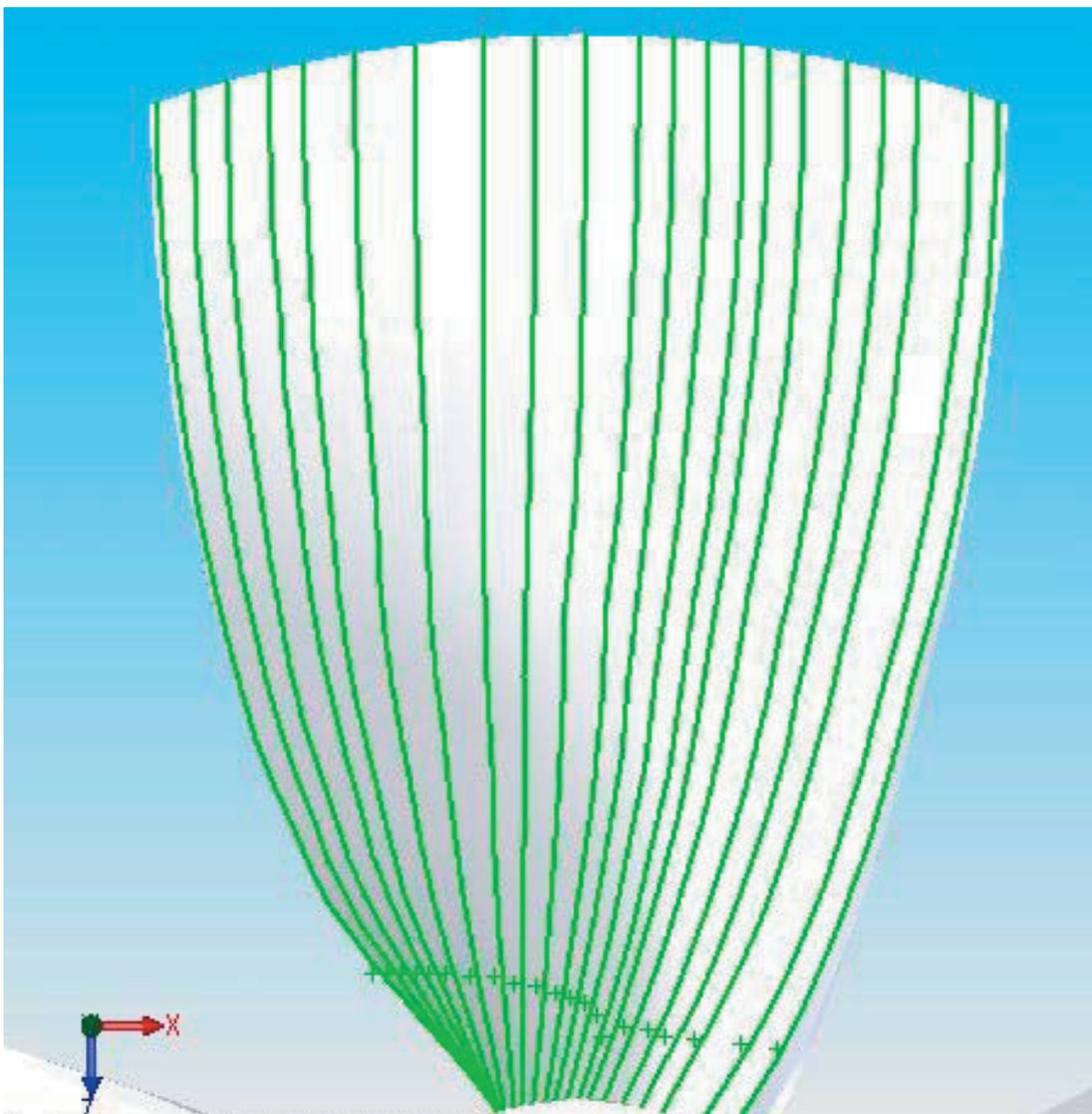


Figura 4.14- Sólido gerado por meio ferramenta implementada pelo autor, visivelmente sem discrepâncias.

Terminada a fase comparativa, entre as ferramentas numéricas e constatado o êxito nesta categoria, o processo de validação se estendeu, de modo a abranger as inúmeras situações possíveis, com o intuito de detectar e corrigir o maior número de erros possíveis.

Dentre os erros apresentados e corrigidos, tem-se os inerentes ao arredondamento numérico presente nas séries sistemáticas, que impossibilitam gerar uma grande quantidade de perfis intermediários, por meio de interpolação, (figura 4.15). Para sanar este problema, a quantidade de perfis a ser calculado, teve que ser limitada. (figura 4.16).

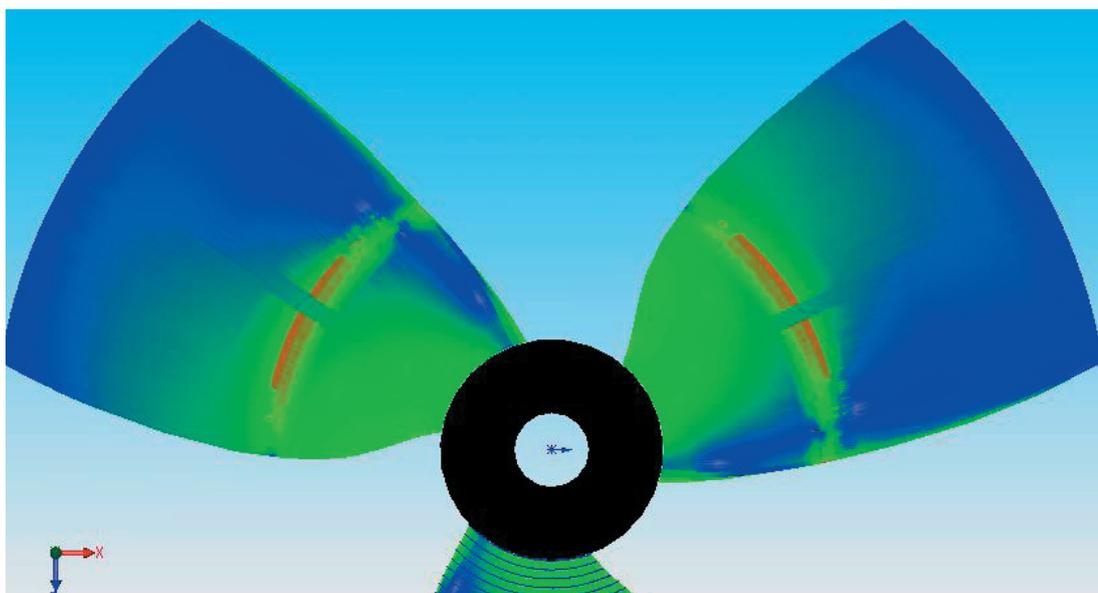


Figura 4.15- Erro inerente ao excesso de perfis interpolados.



Figura 4.16- Após limitar a quantidade de perfis interpolados.

Para a completa validação da ferramenta numérica em relação à família Kaplan, foram gerados diferentes modelos sólidos, variando-se os parâmetros como número de pás, razão de área expandida e diâmetro conforme ilustram as figuras 4.17 e 4.18

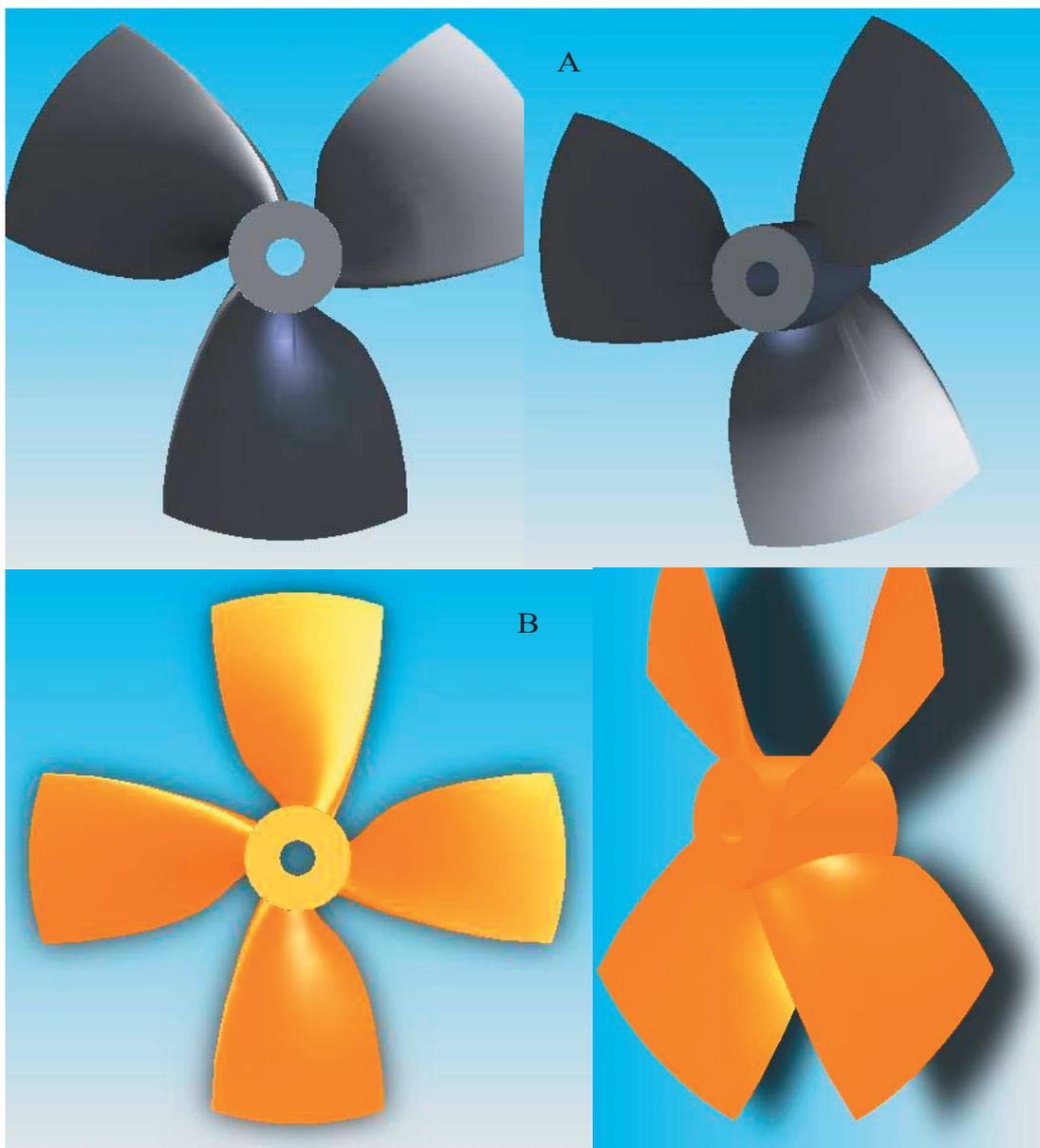


Figura 4.17- Modelos de hélices da família Kaplan; A) três pás e EAR de 0,65; B) quatro pás e EAR de 0,70.

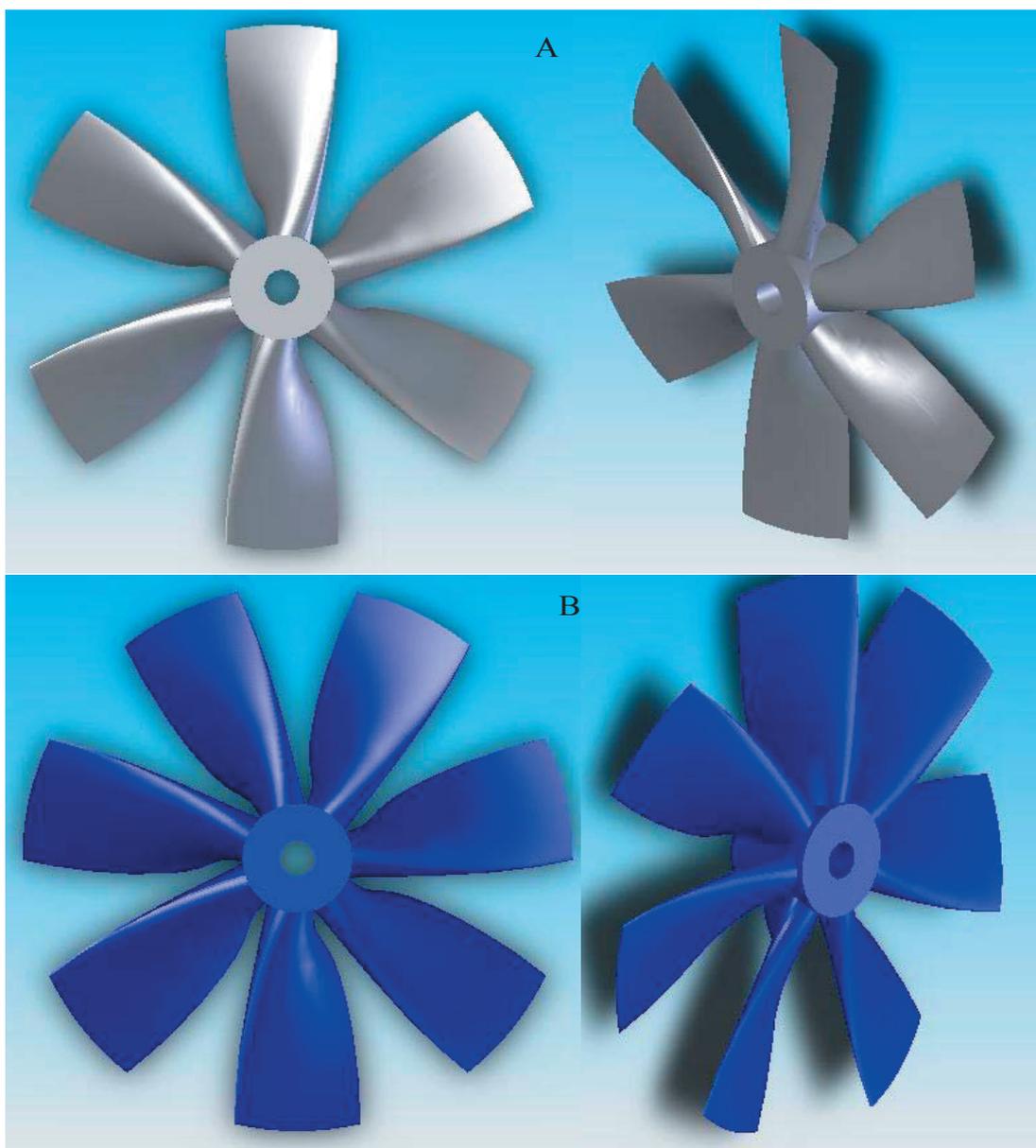


Figura 4.18- Modelos de hélices da família Kaplan; A) seis pás e EAR de 0,75; B) sete pás e EAR de 0,80.

Durante o processo de validação da ferramenta numérica, em relação à família B-Troost, também constatou-se erros de arredondamento numérico, que foram corrigidos, limitando-se a quantidade de perfis intermediários a serem calculados, por meio de interpolação.

Outro erro presente nesta família averiguou-se durante a obtenção do modelo sólido do hélice. Este erro ocorria na região da ponta da pá e impedia que esta obedecesse o contorno dado pela série sistemática,

(figura 4.18). Para a correção o autor realizou a seguinte ação: mantendo-se o contorno original da pá, o ponto extremo da pá era recuado alguns milímetros sobre o eixo $X_{(CAD)}$, tomando cuidado para que este se mantivesse sobre a curva do contorno da pá. Esta ação corretiva permitiu que o sólido da pá do hélice fosse gerado satisfatoriamente sem alterar sua geometria original, (figura 4.19).

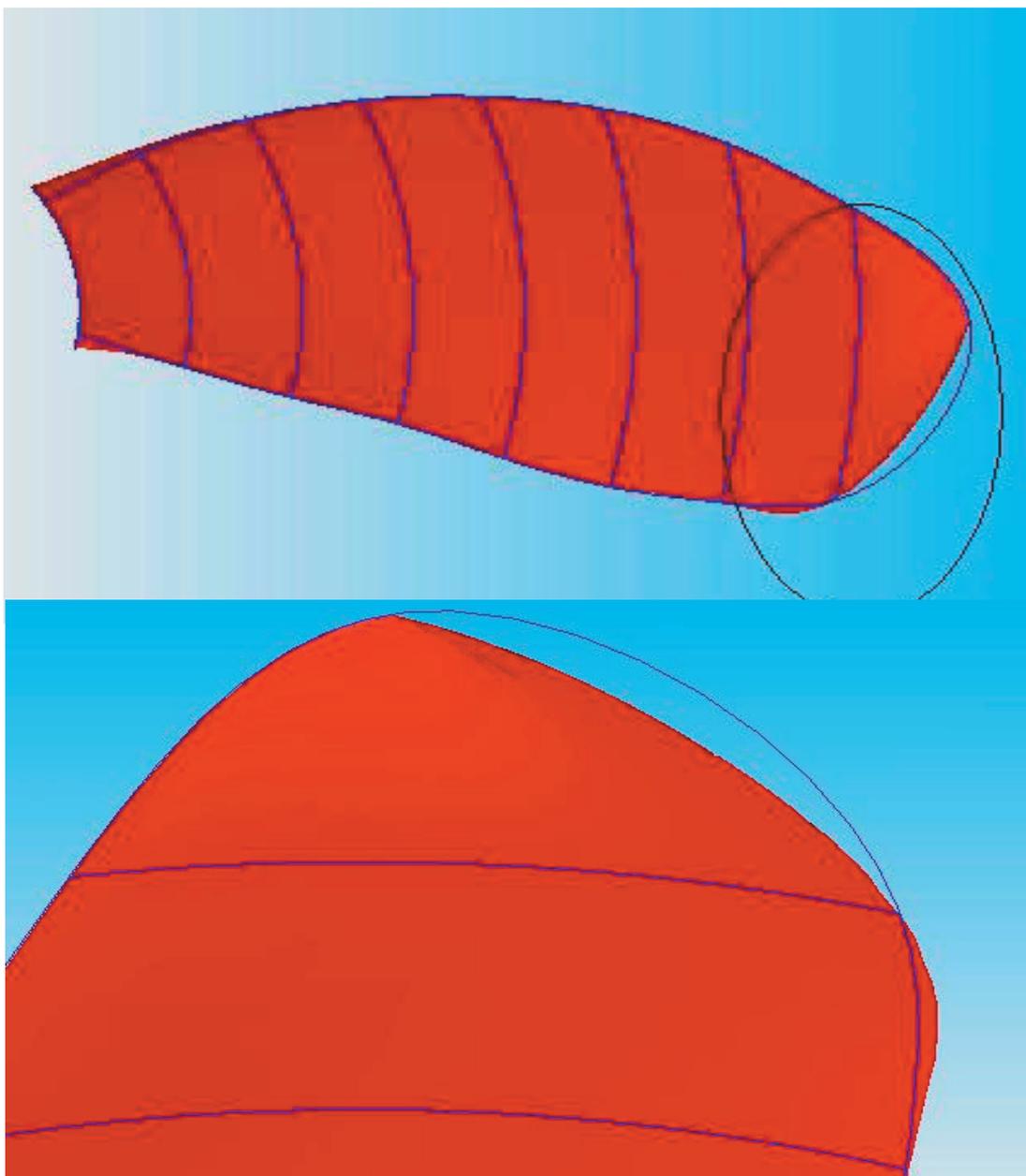


Figura 4.18- Erro na ponta da pá durante processo de obtenção do sólido da pá. A linha azul indica o contorno original da pá.

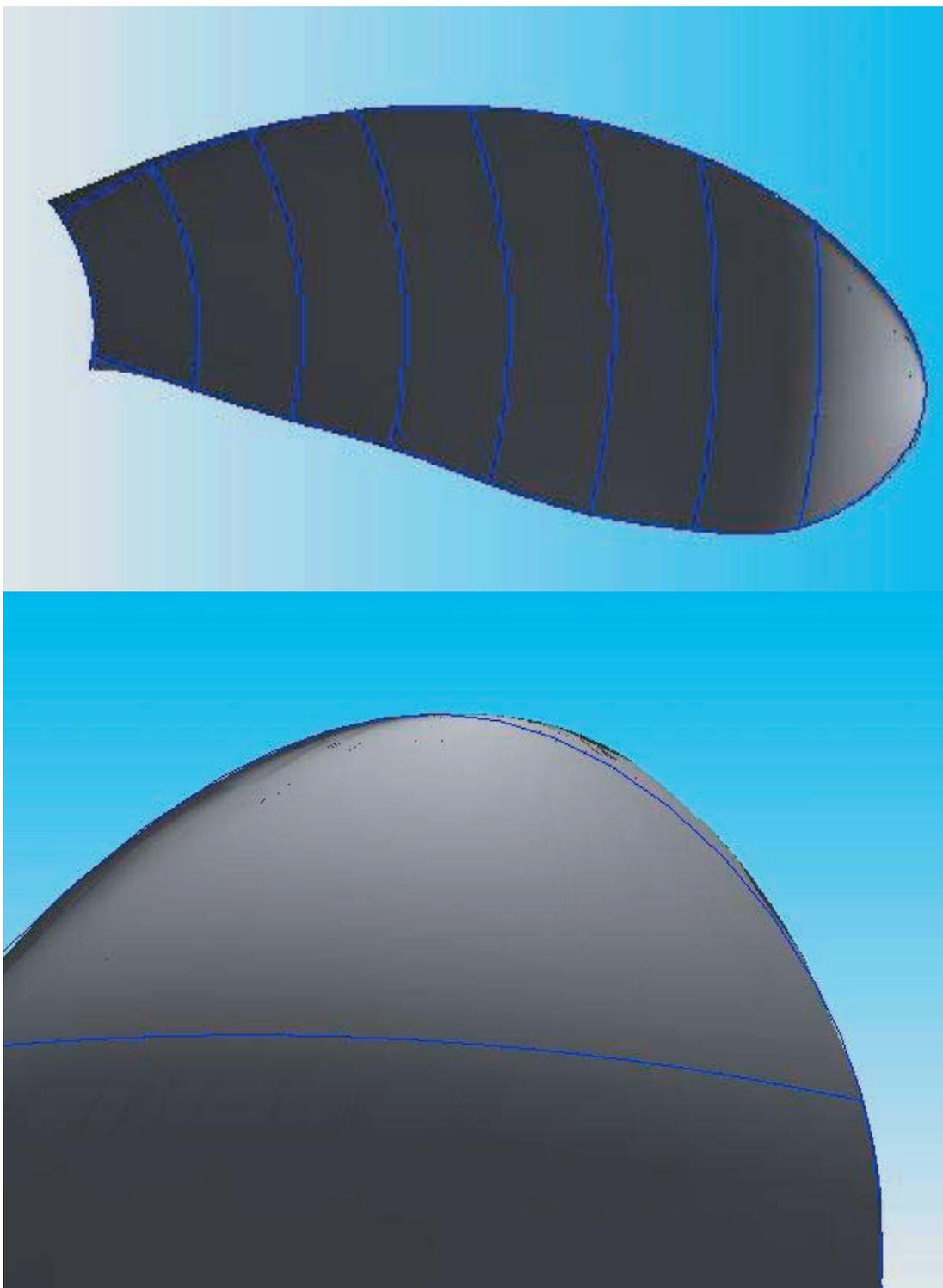


Figura 4.19- Erro na ponta da pá corrigido após recuo do ponto.

Os resultados obtidos, ao final do processo de validação, para hélices da família B-Troost, são apresentados na figura 4.20. A figura 4.21 apresenta a inclusão do duto da série 19 A para hélices da família Kaplan.

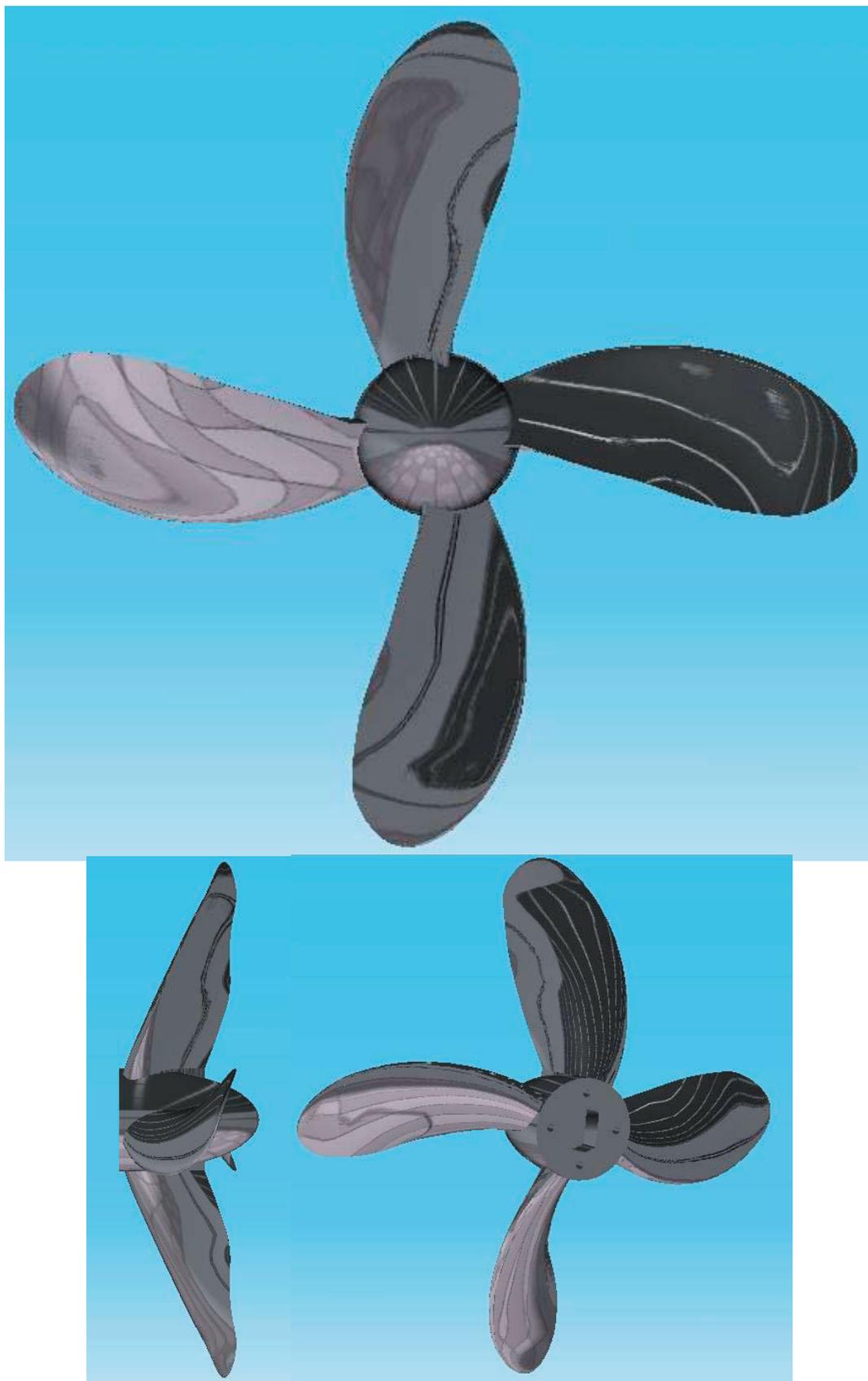


Figura 4.20- Modelo sólido do hélice B-Troost, obtido após todas as correções. Este modelo apresenta bossô cônico.

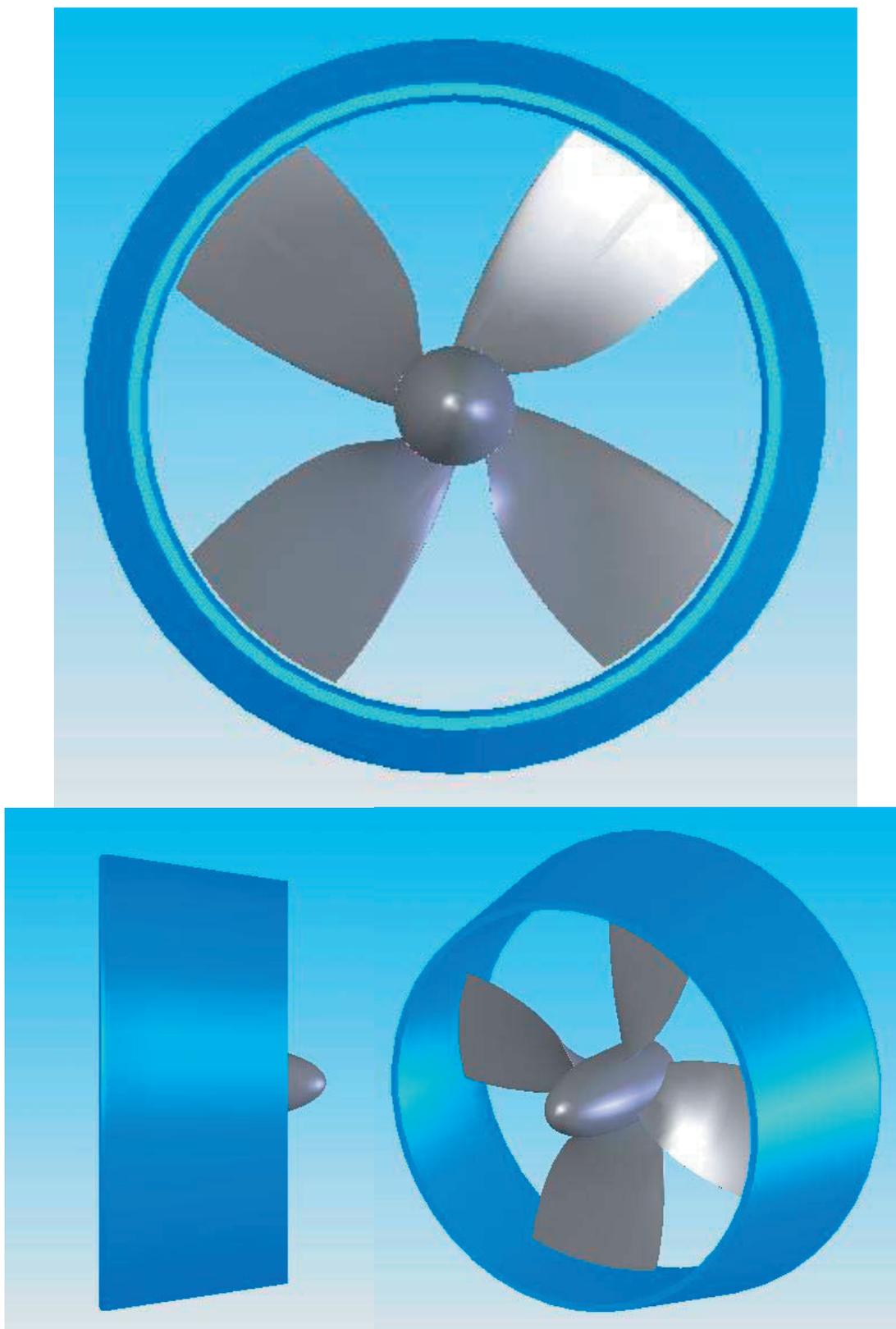


Figura 4.21- Montagem de conjunto do modelo sólido do hélice Kaplan e o Duto 19A, obtido após todas as correções.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES & TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de ferramentas numéricas para auxílio no projeto de ASVs, AUVs e ROVs, é de grande importância, dado o aumento no interesse por tais veículos autônomos ocorrido nas últimas décadas.

As ferramentas numéricas específicas para o projeto dos elementos de propulsão, do tipo hélice, tem seu mérito devido a deficiência do mercado, principalmente em território nacional.

A ferramenta numérica aqui proposta e implementada pelo autor, apresentou resultados satisfatórios, tanto em relação a desempenho como em relação à precisão obtida na superfície do modelo sólido do hélice, em ambas as famílias.

Comparativamente, a ferramenta numérica apresentou algumas características vantajosas em relação ao programa desenvolvido por Garcia, (Garcia, 1997). O número de linhas de programa é bem menor, porém apresenta resultados superiores, como exposto no capítulo 4. Não é necessária a intervenção do usuário para o devido fechamento dos perfis, evitando mudanças na sua geometria e conseqüentemente alterações em suas propriedades hidrodinâmicas. Possui independência em relação as versões dos programas comerciais de CAD utilizados. Possui estrutura modular, que permite a fácil inclusão de novas famílias

de hélice e o aproveitamento otimizado dos recursos disponibilizados pelo ambiente usado.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho de mestrado, o autor deparou-se com algumas discrepâncias nas séries sistemáticas das duas famílias implementadas, constatou-se que tais erros eram inerentes a arredondamento dos valores numéricos. No intuito de contornar tais discrepâncias, sem corromper os valores fornecidos pelas séries sistemáticas, a resolução da ferramenta foi reduzida, mesmo assim os resultados obtidos mantiveram-se acima do esperado.

Em relação aos processos de manufatura, atualmente, têm-se os processos clássicos e os mais recentes de prototipagem rápida.

As pesquisas envolvendo os processos de prototipagem rápida possuem duas vertentes, uma visa melhorias na precisão, tanto na mecânica como na parte óptica dos processos já existentes. A outra vertente, busca melhorias nos materiais empregados, para que estes um dia venham a substituir por completo os processos clássicos de manufatura. Geralmente, deste ramo de pesquisas, surgem novos processos de prototipagem rápida.

As pesquisas envolvendo os processos clássicos de manufatura, especialmente a usinagem com fresas CNCs, são voltados a obtenção de métodos quantitativos capazes de prever parâmetros como raio de ferramenta e o passo entre seus caminhos, assegurando a tolerância necessária exigida por tais elementos de propulsão. Estas pesquisas são realizadas tanto para máquinas de 3 e 5 eixos. No contexto nacional, as pesquisas, com máquinas de 3 eixos, são mais produtivas, dada à disponibilidade destas máquinas no mercado.

Pelas dificuldades encontradas pelo autor, quanto à resistência do modelo a ser usinado, devido a pressão da ferramenta sobre sua

superfície, a usinagem de moldes torna-se mais atrativa que a usinagem direta do hélice, possibilitando a confecção de vários modelos, tanto em ligas metálicas, como em resinas.

Como trabalhos futuros, o autor propõe a implementação de mais famílias de hélices, bem como o aprofundamento teórico em assuntos como hidrodinâmica e hidrostática de hélices para a implementação de novas famílias.

A integração entre os ambientes de cálculo e CAD, demonstrou ser eficaz e valiosa, facilitando a etapa de projeto, por tanto, propõem-se aqui um aumento desta integração, implementando-se novas funções no MatLab para este fim.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABBOTT, IRA, DOENHOFF, ALBERT E. VON; Theory of Wing Sections. New York: Dover Publications, 1949.

AGHA, G., ACTORS: A model for concurrent computation in distributed systems. M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1986.

ALVES, J.; PASCOAL, ANTÓNIO et al.; Vehicle and Mission Control of DELFIN Autonomous Surface Craft. Lisboa: Institute for Systems and Robotics, 2003.

ANDREWS, G. R, Concurrent Programming, Principles and Practice. Benjamin Cummings Pub. Co., Redwood City, 1991.

AUSLANDER, DAVID M., THAM CHENG H.; Real-Time Software for Control: Program Examples in C. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

BEDFORD, KEITH .W; STREETER, VICTOR.L; wylie,e.benjamin. Fluid Mechanics. Boston : McGraw-hill, 1998.

BESANT C. B.; CAD/CAM Projeto e Fabricação com o Auxílio de Computador. Rio de Janeiro: Editora Campus LTDA., 1988.

BROWN, ROBERT GROVER., HWANG, PATRICK Y. C.; Introduction To Random Signals and Applied Kalman Filtering: terceira edição. John Wiley and Sons, 1997.

BRUTZMAN, P. DONALD: A virtual world for an autonomous underwater vehicle.. Naval Postgraduate School. December 1994.

CACCIA, MASSIMO; BONO, R. et al.; Design and preliminary sea trials of SESAMO: an autonomous surface vessel for the study and characterization of the air-sea interface. Genova: Via De Marini, 2003.

CACCIA, MASSIMO; The Sea-Surface Autonomous Modular Unit Project. Sea Technology, set. 2004. p 46.

CAMPOS, VICTOR AUGUSTO FERNANDES DE.; Aplicação do Filtro de Kalman e dos Filtros de Partículas à Estimação de Trajetórias em Navegação Inercial. São Paulo, 2004. 142p.

CARLTON, J.S; Marine Propellers and propulsion. Toronto: Butterworth Heinemann, 1994.

CASSIA, MASSIMO; The Sea-Surface Autonomous Modular Unit Project. Sea Technology. Sep, 2004.

CHRYSSOSTOMIDIS, CHRYSSOSTOMOS; Automation in the Design and Manufacture of Large Marine Systems. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

Coming Soon to a Port Near You: 126m Trimaran. The Naval Architect, Set. 2004. Large Fast Ferries, p66.

Diversification Keeps Fast Ferry Builders Afloat. Ship and Boat International, Jan. 2003. Fast Ferries, p34.

DONALDSON, PETER.; Nuclear Option. Unmanned Vehicles, junho, 2003.

DONALDSON, PETER.; Running on Heavy Fuel. Unmanned Vehicles, outubro, 1998.

DUBROVSKIY, V. A.; Attractive Potencial of Multi-hulls. The Naval Architect, Set. 1997. P18.

EDMINISTER, JOSEPH A., Theory and Problems of Electric Circuits, McGraw-Hill Book Company, New York, 1965.

FERREIRA, GUSTAVO ANDRÉ NUNES; Desenvolvimento de uma Arquitetura de Controle Baseada em Objetos Para um Robô Móvel Aquático. 2003, 137p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

FOSSEN, THOR. I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. New York: John Wiley & Sons, 1994.

GARCIA, FRANCISCO CARLOS VAZQUEZ DE; Fabricação de Propulsores Navais Plásticos Auxiliada por Computador. 1999, 176p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

GERR, DAVE; Propeller Handbook. USA: International Marine Publishing Company Camden Marine, 1989.

GILLMER, THOMAS C., JOHNSON, BRUCE; Introduction to Naval Architecture. Maryland: Naval Institute, 1982.

GREWAL, MOHIMDER S., ANDREWS, ANGUS P.; Kalman Filtering: Theory and Praticce Using MATLAB. Toronto : John Wiley & Sons, 2001.

GREWAL, MOHIMDER S., WEILL, LAWRENCE R. ANDREWS, ANGUS P.; Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. Toronto : John Wiley & Sons, 2001.

HARVALD, SV. AA.; Resistance and Propulsion of Ships. Toronto: John Wiley & Sons, 1983.

HAWARY, FERIAL. E.L; The Ocean Engineering Handbook . London: CRC Press, 2001.

HOARE, C. A. R.: Communicating Sequential Processes, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1985.

HOPCROFT, J.E. AND J. D. ULLMAN,; Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1979.

HUBBARD, JOHN R.; Theory and Problems of Programming with C++. New York: McGraw-hill, 1996.

HUBERMAN, LEO.: História da riqueza do homem. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1970.

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO; Lisboa. Apresenta detalhes do projeto Caravela. Disponível em: < <http://www.caravela2000.com> >. Acesso em: 20 de jul. 2004.

IYENGAR, S. S. AND A. ELFES: Autonomous Mobile Robots: Control, Planning and Architecture. IEEE Press, New York, 1991.

KANO, HIROYUKI; NAKATA, HIROAKI; MARTIN, CLYDE F., Optimal curve fitting and smoothing using normalized uniform B-spline: a tool for studying complex systems. Applied Mathematics and Computation, v.169, p.96-128, 2005.

KUIPPER, G.; The Wageningen Propeller Series. USA: Marin, 1992.

KUO BENJAMIN C., Digital Control Systems, Holt Rinehart and Winston INC, New York, 1980.

KUO, HSING-CHIA; DZAN, WEI-YUAN; The analysis of NC machining efficiency for marine propellers. *Journal of Materials Processing Technology*, n 124, p. 389-395, july, 2001.

KWAK, S., F. P. B. THORNTON JR, A Concurrent, Object-Oriented Implementation for Tactical Level of the Rational Behavior Model Software Architecture for UUV Control. In: *Proc. of the IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 54-60, 1994.

LAPLANTE, P. A.,: *Real-Time Systems Design and Analysis, an Engineer's Handbook*. IEEE Press, New York, 1993.

LAWRENCE ANTHONY *Modern Inertial Tecnology: Navigation, Guidance and Control*. New York: Springer, 2a edição 1993.

LEONESSA, ALEXANDER; MOREL, YANNICK et al; *Design of a Small, Multi-Purpose, Autonomous Surface Vessel*. Florida: Florida Atlantic University, 2004.

LEWIS, E. V.; *Principles of Naval Architecture: SNAME*, 1989.

MANNING, GEORGE G.; Fundamentos de Teoria de Arquitetura Naval. Rio de Janeiro: Centro de Publicações Técnicas da Aliança, 1961.

MANNING, GEORGE G.; Teoria e Técnica do Projeto do Navio. Rio de Janeiro: Centro de Publicações Técnicas da Aliança, 1964.

MARCO B, DAVID. Command, Control, and Navigation-Experimental Results With the NPS ARIES AUV. Dept. of Mechanical Engineering, Naval Postgraduate School. Monterey, CA.

MIRANDA, RENATO.J.P.C. Resistência dos Materiais. São Paulo:

MIT. . Expõem o histórico de ASVs desenvolvidos no laboratório de AUVs. Disponível em: < <http://www.auvlab.mit.edu/vehicles/vehiclespecASC.html> >. Acesso em 01 de mar. 2004.

MONICO, JOÃO FRANCISCO GALERA; Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS, Descrição, Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

NI, LINGLI. Fault-Tolerant Control of Unmanned Underwater Vehicles.

Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, 2001.

OCEANSCIENCE. USA; Apresenta as características do ASV

RiverBoat. Disponível em: < <http://www.oceanscience.com> >.

Acesso em: 10 de mar. 2003.

P.OLIVEIRA, C.SILVESTRE, A.AGUIAR, and A.PASCOAL. Guidance

e Control of the Sirene Underwater Vehicle: from System Design to Tests at Sea. Institute for Systems and Robotics and Departmente of Electrical Engineering. Proc. of Oceans 98, Nice, France, September 1998.

PADOVEZI, CARLOS DAHER; Aplicação de Resultados de Escala

Real no Projeto de Hélices de Embarcações Fluviais. 1997, 87p.

Dissertação (mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

PASCOAL, ANTÓNIO; GOMES, JOÃO et al.; Robotic Ocean Vehicles

for Marine Science Applications: the European ASIMOV Project.

Lisboa : Institute for Systems and Robotics, 2003.

PRADO, MIGUEL GODEN DE SOUSA; Modelização e Controlo de um Veículo Oceanográfico Autónomo. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, junho, 2004.

RABL S. S.; Pratical Principles of Naval Architecture. New York: Cornell Maritime Press, 1942.

RADIX MARINE COMPANY. USA; Apresenta detalhes sobre o ASV ODYSSEY. Disponível em: < <http://www.radixmarine.com> >. Acesso em 10 de mar. 2003.

RAFAEL. Israel. Apresenta dados sobre o ASV Protector. Disponível em: < <http://www.rafael.co.il/web/rafnew/corporate.htm> >. Acesso em 16 de maio 2004.

RUMBAUGH, J., M. BLAHA, W. PREMERLANI, F. EDDY AND W. LORENSEN: Object-Oriented Modeling and Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1991.

SAIC. San Diego. Apresenta dados sobre o ASV SAIC. Disponível em < <http://www.saic.com> >. Acesso em 17 de maio 2005.

SANTOS, R.; HEALEY, A. J. et al.; Shallow Water Hydrothermal vent survey in AZORES with cooperating asv and auv. Lisboa: Institute for Systems and Robotics, 2002.

SELIC, B., G. GULLEKSON AND P. T. WARD: Real-Time Objected-Oriented Modeling. John Wiley, New York, 1994.

SORENSEN, HAROLD W.; Kalman Filtering: Theory and Application. New York: IEEE Press, 1985.

SOUSA, ERIC CONRADO DE.: Modelagem e Controle de Veículos Submarinos não Tripulados. São Paulo, 2002 145p.

TIRON, R.; High speed Unmanned Craft for Surveillance Role. National Defense Magazine, May.

TORNBLAD, JAN; Marine Propellers and Propulsion of Ships. Kristinehamn Sweden, 1987.

UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA. Florida. Expõe os processos de manufatura rápida. Disponível em: <<http://www-mae.engr.ucf.edu/~rplab/RP-Detailed%20Tutorial.doc>>. Acesso em: 02 de out. 2005

US NAVY. USA. Apresenta detalhes do ASV Spartan. Disponível em
< <http://www.defense-aerospace.com> >. Acesso em: 22 de abr.
2005.

VANECK, T; Fuzzy Guidance Controller for an Autonomous Boat.
IEEE Control Systems, Vol 17, N° 2, abr.

VANZWIETEN, TANNEN S; Dynamic Simulation and Control of an
Autonomous Surface Vehicle. 2003. 122p. Dissertação (Mestrado)-
Faculty of the College of Engineering, Florida Atlantic University.
Florida, 2003.

VICKERS, GEOFFREY W., Computer-aided manufacture of marine
propellers. Computer-Aided Design, v.9, n4, p.267-274, out
1977.

VUOLO, JOSÉ HENRIQUE.; Fundamentos da Teoria de Erros. São
Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1992.

WADDINGTON, SARA.; Into the Blue. Unmanned Vehicles, Maio,
1999.

WALKER, JAMES. S, Fast Fourier Transforms 2nd Ed.,CRC,1996.

YAMAHA MOTOR COMPANY; Japão. Apresenta detalhes sobre o desenvolvimento do Kan-Chan. Disponível em <<http://www.yamaha-motor.co.jp/global/news/2000/04/13/observation.html>>. Acesso em 05 de abr. 2005.

YANG, D.C.H.; CHUANG, J.-J.; OULEE, T.H., Boundary-conformed toolpath generation for trimmed free-form surfaces. *Computer-Aided Design*, v.35, p.127-139, 2003.

YE, XIUZI; JACKSON, TODD R.; PATRIKALAKIS, NICHOLAS M., Geometric design of functional surfaces. *Computer-Aided Design*, v.28, n.9, p.741-752, 1996.

YONEZAWA, A., J. P. BRIOT AND E. SHIBAYAMA , Object-oriented concurrent programming. MIT Press, Cambridge, Mass,1989.

YOUN, JAE-WOONG; JUN, YONGTAE; PARK, SEHYUNG, Interference-free tool path generation in five-axis machining of a marine propeller. *International Journal of Production Research*, v.41, n.18, p.4383-4402, 2003.

APÊNDICE I

PROCESSOS DE MANUFATURA

Atualmente, o mercado disponibiliza alguns processos de manufatura, para a confecção do hélice.

Considerando que a proposta aqui apresentada, é a manufatura de hélices de dimensões diminutas, pode-se considerar ideal, apenas os processos que se adequem às tolerâncias exigidas por tais hélices.

Essas tolerâncias incluem acabamento da superfície e também características física-químicas dos materiais empregados.

Tais processos podem ser aglomerados em duas classes: usinagem e prototipagem rápida, discutidos adiante.

I.1- Prototipagem rápida.

Define-se por prototipagem rápida o conjunto de processos capazes de converter um modelo sólido virtual, gerado por técnicas de CAD, em um modelo sólido tridimensional real.

Tais processos baseiam-se na adição de material ao modelo a ser confeccionado, conceito antagônico ao empregado nos processos de usinagem, baseados na extração de material.

Este conceito permite a obtenção de modelos considerados geometricamente de difícil obtenção, pelos métodos convencionais.

Os modelos são gerados pela deposição de finas camadas de substratos, geralmente, compostos de polímeros, cuja espessura não ultrapassa 0,1mm.

Os processos de prototipagem rápida surgiram na expectativa de auxiliar a etapa de desenvolvimento de novos produtos, porém, logo a vastidão de aplicações foi constatada e estes passaram a serem empregados na solução de problemas corriqueiros de montagem de conjuntos como: encaixes, interferências e colisões entre peças.

Mesmo tendo surgido em meados da década de 80, tais processos não atingiram a maturidade e portanto, atualmente, há inúmeras pesquisas que visam o aperfeiçoamento tanto dos mecanismos, como dos materiais empregados.

A confecção de um objeto utilizando os processos de prototipagem rápida exigem as seguintes etapas:

- ▶ Obtenção de um modelo sólido do objeto, aplicando técnicas CAD.
- ▶ Conversão deste modelo para um formato próprio denominado STL.
- ▶ Seccionar o modelo em camadas finas.
- ▶ Processo de prototipagem rápida, propriamente dito.
- ▶ Limpeza e acabamento do modelo.

Atualmente existem os seguintes processos:

I.1.1- Estereolitografia.

Este processo iniciou a era da prototipagem rápida, patenteado em 1986.

Modelos tridimensionais obtidos por este processo, são gerados a partir de um substrato líquido de polímeros foto-sensíveis, solidificando-se ao ser exposto à radiação ultravioleta.

O modelo é gerado sobre uma plataforma imersa no substrato líquido logo abaixo da superfície. Uma fonte de laser ultravioleta, com alta precisão de foco, traça a primeira camada, solidificando a superfície do modelo, deixando as demais áreas líquidas, (figura I.1). Em seguida, a plataforma é recuada de modo que a segunda camada possa ser feita. Esta seqüência é repetida sucessivas vezes até a conclusão do protótipo. Terminada a solidificação de toda a superfície do modelo, este é removido da plataforma, lavado e levado a uma câmara de radiação ultravioleta para a cura completa do substrato.

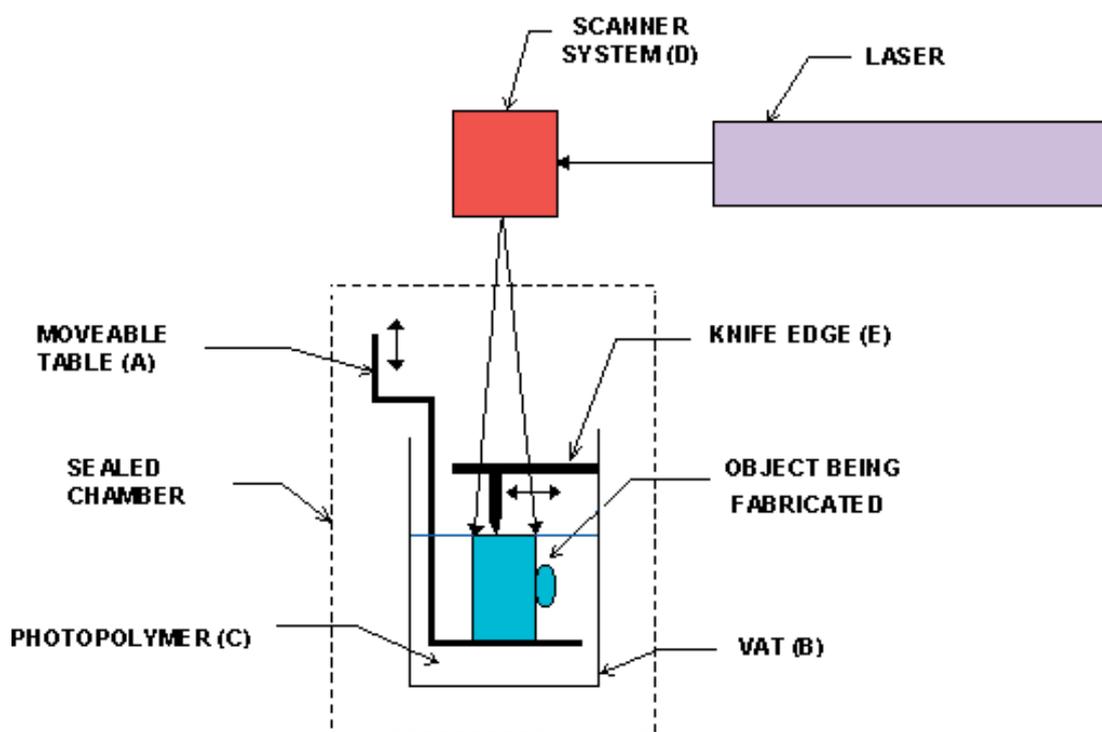


Figura I.1- Ilustração do processo de estereolitografia. (UCF, 2005)

Embora tenha sido o primogênito, este processo proporciona um dos melhores acabamentos superficiais do modelo, tornando-se um padrão de avaliação para os demais processos de prototipagem rápida.

I.1.2- Manufatura de Objetos por Laminação (LOM)

Neste processo, tiras de material revestidas por um adesivo, são unidas umas as outras de modo a constituir o modelo.

O material empregado primordialmente consistia em bobinas de papel laminado com um adesivo térmico. Um rolo coletor estica a tira de papel sobre a plataforma de construção, onde há uma base de apoio, feita de papel e fita com espuma nas duas faces. Em seguida, um rolo aquecido exerce pressão para fixar o papel à base. Uma fonte de laser com alta precisão de foco apara o contorno da primeira camada sobre o papel e quadricula a área em excesso, ou seja, o espaço negativo do protótipo. Esse quadriculado rompe o material extra, tornando fácil sua remoção durante o processamento posterior. Esse material em excesso proporciona um excelente suporte para projeções, saliências e seções com paredes finas durante o processo de construção. Após o corte da primeira camada a plataforma é recuada, permitindo que o rolo coletor recubra-a com uma nova camada de material. Este processo é repetido até a conclusão do modelo, que apresentará uma textura similar à da madeira, (figura I.2).

Por se tratarem de modelos feitos de papel, eles devem ser revestidos com material impermeável, tinta ou verniz, para evitar danos provocados pela umidade.

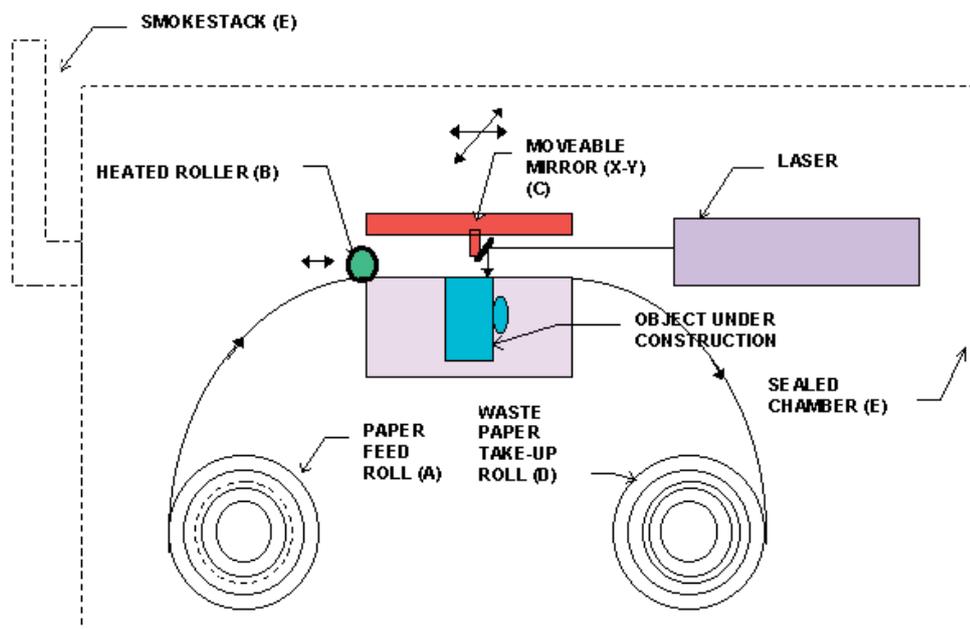


Figura I.2- Ilustração do processo de LOM. (UCF, 2005)

Atualmente este processo permite o uso de materiais plásticos, cerâmicos e até metálicos. Porém, pelo fato deles serem empregados na forma de pó, exigem uma etapa de sinterização para que o modelo final adquira resistência mecânica.

I.1.3- Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Este processo surgiu em 1989 e baseia-se na fundição de partículas sólidas de matérias, por meio de uma fonte de laser, para se obter o modelo sólido. Dentre os materiais utilizados por esta técnica encontra-se o náilon, elastômeros e metais.

Os objetos são gerados sobre uma plataforma recoberta com as partículas sólidas do material. A fonte de laser funde a primeira camada, sinterizando o material. Em seguida a plataforma é recuada e recoberta com uma nova camada de material, para que a segunda camada sólida possa ser sinterizada, (figura I.3).

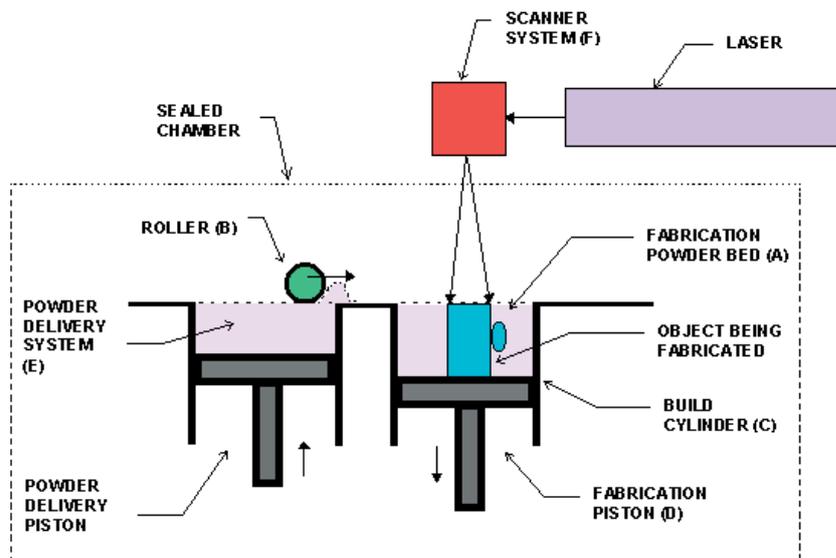


Figura I.3- Ilustração do processo de SLS. (UCF, 2005)

Todo o processo é repetido até o término do modelo. O material em excesso, ou seja, não sinterizado, fornece suporte a componentes como cavidades, durante sua construção, sendo removido ao final do processo.

I.1.4- Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)

Este processo baseia-se na deposição de filamentos de resina termoplástica aquecida sobre uma plataforma, possibilitando a confecção do modelo.

Uma matriz injetora, com 2 graus de liberdade, move-se no plano X-Y, injetando sobre uma plataforma filetes finos da resina aquecida, formando a primeira camada do modelo. A temperatura da plataforma é controlada e mantida abaixo da temperatura de fusão da resina, de modo que esta se solidifique rapidamente. Após o endurecimento da resina, a plataforma é recuada e a matriz injetora deposita uma segunda camada, (figura I.4). O processo é repetido até a construção total do modelo.

As resinas empregadas neste processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros e cera.

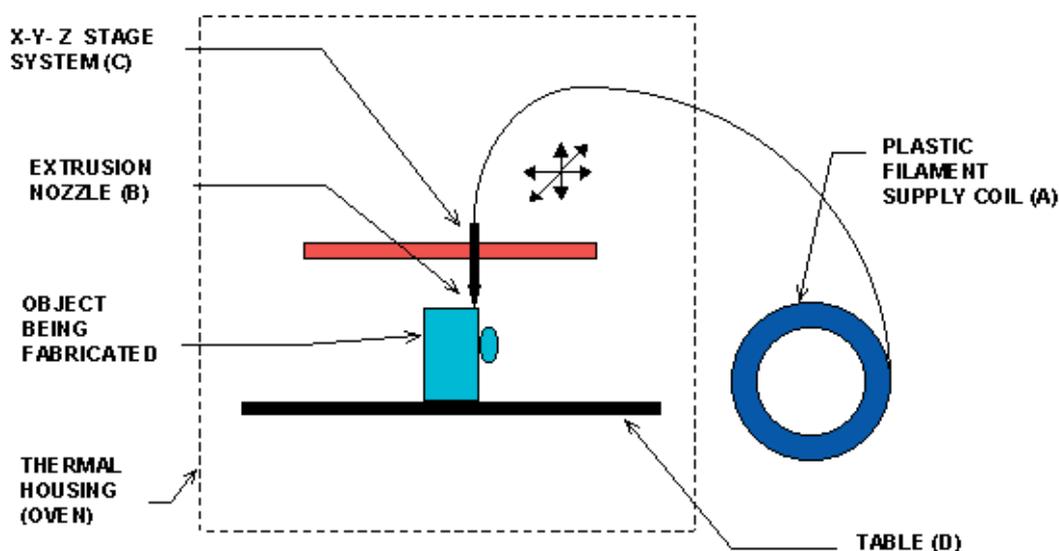


Figura I.4- Ilustração do processo de FDM. (UCF, 2005)

I.1.5-Cura Sólida na Base (SGC)

Este processo é similar a estereolitografia, pois também utiliza radiação ultravioleta para solidificar, polímeros fotossensíveis, mas ao contrário da estereolitografia, este processo cura a camada inteira.

A resina foto-sensível é aspergida sobre uma plataforma de construção. Em seguida, a máquina gera uma foto-máscara correspondente à camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de vidro acima da plataforma de construção, processo similar ao das fotocopiadoras.

A máscara é exposta à radiação ultravioleta, que passa através das regiões transparentes da máscara, curando apenas a região desejada de resina. Ao término da cura, a resina em estado líquido é retirada por vácuo e nesta região é depositada uma cera, utilizada como apoio

da próxima camada.

Por fim a superfície superior é fresada, retirando as imperfeições da cera. Todo este processo é repetido até a conclusão do modelo (figura I.5).

Após a retirada do modelo da máquina, este deve ser imerso em solvente para retirar a cera.

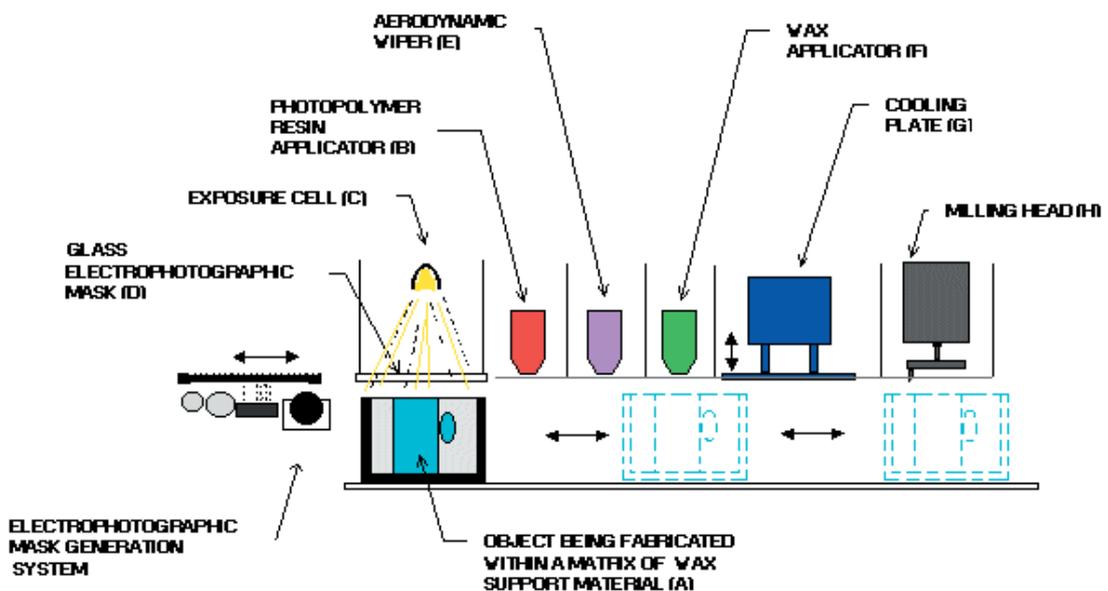


Figura I.5- Ilustração do processo de SGC. (UCF, 2005)

I.1.6- Modelagem Multi Jato (MJT)

Adversa as outras técnicas apresentadas, esta é uma classe que utiliza uma tecnologia semelhante a usada em impressoras de jato de tinta.

Os modelos são construídos sobre uma plataforma recoberta de partículas sólidas de material. Um cabeçote semelhante aos empregados na impressão por jato de tinta estampa nas regiões desejadas, um agente catalítico que funde e aglomera as partículas sólidas, obtendo uma camada do modelo. A plataforma é ligeiramente recuada e uma nova camada de partículas sólidas é adicionada, para constituir a nova

camada do modelo. Estas etapas são executadas até a obtenção total do modelo, (figura I.6).

Ao término do processo o modelo é sinterizado e o material excedente é removido. As partículas empregadas são constituídas de materiais cerâmicos, metálicos ou plásticos.

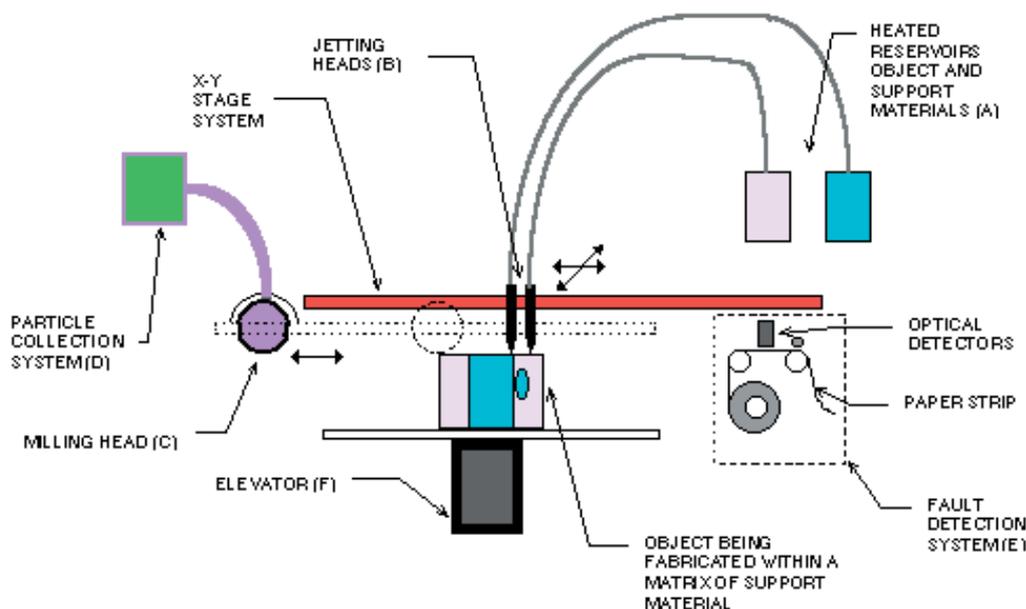


Figura I.6- Ilustração do processo de MJT. (UCF, 2005)

I.1.7- Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS)

Este processo surgiu no mercado recentemente, apresentando a vantagem de produzir modelos de metal plenamente densos, ou seja, o modelo não é sinterizado, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção.

O processo utiliza uma fonte de laser, de alta potência, para fundir partículas sólidas de material metálico, abastecido coaxialmente ao cabeçote focal do laser. O feixe de laser passa pelo centro do cabeçote e funde o material, que é depositado sobre uma plataforma com dois

eixos de liberdade. A plataforma move-se no plano X-Y traçando a primeira camada do modelo, em seguida o cabeçote é recuado para traçar a segunda camada, (figura I.7).

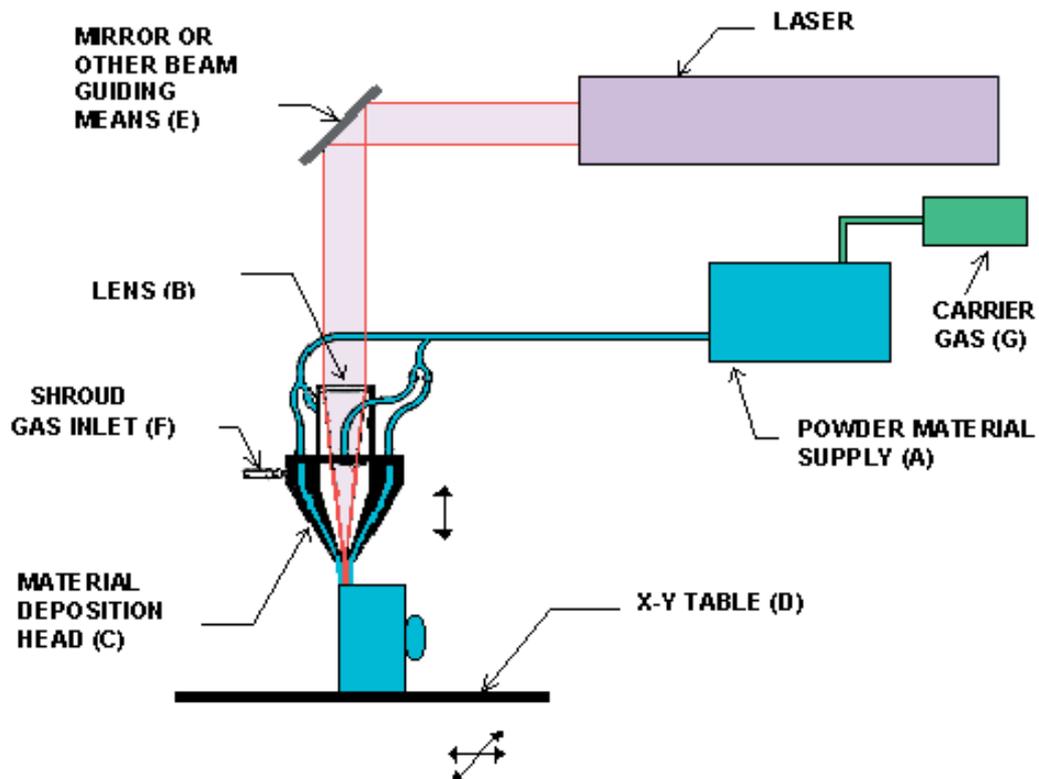


Figura I.7- Ilustração do processo de LENS. (UCF, 2005)

Estas etapas são repetidas até a conclusão do modelo. Durante todo o processo o material fundido é envolto por gases inertes para evitar qualquer reação de oxidação.

Geralmente, são utilizadas ligas metálicas, tais como: aço inoxidável, cobre, alumínio e titânio.

A potência do gerador do feixe de laser varia segundo alguns parâmetros como: material usado, taxa de deposição entre outros parâmetros, podendo oscilar desde algumas centenas até 20.000 w ou mais.

Os modelos produzidos necessitam de acabamento superficial, por meio dos processos clássicos de manufatura como: usinagem.

I.2- Usinagem por CNC

Os processos clássicos estão reunidos numa classe de processos de manufatura que emergiram concomitantemente com a indústria, cuja evolução está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento tecnológico industrial. Destes processos têm-se: sinterização, forja, extrusão, eletro-erosão, usinagem, fundição, entre outros.

Dos processos tidos como clássicos, o mais apto à manufatura do hélice é a usinagem, por meio de máquinas de fresa. Este processo caracteriza-se pela extração de material para gerar um modelo, portanto qualquer erro inutiliza toda a peça. No intuito de evitar tais erros, estes processos foram automatizados, os tornando mais precisos, menos suscetíveis a erros humanos.

A esta técnica automatizada de manufatura é atribuído o nome de fresamento CNC, pelo fato da automação ser realizada por controladores numéricos computacionais. No mercado atual existem inúmeros modelos de fresas CNC, conforme o número de eixos de liberdade da máquina, a velocidade de rotação do cabeçote fresador, porte da máquina entre outros.

Independente do modelo de máquina, todas utilizam um conjunto de instruções, padronizado, denominado código G, responsável pelo acionamento dos atuadores presentes na máquina. Atualmente a resolução e precisão destas máquinas compreendem a faixa dos micrometros e a vasta quantidade de materiais que podem ser empregados por esta técnica, tornam-na apta para a manufatura do hélice.

Este processo de manufatura possui dois segmentos, que serão abordados a seguir.

I.2.1- Segmento maquinário.

Como dito anteriormente a variedade de máquinas CNC disponíveis no mercado é grande, cada qual com características particulares. Para afirmar qual máquina é a mais qualificada para a manufatura de um modelo de hélice e limitar as opções, é necessário fazer um estudo de casos que deve levar em consideração alguns parâmetros.

Um primeiro parâmetro a ser analisado é a compatibilidade entre as dimensões do modelo e a máquina. Pelo fato dos modelos de hélices apresentados anteriormente não ultrapassar 200 mm de diâmetro, as opções continuam muito vastas, pois a maioria das máquinas, presentes no mercado, suportam a confecção de modelos com tais dimensões.

Outra questão é saber se as pás do modelo se sobrepõem, neste caso a usinagem só é possível utilizando máquinas CNCs com 5,(figura I.8), ou mais eixos, pois apenas estes modelos de máquina possuem o recurso de movimentar a mesa de apoio, onde o modelo é fixado, permitindo o alinhamento entre a ferramenta e o modelo, possibilitando que a ferramenta atinja as regiões de sobreposição. Este movimento também possibilita que a ferramenta mantenha a normal em relação à superfície do hélice, evitando-se sempre qualquer tipo de interferência, este fato otimiza todo o processo de usinagem, pois a ferramenta nesta posição se torna mais eficiente, exigindo um menor número de ciclos para acabamento da peça.

A usinagem com máquinas de três eixos, além de só poder ser utilizada quando não há sobreposição das pás, exige diversos cuidados e um número maior de ciclos de acabamento pois a ferramenta é mantida normal à mesa de apoio e não à superfície do modelo. Uma grande vantagem deste tipo de máquina é a sua disponibilidade no mercado.

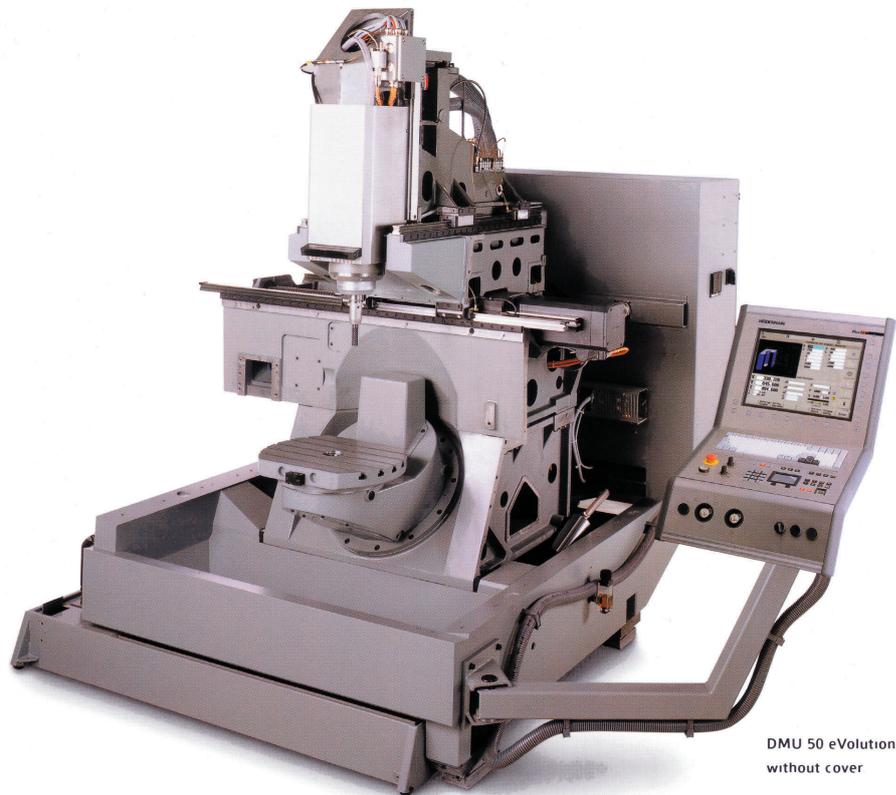


Figura I.8- Exemplo de fresa CNC de 5 eixos.

O processo de usinagem em geral é trabalhoso e lento, têm-se questões como: a escolha da ferramenta e passo entre os caminhos da ferramenta, os quais influenciam diretamente a qualidade de acabamento da peça, porém estes, geralmente, ficam a cargo da experiência do operador, (KUO et al., 2001). Dependendo do modelo a ser usinado, por exemplo os que possuem sobreposição entre as pás, todo o processo de manufatura torna-se trabalhoso e em alguns casos até mesmo impraticável, quando são empregadas máquinas CNCs de três eixos.

Hoje, existem algumas pesquisas que abordam as dificuldades no processo de usinagem de superfícies complexas, utilizando máquinas de três eixos, inerentes à escolha e ao passo da ferramenta. Na maioria das circunstâncias é adotado como estudo de caso modelos de hélices, dada sua geometria peculiar, que agrega em um mesmo objeto diferentes condições de complexidade.

Para melhor ilustrar e discutir o problema é conveniente segmentar o hélice em três regiões e tratá-las distintamente.

A primeira região de estudo encontra-se na intersecção entre a raiz e o bosso do hélice. Nesta região é obrigatório à existência de uma concordância circular, cuja execução exige o uso de ferramentas de fundo redondo (“ball-end cutter”), procedimentos distintos são aconselháveis nos casos em que o hélice possui ou não deslocamento axial.

Quando a pá não possui deslocamento axial, o raio da ferramenta pode ser idêntico ao raio desejado (figura I.9).

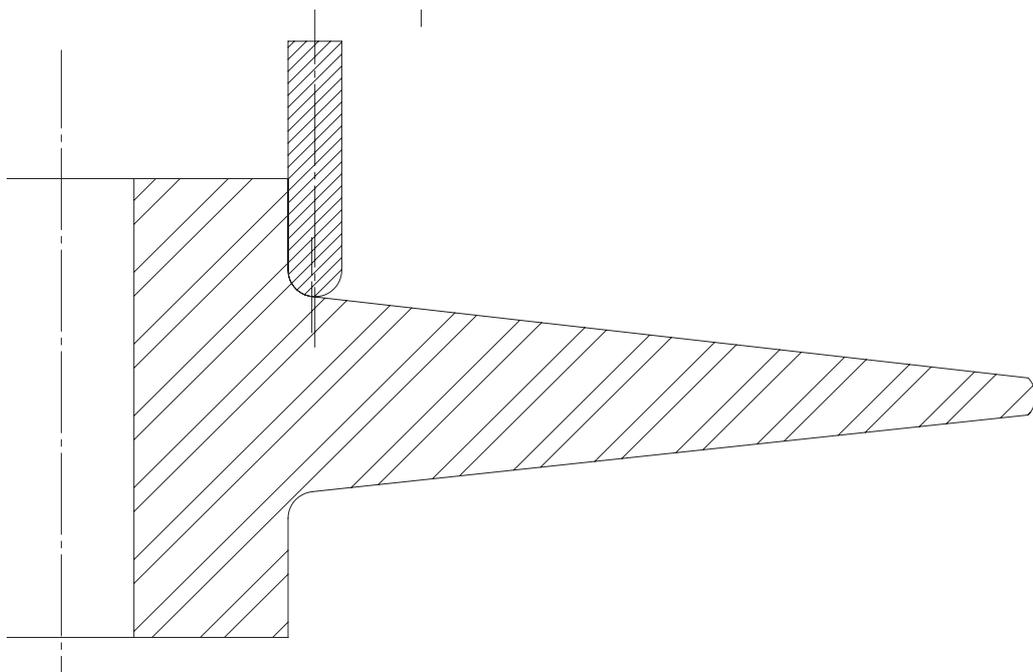


Figura I.9- Processo de usinagem de uma pá sem deslocamento axial. O ponto de tangência entre a ferramenta e a superfície antecede o raio da ferramenta permitindo que esta desempenhe seu papel sem comprometer a peça.

Quando a pá possui um deslocamento axial, o raio da ferramenta deve ser inferior a um certo valor, dado pela equação (I.4), pois o ponto de tangência entre a ferramenta e a superfície da pá, impede a aproximação da mesma para traçar o raio desejado (figura I.10). Ampliando-se esta região, (figura I.11), é possível estabelecer algumas

relações entre os triângulos obtidos, e dessas relações obtém-se uma equação para determinar o parâmetro “raio de ferramenta”, equação (I.4), proposta em (KURO et al., 2001).

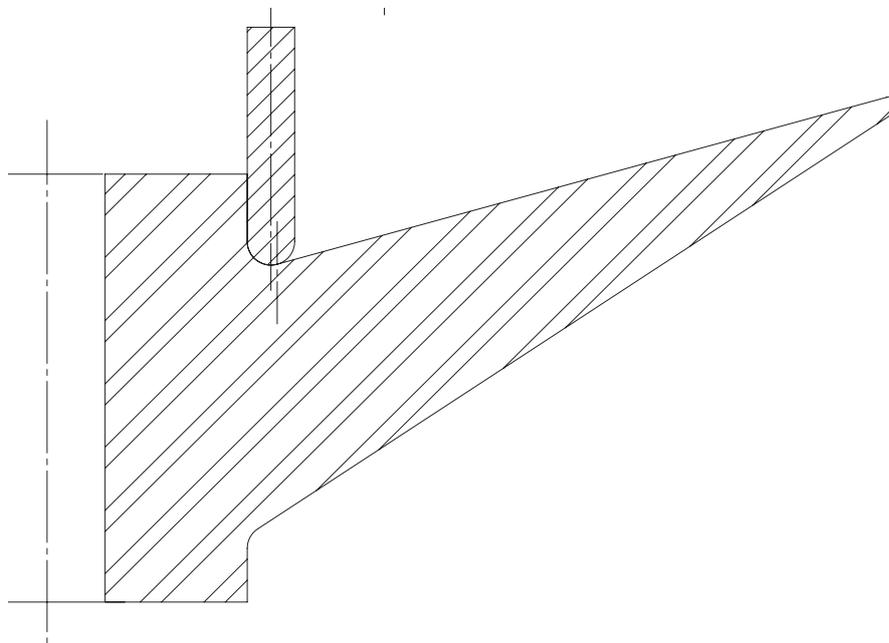


Figura I.10- Processo de usinagem de uma pá com deslocamento axial. O raio da ferramenta antecede o ponto de tangência entre ela e a superfície gerando um pequeno erro na peça.

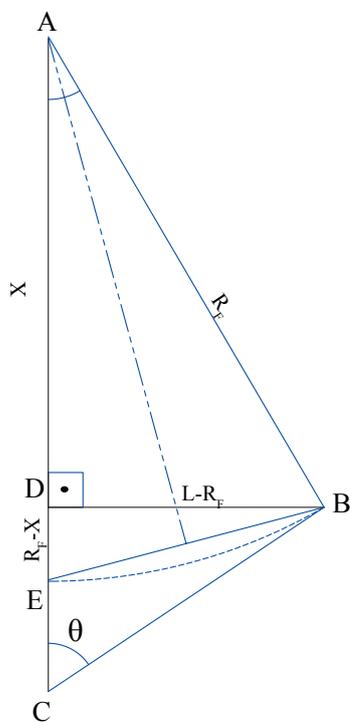


Figura I.11- Ampliação da região de tangência da ferramenta com a superfície da pá da apresentada na figura I.10

$$R_F^2 = X^2 + (L - R_F)^2 \quad \text{I.1}$$

$$(2 \cdot W)^2 = (L - R_F)^2 + (R_F - X)^2 \quad \text{I.2}$$

$$\frac{W}{R_F} = \text{sen} \left(\frac{90 - \theta_r}{2} \right) \Rightarrow W = R_F \cdot \sqrt{\frac{1 - \text{sen} \theta_r}{2}} \quad \text{I.3}$$

Do triângulo “ABD”, extrai-se a equação (I.1), do triângulo “BDE”, obtém-se a equação (I.2) e do triângulo “AEF”, tem-se a equação (I.3). Substituindo-se a equação I.1 e I.3 em I.2 tem-se:

$$4R_F^2 \left(\frac{1 - \text{sen} \theta_r}{2} \right) = L^2 + 2R_F^2 + R_F^2 - (L - R_F)^2 - 2R_F \cdot L - 2R_F \cdot \sqrt{R_F^2 - (L - R_F)^2}$$

$$4R_F^2 \left(\frac{1 - \text{sen} \theta_r}{2} \right) = 2R_F^2 - 2R_F \sqrt{-L^2 + 2L \cdot R_F}$$

$$R_F^2 (1 - \cos^2 \theta_r) = -L^2 + 2L \cdot R_F$$

$$R_F \cdot \cos \theta_r = L - R_F$$

$$R_F = \frac{L}{\cos \theta_r + 1} \quad \text{I.4}$$

Sendo:

L a distância entre o bosso e o ponto de tangência da ferramenta;

θ_r ângulo entre o eixo da ferramenta e a reta tangente à superfície da pá, numa secção de contato.

A segunda região de estudo é a superfície de pressão, que dada a geometria dos perfis, tende a ser sempre uma superfície côncava. Intuitivamente, é fácil constatar que o raio da ferramenta deve ser inferior ao raio de curvatura da superfície. Porém, além disso, o passo entre os caminhos da ferramenta é importante, pois determinará o grau de acabamento da superfície.

Pelo fato da ferramenta se manter normal à mesa de apoio, há a formação de degraus entre um caminho e outro da ferramenta. Quanto

maior a distância entre os caminhos, maior será o tamanho deste degrau, (KUO et al., 2001), o que acaba influenciando diretamente na eficiência hidrodinâmica do hélice. Portanto a distância entre os caminhos da ferramenta deve ser a menor possível, mantendo o padrão requerido pelo projeto.

A terceira e ultima região de estudo é a superfície de sucção, que dada à geometria dos perfis tende a ser sempre convexa, os mesmos cuidados dados à superfície de pressão devem ser levados em consideração para esta região, porém mais um detalhe deve ser observado, em relação ao acabamento. Baseando-se na teoria da circulação, sabe-se que grande parte do empuxo gerado por um hélice é proveniente desta superfície, portanto para se evitar grandes discrepâncias entre os valores teóricos e os práticos da eficiência hidrodinâmica do propulsor, é necessário reduzir bem o passo entre os caminhos da ferramenta, evitando-se ao máximo a formação de degraus entre eles.

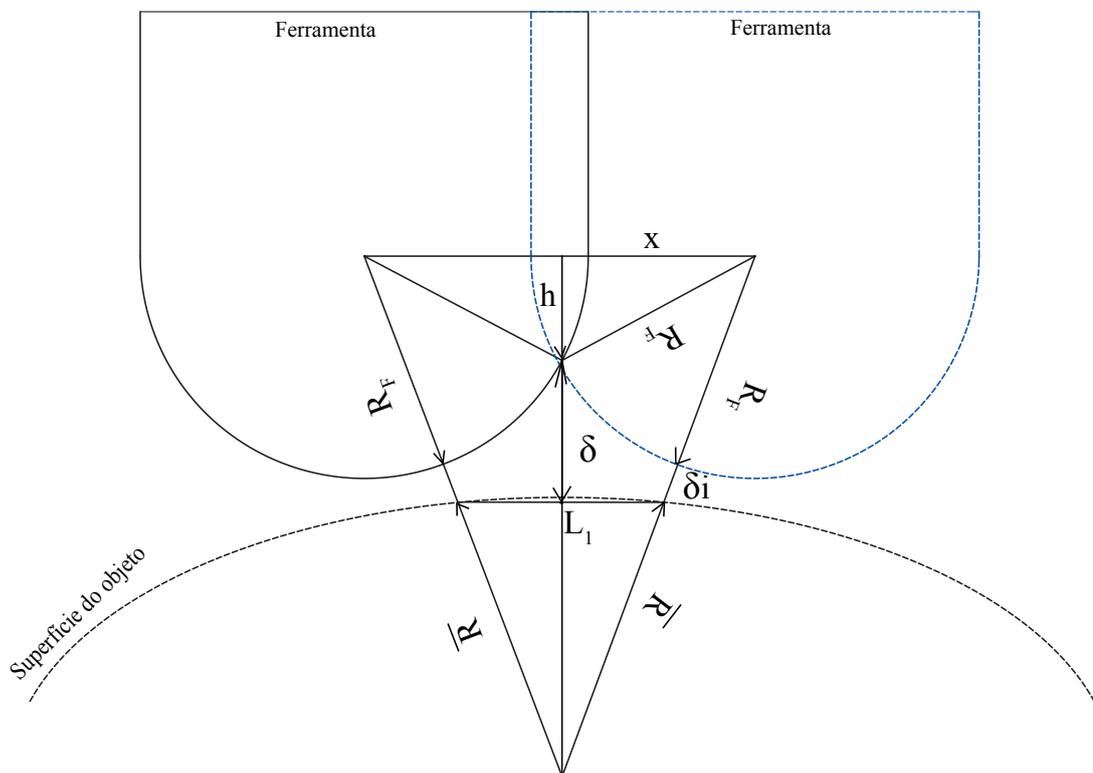


Figura I.12- Ilustração do erro gerado entre dois caminhos adjacentes da ferramenta.

Analisando-se estas duas ultimas regiões é possível estabelecer uma relação entre o raio da superfície, o raio da ferramenta e o passo entre os caminhos da ferramenta, para determinar o erro do acabamento superficial, equação (I.5), figura (I.12).

$$\begin{aligned}
 (R_f + \delta i + \bar{R})^2 &= (h + \delta + \bar{R})^2 + X^2 \\
 \delta &= \sqrt{(R_f + \delta i + \bar{R})^2 - \left(\frac{L_1}{2\bar{R}} \cdot (R_f + \delta i + \bar{R})\right)^2} - h - \bar{R} \\
 \delta &= \sqrt{(R_f + \delta i + \bar{R})^2 - \left(\frac{L_1}{2\bar{R}} \cdot (R_f + \delta i + \bar{R})\right)^2} - \sqrt{R_f^2 - X^2} - \bar{R} \\
 \delta &= \sqrt{(R_f + \delta i + \bar{R})^2 - \left(\frac{L_1}{2\bar{R}} \cdot (R_f + \delta i + \bar{R})\right)^2} - \sqrt{R_f^2 - \left(\frac{L_1}{2\bar{R}} \cdot (R_f + \delta i + \bar{R})\right)^2} - \bar{R}
 \end{aligned} \tag{I.5}$$

Sendo:

R_f raio da ferramenta;

\bar{R} raio da superfície

δi erro inerente à resolução da máquina CNC;

L_1 Passo entre os caminhos da ferramenta;

É importante salientar que o processo de usinagem é realizado em duas etapas: o desbaste, cujo objetivo é extrair a maior quantidade possível de material excedente e a etapa de acabamento, na qual o caminho da ferramenta obedece critérios de tolerância, conforme as equações (I.4) e (I.5). Alguns autores incluem uma etapa intermediária, designando-a de semi-acabamento, onde já são empregadas as ferramentas de fundo redondo, porém questões como o seu diâmetro e passo, não seguem a risca os parâmetros de tolerância. (YOUN et al, 2003).

Particularmente, como obstáculo à aplicação destas pesquisas, têm-se a falta de praticidade na obtenção de parâmetros exigidos pelas equações propostas em (KUO et al., 2001), pois geralmente, o projetista

e o operador da máquina são pessoas distintas e tais parâmetros não são explícitos no modelo em CAD, levando o operador a selecionar o raio da ferramenta e o passo entre os caminhos da ferramenta, de acordo com sua experiência profissional, muitas vezes oriunda da tentativa e erro.

Como os modelos de hélice aqui tratados possuem dimensões reduzidas, surge um outro problema, correspondente ao aparecimento de forças de cisalhamento, devido à pressão da ferramenta durante o processo de extração de material. Isso ocorre principalmente após a usinagem de uma das superfícies, retirando o seu apoio.

No intuito de evitar qualquer deformação inelástica e até mesmo o rompimento da peça, é proposta a confecção de um apoio, que deve ser utilizado após a usinagem de uma das superfícies. Este apoio, ou melhor berço, é o negativo de uma das superfícies do hélice, deste modo, ao virar a peça, o operador prende-a sobre o berço e continua o processo. Por ser o negativo de uma das superfícies este berço apóia a pá por inteiro, de modo que esta passa a suportar uma pressão maior da ferramenta.

I.2.2- Segmento de instruções

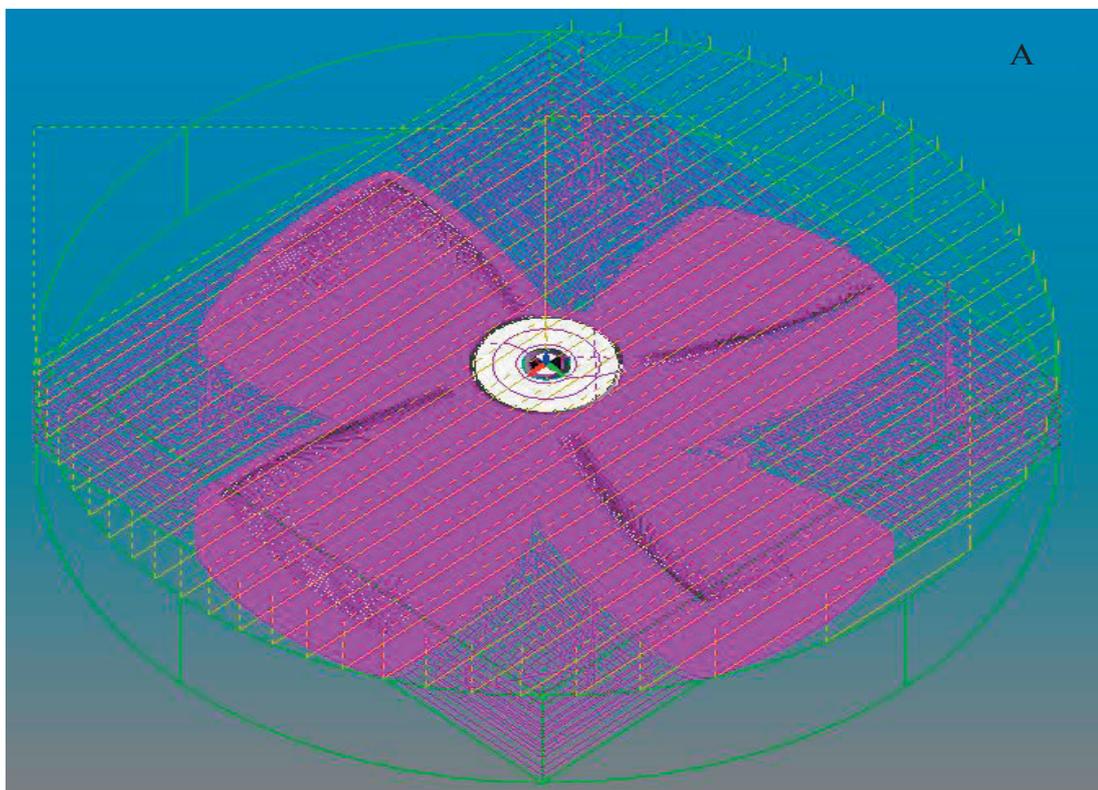
Este segmento está relacionado ao código G, que fornece instruções como: velocidade de avanço do cabeçote, ponto referencial, retorno da ferramenta, troca de ferramenta, rotação da ferramenta, coordenada dos pontos da superfície, entre outras.

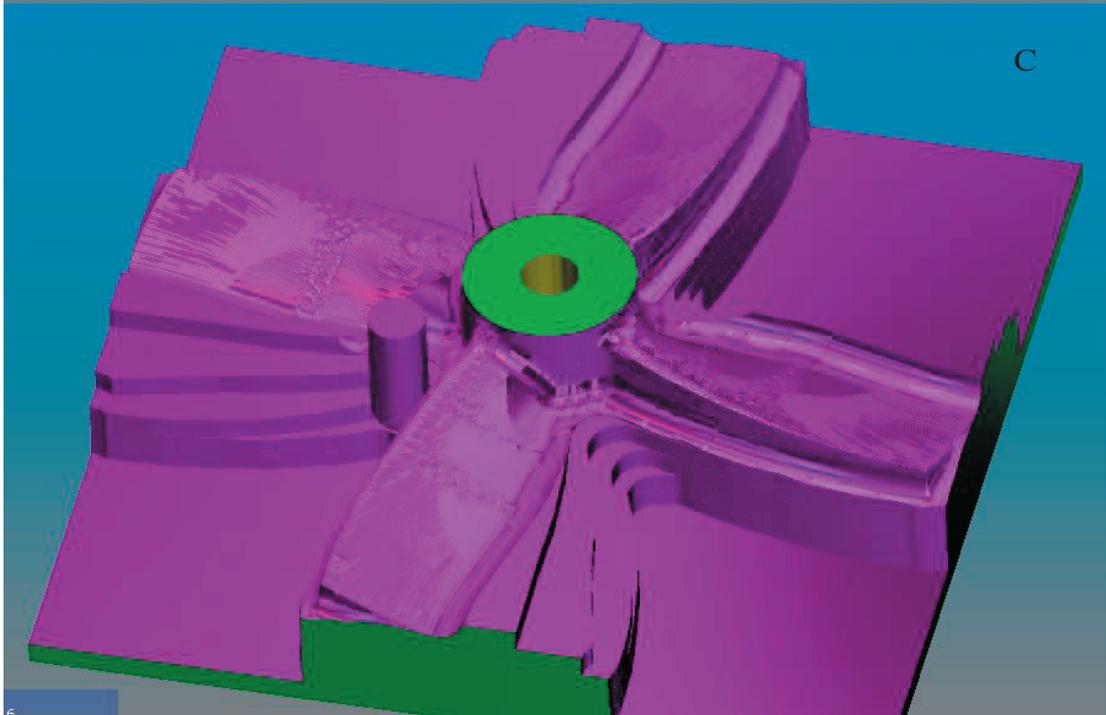
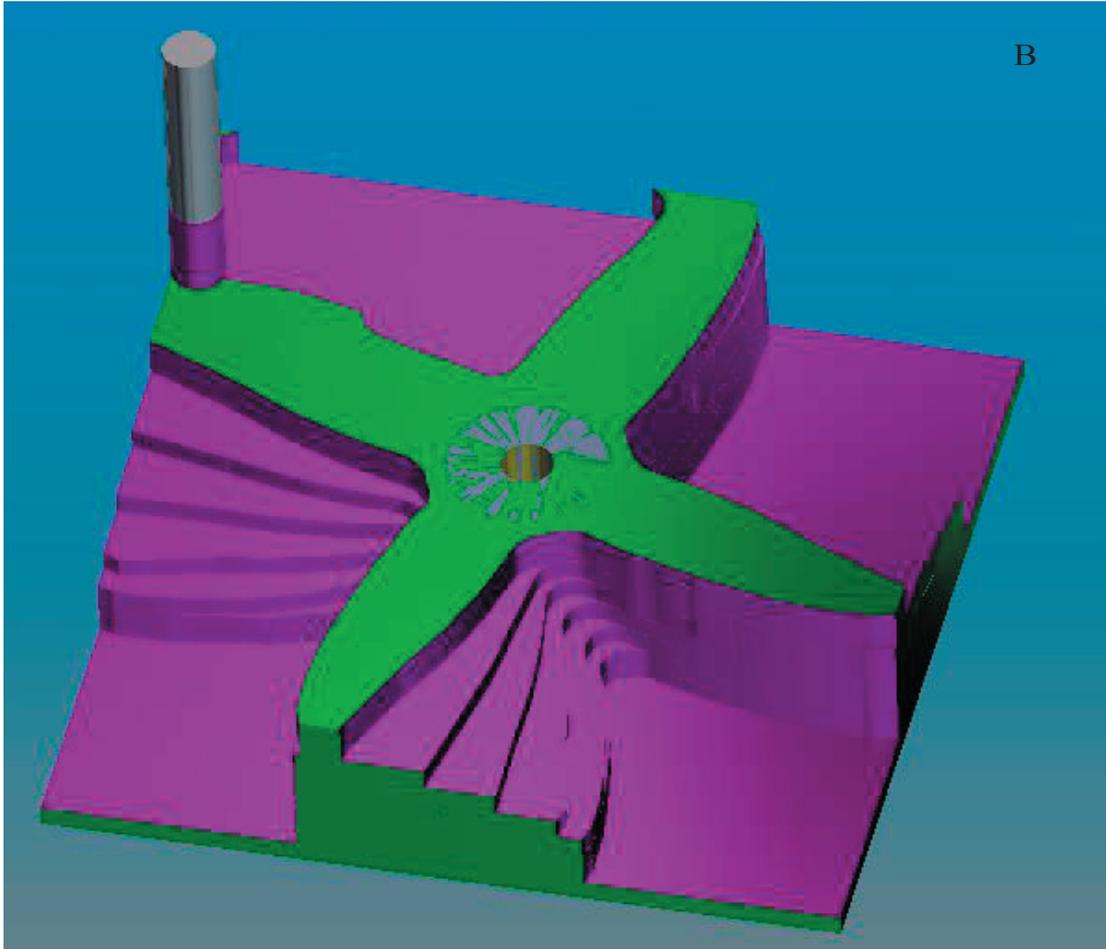
Dada a complexidade dos modelos de hélice, recorre-se a programas capazes de gerar automaticamente o código G. Devido à eficiência destes programas, eles são largamente empregados na indústria.

Estes programas possuem inúmeros recursos de usinagem, porém os mais atrativos são os algoritmos de otimização e recursos de simulação, que reduzem as possibilidades de erro e a visualização virtual dos mesmos antes de ocorrerem.

Para testar a viabilidade do uso destes programas para a confecção de modelos de hélice, adotou-se o programa EdgeCAM que dentre os algoritmos de otimização, constam os de compensação de raio da ferramenta, caminho de ferramenta tanto para superfícies simples como para superfícies complexas.

A simulação obtida do processo de usinagem em máquina CNC de três eixos (figura I.13), não apresentou qualquer tipo de erro como: colisões inapropriadas, ou desbaste além da superfície, porém para a devida comprovação da eficiência deste programa, seriam necessários teste práticos, que devido a falta de recursos não puderam ser executados.





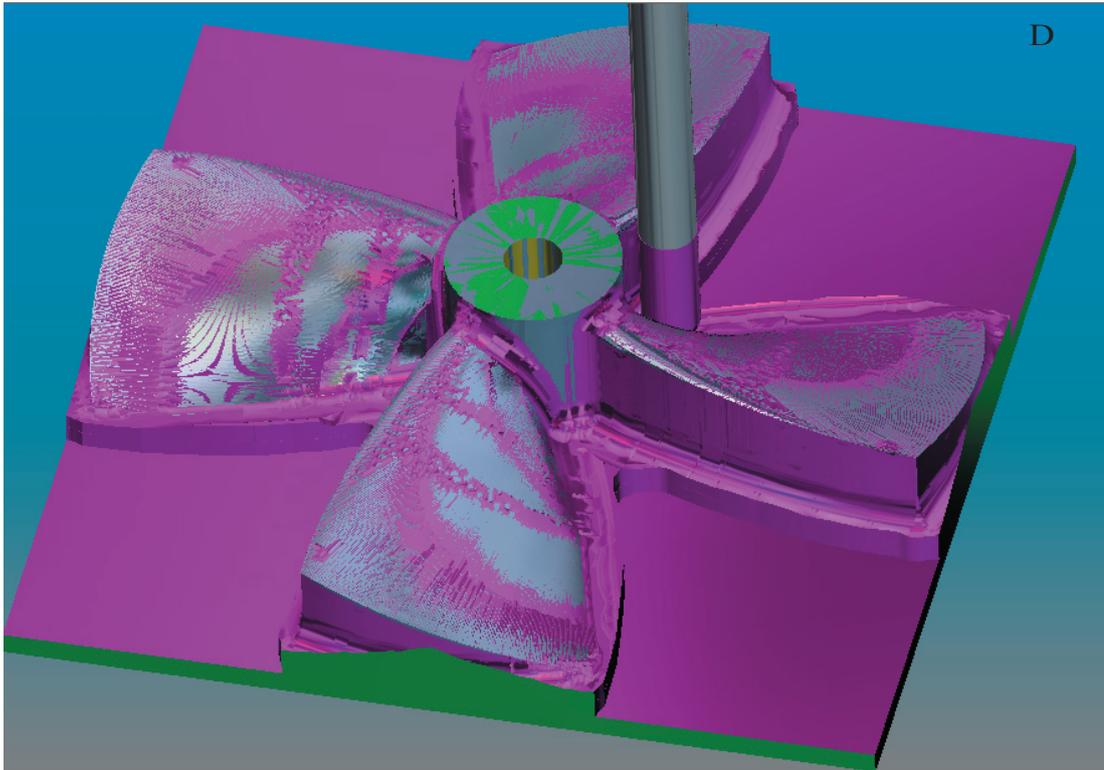


Figura I.13- Simulação do processo de usinagem com máquina CNC de 3 eixos obtida utilizando o programa edgeCAM. A) Caminhos da ferramenta; B) Etápa de desbaste; C) Início da etápa de acabamento; D) Próximo ao término do acabamento.

I.3- Seleção do Processo.

Dentre todos os processos apresentados, tendo-se como referência questões como acabamento superficial dentro dos padrões exigidos pelos hélices, pode-se afirmar que os processos mais adequados são a usinagem com máquinas CNC de 5 ou mais eixos e a estereolitografia. Se questões como custo e tempo também forem parâmetros decisivos, então se têm apenas a estereolitografia.

Uma das apreensões com relação à estereolitografia, está relacionada às propriedades mecânicas das resinas utilizadas. Atualmente existem pesquisas para melhorar tais aspectos, porém as resinas ditas de alta resistência ainda não substituem por completo materiais metálicos. Para a devida homologação do uso destas resinas nos modelos de hélice,

são necessários alguns testes. Algumas das características mecânicas destas resinas são apresentadas abaixo, (tabela I.1), juntamente com as características do alumínio 6010, a título de comparação.

Dentre as resinas de alto impacto existentes, as mais difundidas no mercado da prototipagem rápida são a “DuraForm” do tipo “Pa” e “GF” e a resina “Accura Si 50”. Tais resinas foram desenvolvidas com o objetivo de gerar protótipos integralmente funcionais.

Material	Alumínio 6010	DuraForm		Accura Si 50
		Pa	GF	
Densidade (g/cm ³)	2,71	0,59	0,84	1,21
Alongamento de ruptura	24%	9%	2%	15%
Módulo de tração (MPa)	290	1600	5910	2690
Resistência à tração (MPa)	170	44	38,1	50

Tabela I.1- Propriedades mecânicas das resinas de alto impacto, utilizadas na estereolitografia e o alumínio utilizado no processo de usinagem do hélice.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)