

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Estudo Numérico da Relevância de Parâmetros Construtivos de Lemes na Manobrabilidade de um  
Nautimodelo

por

Rafael Palmimi Valter

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2019

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Valter, Rafael Palmirini  
Estudo Numérico da Relevância de Parâmetros  
Construtivos de Lemes na Manobrabilidade de um  
Nautimodelo / Rafael Palmirini Valter. -- 2019.  
22 f.  
Orientador: Guilherme Henrique Fiorot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Leme. 2. Nautimodelo. 3. Simulação Numérica. 4.  
DoE. I. Fiorot, Guilherme Henrique, orient. II.  
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rafael Palmini Valter

Estudo Numérico da Relevância de Parâmetros Construtivos de Lemes na Manobrabilidade de um  
Nautimodelo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Comissão de Avaliação:

Prof. Volnei Borges

Prof. Francis França

Prof<sup>a</sup>. Paulo Schneider

Porto Alegre, Dezembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

**Estudo Numérico da Relevância de Parâmetros Construtivos de Lemes na Manobrabilidade de um Nautimodelo**

**Valter, Rafael Palmi**

Email: rvalter11@hotmail.com

**Resumo.**

*O presente trabalho apresenta um estudo numérico de relevância de parâmetros de projeto e construção de lemes para nautimodelo, tendo como referência a força de manobra produzida pelo leme em função dos seus parâmetros construtivos. Para se obter a força de sustentação foram realizadas simulações no programa ANSYS/Fluent utilizando modelo de turbulência  $k - \omega$  SST e posteriormente utilizou-se a ferramenta de Design of Experiments (DoE) do programa MiniTab para se obter as relações de importância entre os parâmetros de projeto.. Como resposta final, verificou-se que o ângulo de ataque, seguido da velocidade e da corda são os parâmetros mais relevantes para se obter maiores valores de força de manobra. Além disso, combinações de velocidade e ângulo, corda e ângulo, velocidade e corda, mostraram-se mais importantes do que a variação do perfil hidrodinâmico. A partir desses resultados a equipe Nautilus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul poderá melhorar o desempenho do leme utilizado no nautimodelo de competição e otimizar os esforços da equipe, permitindo assim que se tenha ótima capacidade de manobra e tempo disponível para desenvolvimento de outros projetos para o nautimodelo.*

**Palavras-chave:** Leme, Nautimodelo, Simulação Numérica, DoE.

**Abstract.**

*The present work presents a numerical study of the relevance of design and construction parameters of rudders for nautimodel, having as reference the maneuvering force produced by the rudder as a function of its constructive parameters. To obtain the lift force, simulations were performed in the ANSYS / Fluent program using the  $k-\omega$  SST turbulence model and then the Design of Experiments (DoE) tool of the MiniTab program was used to obtain the relationships of importance between the parameters. As a final answer, it was found that the angle of attack, followed by speed and rope are the most relevant parameters to obtain higher values of maneuvering force. In addition, combinations of speed and angle, chord and angle, speed and chord proved to be more important than hydrodynamic profile variation. From these results, the Nautilus team from the Federal University of Rio Grande do Sul will be able to improve the performance of the rudder used in the competition model and optimize the team's efforts, thus allowing for excellent maneuverability and time to develop other projects. for the nautimodel.*

**Keywords:** Rudder, Nautimodel, Numerical Simulation, DoE.



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

A prática do modelismo passou a ser parte relevante de projetos complexos como método de ensaiar estruturas reais em escala reduzida. Não se tem uma data exata para a criação do nautimodelismo mas sabe-se que há mais de 4.000 anos os egípcios já utilizavam desta prática para mostrar aos compradores como ficaria a embarcação encomendada ao armador. Projetos de diversos tipos de embarcações podem ser replicados através do nautimodelismo tais como lanchas, veleiros e rebocadores.

Para o caso específico dos rebocadores portuários, tem-se que este tipo de modelo de embarcação são desenvolvidas para auxiliar na manobra de atracação e desatracação de outros barcos ou barcaças, conforme Fragoso & Cajaty (2012). Usualmente, este tipo de manobra é extremamente delicada e complicada de se executar devido a inércia das massas envolvidas e o espaço disponível nos portos, que normalmente é limitado. Por estes motivos, o conjunto propulsivo e de manobra da embarcação devem fornecer, respectivamente, grande torque e alta capacidade de manobra, fatores que garantem um melhor desempenho nas atividades propostas para estes modelos de embarcação. Além disso, os rebocadores portuários normalmente podem possuir dois tipos de propulsão: hélice azimutal, que gira em torno de um eixo vertical dispensando o uso de leme, e hélice juntamente com leme, mostrando a versatilidade e variedade que os modelos deste tipo apresentam.

Neste âmbito, a equipe Nautilus, sediada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, projeta e constrói um nautimodelo de rebocador portuário com o objetivo de integrar conhecimentos e competências adquiridas durante a formação de estudantes de diversas áreas para o Desafio Universitário de Nautidesign realizado anualmente na cidade de Joinville. Na competição os projetos das embarcações e seus desempenhos são avaliados em provas propostas para verificar características críticas de um rebocador. As principais provas da competição são as provas de Bollard Pull e provas de manobrabilidade de uma barcaça com 200 quilogramas, inicialmente acoplado e posteriormente desacoplado. Bollard Pull (Marin, 2019), é a força fornecida pelo conjunto propulsivo da embarcação.

A equipe Nautilus, nos últimos anos, vem obtendo resultados satisfatórios por estar em seus primeiros anos de competição, porém percebe-se a necessidade de direcionar os esforços dos integrantes da equipe para outros elementos do projeto do nautimodelo relevantes para obter melhores resultados, identificando assim os pontos críticos e favorecendo o desenvolvimento de um leme dentro das capacidades técnicas e limitações financeiras da equipe. Na Fig. 1 a seguir está exposto o nautimodelo construído pela equipe para a competição de 2019.

Assim, o presente trabalho visa identificar numericamente a relevância dos parâmetros de projeto de leme para a manobrabilidade da embarcação através da metodologia de *Design of Experiments* (DoE) em português, Planejamento de Experimentos, para as dimensões de um modelo de rebocador portuário. Desta maneira, pode-se então definir as características de projetos e construção que são críticas para a maior capacidade de manobra da embarcação.

Figura 1: Rebocador construído pela equipe para a competição de 2019.



## 1.2. Revisão Bibliográfica

Ozdemir, et al (2009) realizou o estudo em uma geometria 3D através do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  para força de sustentação e de arrasto com ângulos de ataque de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Para o ângulo de  $45^\circ$ , a simulação foi realizada juntamente do casco da embarcação para verificar o efeito da interação na força de sustentação. Foi plotada a curva de coeficiente de ataque e de sustentação em relação ao ângulo de ataque. Em relação à interação entre o casco da embarcação com o leme, sem o hélice, verificou-se através da simulação que o casco diminui a eficiência do leme por alterar o fluxo de água antes do leme.

Haque, et al (2017) realizou o estudo do coeficiente de sustentação para o leme de perfil NACA 0012 de uma embarcação em modelo 2D e 3D. Para o ensaio foi utilizado o modelo de turbulência  $k - kl - \omega$  e  $k - \omega SST$ , ambos através do Fluent. Para a validação, foi realizada a comparação dos coeficientes de sustentação e de arrasto da simulação com o resultado experimental se aproximando dos valores reais.

O trabalho de Liu, Quadvlieg & Hekkenberg (2015) faz um estudo numérico com o modelo de turbulência  $k - \omega SST$  de 5 tipos diferentes de perfil NACA. O objetivo é calcular o coeficiente de força normal utilizado nas fórmulas empíricas para cálculo da força normal gerada pelo leme e propõe uma nova fórmula para tal com o intuito de gerar maior precisão das fórmulas empíricas.

## 1.3. Objetivo

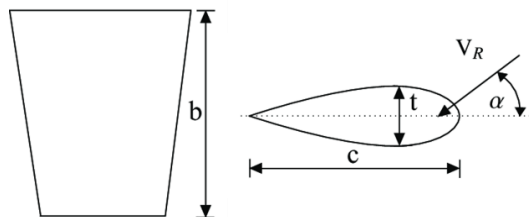
O objetivo deste trabalho é realizar uma análise de parâmetros de projeto e construção desenvolvidos para barcos em tamanho real e verificar a relevância dos mesmos para um rebocador portuário em escala reduzida. Será feito o gráfico de Pareto da importância dos parâmetros através da ferramenta de DoE disponível no programa MiniTab. A obtenção da força de manobra para diferentes tipos de leme será feita através de simulação numérica com o auxílio do programa ANSYS Inc. Esses resultados poderão ser utilizados futuramente para otimizar a capacidade de manobra da embarcação desenvolvida pela equipe Nautilus, equipe de Nautidesign da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1. Definições do Leme

O leme é um mecanismo de manobra das embarcações, situado na parte traseira da mesma, após o hélice. O projeto dimensional e de instalação são de fundamental importância para o melhor desempenho na manobrabilidade da embarcação. Na Fig. 2 são apresentadas as principais dimensões de projeto para um leme, segundo Mucha (2017).

Figura 2: Principais dimensões do Leme. Fonte: Mucha (2017).



Da esquerda para direita,  $b$  é a altura do leme,  $c$ , o comprimento do leme ou corda máxima,  $t$  é a espessura máxima,  $\alpha$  é o ângulo de ataque do escoamento incidente e  $V_R$  é a velocidade com a qual o escoamento chega ao leme.

No presente trabalho o dimensionamento do leme das embarcações é realizado utilizando-se o trabalho de Liu & Hekkenberg (2017). Em tal trabalho, os autores sugerem que a área lateral do leme  $A_l$  para cada tipo de embarcação deve seguir um percentual da área molhada da mesma, conforme indica Tab. 1.

Tabela 1: Percentual da área projetada recomendada para a área lateral de lemes para alguns tipos de embarcações. Fonte: Liu & Hekkenberg (2017).

Tipo de Embarcação	Área Projetada [%]
Containers Ship and Passenger Liners	1,2 até 1,7
Cross-Channel Ships	$\approx 2$
War Ships	2,4 até 2,8
Large Cargo	2,0 até 2,8
Small Cargo	1,7 até 2,3
Coastal Vessels	2,0 até 3,3
Tugs, Pilot Vessels and Ferry Boats	2,5 até 4

Além da área lateral, o trabalho de Lamb & Cook (1961) fornece algumas indicações a respeito da altura máxima  $b_{m\acute{a}xima}$  em função do diâmetro do hélice  $D_{hélice}$  apresentado na Eq. (1):

$$b_{m\acute{a}xima} = \frac{D_{hélice}}{0,6} \quad (1)$$

Outro coeficiente recomendado por aquele trabalho é a razão de aspecto  $r$ , função da altura do leme, corda média  $c_m$  e área lateral do leme  $A_l$ , que deve ficar entre 1,3 até 2,5. As Eq. (2) e (3) são utilizadas para o cálculo da razão de aspecto.

$$c_m = \frac{A_l}{b} \quad (2)$$

$$r = \frac{b}{c_m} \quad (3)$$

Finalmente, em relação ao perfil hidrodinâmico do leme, os modelos mais comuns e recomendados pelas bibliografias, inclusive por Lamb & Cook (1961), para rebocadores são NACA 0015, NACA 0018 e NACA 0021.

De posse do dimensionamento pode-se estimar parâmetros de operação do leme tais como a força normal gerada. O modelo proposto por Fuji & Tuda (1961) é apresentado pela Eq. (4) a seguir:

$$F_N = 0,5\rho A_L V_R^2 C_N \quad (4)$$

onde,  $\rho$  é a massa específica do fluido está caracterizada e  $C_N$  é o coeficiente de sustentação (relativo à força normal) calculado, conforme Fuji & Tuda (1961), pela Eq. (5).

$$C_N = \frac{6,13r}{r+2,25} \text{sen } \alpha \quad (5)$$

A Eq. (4) foi deduzida para um leme plano, delgado, sem perfil hidrodinâmico. Assim, esta equação é limitada, pois não utiliza um coeficiente que diferencie o emprego de tipos de perfis hidrodinâmicos. Esta limitação produz, assim, uma imprecisão na estimativa inicial da força normal no leme.



A velocidade com que o fluido chega ao hélice, de acordo com o trabalho de Zelazny (2014), para a embarcação em velocidade de cruzeiro, pode ser aproximada pelas Eq. (6), (7) e (8).

$$V_R = V(1 - w_R)\sqrt{1 + K_2 G_s}, \quad (6)$$

$$G_s = \frac{0,6D_P(2-1,4s)s}{b(1-s)^2}, \quad (7)$$

$$s = 1 - \frac{V(1 - w_R)}{Pn_P} \quad (8)$$

onde  $V_R$  é a velocidade do fluido no leme,  $V$  é a velocidade do barco,  $K_2$  é a influência do propulsor sobre o leme,  $G_s$  é o coeficiente de carga sobre o leme,  $D_P$  é o diâmetro do propulsor,  $b$  é a altura do leme,  $s$  é a razão de escorregamento do hélice,  $P$  é o passo do propulsor e, por fim,  $n_P$  é o número de revoluções do propulsor. O valor do coeficiente de wake fraction,  $w_R$ ,

$$w_R = \frac{V - V_R}{V}, \quad (9)$$

depende da resistência do casco, coeficiente de bloco e, por consequência, do formato do casco. Além disso, o valor do coeficiente para barcos com um propulsor pode ser aproximado para o range de 0,2 até 0,45, sendo 0,2 para propulsores de maior torque.

## 2.2. Simulação Numérica

A utilização de métodos de volumes finitos para a caracterização de escoamentos é necessária devido à dificuldade de resolução das equações de Navier-Stokes, especialmente devido ao fato de que, para a maior parte das aplicações reais, suas equações diferenciais não serem lineares. As equações de Navier-Stokes formam os princípios que se baseia a dinâmica de fluidos. Na Eq. (10) é exposto o princípio da conservação da massa e, na Eq. (11), o princípio da conservação da quantidade de movimento, onde  $\rho$  é a densidade,  $v_i$  e  $v_j$  são velocidades,  $p$  é pressão e  $\tau_{ij}$  é tensão cisalhante. Através destas equações é possível modelar o escoamento de um fluido, embora usualmente seja necessário ajuda computacional para a resolução de problemas reais.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i v_j) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (11)$$

O trabalho de Lima (2013) apresenta em sua fundamentação teórica a discussão sobre o método LES (Large Eddy Simulation) e método RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*). De acordo com o autor, o método RANS necessita menor capacidade computacional para a resolução do problema. Além disso, o método RANS propõe que as propriedades do escoamento sejam resolvidas a partir de seu valor médio e uma flutuação devido a turbulência.

Para a resolução do tensor de Reynolds, que adiciona ao método seis novas variáveis, é necessário utilizar os modelos de turbulência. Esses modelos dividem-se em dois grupos: *Eddy Viscosity Models* (EVM) que resolvem através da viscosidade turbulenta e *Reynolds Stress Models* (RSM) que fazem aproximações para a resolução do tensor de Reynolds. Os modelos EVM dividem-se quanto à quantidade de equações que utilizam para a resolução do tensor de Reynolds, que varia desde zero equações até duas equações.

Eger (2010) traz em sua tese os modelos de turbulência do método EVM para solução do tensor de Reynolds, os quais foram inicialmente introduzidos por Boussinesq (1877) para então serem generalizados por Kolmogorov (1942).

Um dos modelos deste método utiliza duas equações e denomina-se  $k - \omega SST$  (Shear Stress Transport). Esse método utiliza o modelo padrão  $k - \omega$  para a resolução próxima a parede e  $k - \varepsilon$  para zonas afastadas. Além deste, fazem parte do método EVM outras variações do modelo  $k - \omega$  e  $k - \varepsilon$ . No Apêndice E o equacionamento do modelo  $k - \omega SST$

Diversos softwares comerciais se encontram disponíveis para resolver os métodos anteriormente explicados. Dentre eles o Ansys Inc. Através deste software é possível resolver as equações dos diferentes modelos e obter a caracterização do escoamento desejado.

### 2.3. Design of Experiments (DoE)

Mathews (2005) publicou um livro onde tem por objetivo explicar o uso e as funcionalidades do uso do DoE, onde são abordados desde o equacionamento dos métodos, suas funcionalidades e indicações até as aplicações práticas.

De acordo com o autor, essa ferramenta tem por objetivo determinar a relevância de diferentes fatores em um parâmetro base. Através da variação de fatores, de maneira estruturada, ensaia-se a maneira como cada um destes altera a resposta do parâmetro base e, com isso, é possível que seja calculado a influência de cada variável. Um dos problemas desse método é que, se algum fator relevante para o experimento não for considerado e este afeta na resposta final, o resultado pode não representar fielmente a realidade, especialmente se esse fator variar entre os ensaios.

A ferramenta possui diferentes tipos de abordagem e a seleção da mais adequada para o estudo deve ser feita considerando variados aspectos, tais como: quantidade de ensaios e quantidade de fatores ensaiados. Entre os métodos possíveis, o método  $2^k$  usualmente é o mais utilizado pois propõe-se ao estudo da variação entre os parâmetros extremos, ou seja, é possível estudar a influência da variação entre o mínimo e máximo de determinado parâmetro na resposta final de maneira simples.

Além da seleção do método é necessário realizar a decisão se a análise será feita de maneira completa ou se irá ser fracionada. Usualmente o método  $2^k$  fracionado é utilizado quando a quantidade de fatores envolvidos é muito grande ou o tempo disponível para ensaio é curto. Esse método pode ser utilizado inicialmente para a definição de quais fatores são mais relevantes na resposta final para que posteriormente ser realizado a análise completa. A vantagem da análise completa é que esta permite estimar o efeito dos fatores principais além de permitir analisar todas as interações que afetam na resposta final.

Como resposta da aplicação do DoE obtém-se a relevância dos fatores e da relação entre eles. Se a análise for completa as informações ali presentes não apresentarão confundimento, porém se a análise for fatorial deve-se cuidar com confundimentos de segunda e terceira ordem.

O confundimento<sup>1</sup> obtido em análises fatoriais, conforme apresentado no *Help* do programa Minitab (2019), ocorre nos experimentos fatoriais porque a análise não inclui todas as variações possíveis. Dessa maneira, caso um fator A seja confundido com a interação entre três fatores BCD, o efeito estimado de A será a soma do efeito de A com o efeito de BCD ou ainda uma combinação entre eles. É importante salientar que o confundimento depende do tipo de fatorial trabalhado, à medida que diminui-se a quantidade de experimentos aumenta-se os termos confundidos.

---

<sup>1</sup> Fonte: Minitab 2019 <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/what-are-confounding-and-alias-structure/>> Acessado em 25/11/2019.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Definição do Leme

O dimensionamento do leme de estudo seguiu as dimensões do rebocador portuário desenvolvido pela equipe para a competição de 2019.

A área molhada de projeto da embarcação e seu respectivo dimensionamento mínimo e máximo para o leme foram feitos de acordo com o trabalho de Liu & Hekkenberg (2017) e estão apresentados na Tab. 2. A altura do leme foi preestabelecida em 85 mm devido o diâmetro do hélice para a competição ser limitado, por regra, em 80 mm. Com isso a equipe considera 5 mm para erro de posicionamento de montagem do leme.

Os modelos de leme que serão ensaiados possuem dois tipos de perfis: perfil NACA 0012 e NACA 0021. O perfil NACA 0012 e 0021, são perfis que possuem como características serem simétricos em relação à sua corda. Além disso os dois últimos algarismos indicam a espessura máxima a partir da corda. Ou seja, para o perfil NACA 0012, a espessura máxima do perfil é de 12% o comprimento da corda enquanto para o perfil NACA 0021 a espessura máxima é de 21% do comprimento da corda. No Apêndice A é apresentado os dois perfis utilizados posteriormente na simulação.

Tabela 2: Parâmetros para dimensionamento do leme.

Fatores		Mínimo	Máximo
Perfil		NACA 0012	NACA 0021
Área Lateral	[mm <sup>2</sup> ]	3000	4800
Altura do Leme	[mm]	85	85
Corda do Leme	[mm]	35,3	56,5
Distância ao Hélice	[mm]	6,4	20
Razão de Aspecto	[-]	2,4	1,5

O dimensionamento da área lateral foi feito conforme a proporção indicada por Liu & Hekkenberg (2017) para rebocadores portuários e apresentada na Tab. 1. O dimensionamento mínimo foi feito utilizando a menor proporção área recomendada e o dimensionamento máximo utilizando a maior proporção recomendada. A razão de aspecto foi calculada como critério de validação proposto por Lamb & Cook (1961) que recomenda valores entre 1,3 até 2,5.

#### 3.2. Definição do experimento

O estudo de relevância de parâmetros é realizado a partir de experimento fatorial  $2^k$ , devido ao método apresentar quantidade reduzida de simulações e, a partir de aproximações lineares, ter como resposta a importância de cada parâmetro. Este experimento é indicado para estudos de relevância por apresentar somente os principais níveis ou simplesmente a ausência ou presença de determinado fator.

Para experimentos de relevância  $2^k$ , indica-se o uso dos parâmetros extremos possíveis para que, desta maneira, seja possível cobrir maior variação das possibilidades. Na Tab. 3 define-se os fatores construtivos de leme juntamente com os níveis possíveis de projeto e utilização.

Tabela 3: Definição dos parâmetros para o experimento de relevância  $2^k$ .

Fatores		A	B
Perfil		NACA 0012	NACA 0021
Área Lateral	[mm <sup>2</sup> ]	3000	4800
Velocidade do Fluido	[m/s]	15	21
Ângulo de Ataque	[°]	5°	ESTOL

A definição do ângulo de ataque foi feita com a variação apresentada pois o leme de competição sempre será utilizado com o maior ângulo de ataque possível em virtude de as provas necessitarem de alta capacidade de manobra.

Para a definição da força normal, responsável pela capacidade de manobra da embarcação, é necessário identificar a velocidade com a qual o fluido chega ao propulsor. As velocidades ensaiadas foram definidas com base no equacionamento apresentado na fundamentação teórica, através da Eq. (6).

Optou-se por realizar um experimento completo pois, como varia-se somente 4 fatores, é necessário um total de 16 simulações. Além de ser um número reduzido de simulação, com esse tipo de experimento não haverá confundimentos e a análise pode ocorrer de maneira direta.

Na Tab. 4 estão resumidas as informações de cada parâmetro de simulação. Cada linha da tabela indica uma configuração de simulação que foi feita a partir de 5° de ângulo de ataque até o ângulo de estol.

Tabela 4: Parâmetros empregados para os testes numéricos realizados no Ansys Fluent.

Perfil	Cordeira [m]	Velocidade [m/s]
NACA 0012	0,0353	15
	0,0353	21
	0,0565	15
	0,0565	21
NACA 0021	0,0353	15
	0,0353	21
	0,0565	15
	0,0565	21

### 3.3. Simulação Numérica

#### 3.3.1. Modelagem e Configuração do Problema

A escolha do modelo de turbulência utilizado na simulação foi feita a partir do estudo realizado por Eleni, et al (2012). Neste trabalho é realizado o estudo com diferentes modelos de turbulência e feito a comparação com resultados experimentais, onde o modelo  $k - \omega SST$  apresentou resultados próximos aos experimentais.

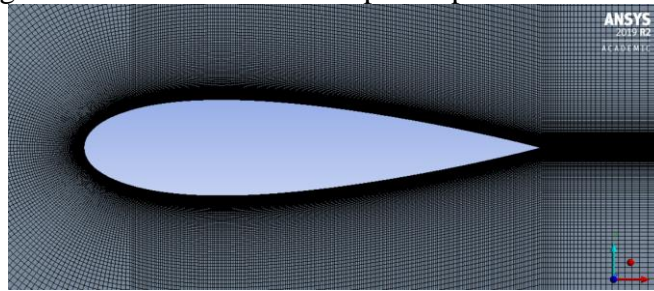
A modelagem do leme será feita considerando perfil bidimensional do leme pois, para ambos os casos ensaiados a altura considerada é a mesma. Em virtude dessa simplificação, o movimento helicoidal do escoamento devido ao hélice não será captado pelo experimento, levando-se em consideração somente a componente longitudinal da velocidade incidente sobre o leme. A velocidade do escoamento máxima é aproximada de acordo com Zelany (2014), apresentado na Eq. (6). Na Fig. A.1, do apêndice A, é apresentado os perfis utilizados na simulação.

#### 3.3.2. Malha

A geração da malha utilizada foi feita no programa ANSYS ICEM. Na Fig. 3, mostra-se a malha gerada para o perfil NACA 0021. Optou-se por utilizar uma malha estruturada por apresentar maior eficiência e ser mais precisa nas regiões desejadas em comparação a malha não estruturada. Além disso, a malha é do tipo C e subdividida em 6 partes com o intuito de captar com maior precisão a transição laminar-turbulento na parede do perfil.

O domínio da simulação, assim como o leme, é bidimensional e possui raio de  $30c$  e comprimento de  $60c$ . Esse tipo de domínio foi utilizado com o intuito de minimizar problemas ocasionados por domínio pequeno e proximidade dos limites do domínio.

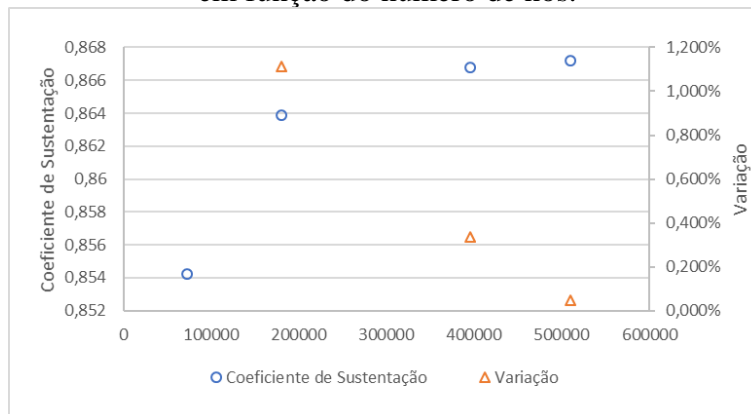
Figura 3: Malha desenvolvida para o perfil NACA 0021.



O estudo da malha foi feito com um modelo padrão de corda igual a 1 metro e 1 m/s. Foi decidido por utilizar estes parâmetros devido à variação dos mesmos nas simulações necessárias. Além disso a malha em perfil C foi feita em proporção com a corda do perfil ensaiado com o intuito de padronizar o tamanho do domínio e precisão da malha. Por fim, essa configuração apresenta Reynolds  $10^6$  contra Reynolds de  $10^5$  nos parâmetros de ensaio do leme.

A malha foi simulada desde 72 mil nós e, devido a limitação da versão estudante do Ansys, foi refinada até 510 mil nós. O estudo da malha foi feito em função do coeficiente de sustentação pois o resultado utilizado para obter a relação de importância dos parâmetros será a força de sustentação, sendo assim é importante que esta resposta seja precisa. Na Fig. 4 abaixo está mostrado o gráfico do coeficiente de sustentação de acordo com o refinamento da malha.

Figura 4: Estudo de malha exibindo valores absolutos do coeficiente de sustentação e variação em função do número de nós.



O estudo de malha mostra que a maior variação entre resultados foi de 72 mil nós para 180 mil nós, sendo esta de 1,125% ou 0,009611. Após isso, mesmo mais que dobrando a quantidade de nós na malha, a variação entre respostas foi apenas de 0,338% ou 0,002916. A variação da malha de 396 mil nós para a malha mais refinada possível permitida na versão estudante do Ansys foi de 0,000426 que em percentual representa 0,049% em relação a resposta anterior. Pela Fig. 4 e pelos dados apresentados anteriormente optou-se por utilizar uma malha com 180 mil nós pois este refinamento apresenta uma variação em relação a malha de 500 mil nós de apenas 0,385%. Além disso, a quantidade de simulações necessárias neste trabalho e o tempo de simulação necessário para maiores quantidades de nós não permitiria trabalhar com malhas mais refinadas em um tempo hábil.

A extrapolação de Richardson, apresentada no Apêndice D, estima o valor encontrado caso o tamanho de cada elemento fosse nulo ou quantidade de elementos tendendo ao infinito. O valor encontrado por essa extrapolação é de 0,8690. Ou seja, mesmo se tivéssemos infinitos elementos o valor encontrado seria muito próximo dos valores encontrados com menor quantidade de nós, pois a variação em relação ao de 510 mil nós, foi de apenas 0,2%.

### 3.3.2. Setup de simulação

A simulação foi realizada utilizando o modelo  $k - \omega SST$ . Para configuração geral, no ANSYS Fluent, foi selecionado *Pressure-Based* por este ser recomendado para casos subsônicos e fluidos incompressíveis [ANSYS, 2019]. Além disso, foi estabelecido como problema estacionário em função da análise ser antes do ângulo de estol e sem vórtices.

Posteriormente definiu-se água líquida como fluido de escoamento e utilizou-se as definições de catálogo do Ansys para caracterização. Já para as condições de contorno é necessário realizar as definições de três zonas: entrada, saída e perfil.

A condição de entrada foi feita em função da velocidade do escoamento, 15 m/s ou 21 m/s. Além disso a intensidade de turbulência ficou definida em 5%, valor sugerido pelo Ansys para casos em que não se tenha essa informação. Como condição de saída define-se que a pressão manométrica é zero, ou seja, ponto muito distante da entrada. Por fim, o perfil do leme foi definido como parede e sem escorregamento, isso faz com que a velocidade na parede seja zero.

O método de resolução foi definido como *Coupled*, ou seja, velocidade e pressão são resolvidas simultaneamente. Esse fato faz com que cada interação seja mais longa e demore mais tempo, porém usualmente se obtém a convergência em menor quantidade de interações. Por fim, quanto aos controles, foi utilizado fator de relaxação 0,8 que é padrão para modelo  $k - \omega SST$  no ANSYS 2019.

## 4. RESULTADOS

O estudo da força de sustentação, coeficiente de sustentação e arrasto foi realizado para os perfis NACA 0012 e NACA 0021 com as variações propostas pelo trabalho. Nas Fig. 5 e 6 são apresentados os coeficientes de sustentação obtidos na simulação para os perfis NACA 0012 e NACA 0021.

Figura 5: Coeficiente de sustentação NACA 0012 em função do ângulo de ataque.

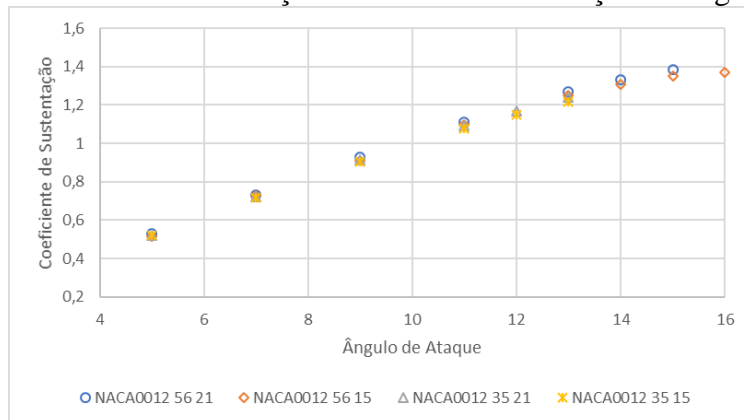
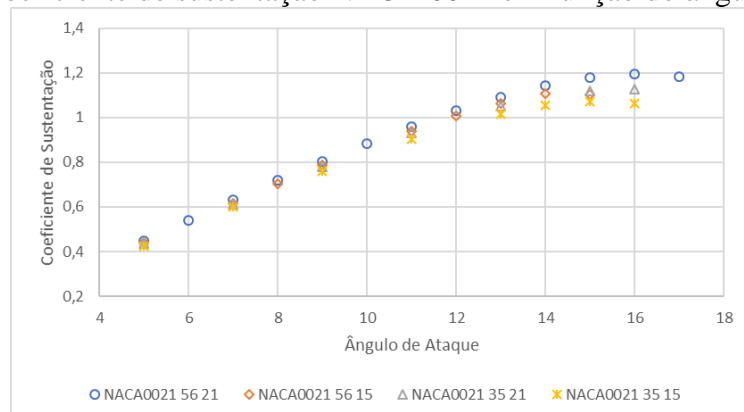


Figura 6: Coeficiente de sustentação NACA 0021 em função do ângulo de ataque.



Em cada gráfico são apresentadas as quatro possibilidades de variação para o respectivo perfil a partir das variações propostas na Tab. 4. Na legenda fica resumido os parâmetros de estudo na sequência: Perfil, corda do Leme em estudo em milímetros e velocidade do escoamento em metros por segundo. Esse mesmo tipo de legenda foi utilizado em todos os gráficos a seguir.

Na Fig. 5 é possível verificar que o coeficiente de sustentação do perfil NACA 0012 apresentou pequena variação ao analisar um mesmo ângulo de ataque e com diferentes combinações de fatores. Já para o perfil NACA 0021, na Fig. 6, em pequenos ângulos de ataque a diferença entre os coeficientes de sustentação para diferentes combinações de fatores era pequena e aumentou progressivamente até o ângulo de estol.

Na Tab. 5 abaixo estão resumidas as informações de cada simulação. Essa tabela será importante para o desenvolvimento da discussão por apresentar o número de Reynolds das mesmas e o ângulo de estol encontrado.

Tabela 5: Parâmetros de leme utilizados na simulação numérica, número de Reynolds para cada simulação e ângulo de estol encontrado.

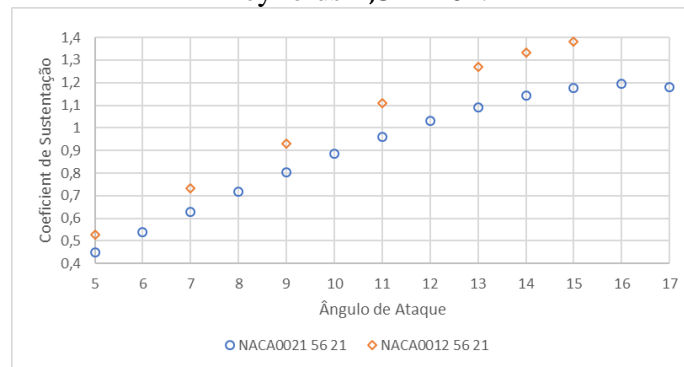
Perfil	Corda [m]	Velocidade [m/s]	Reynolds [ $10^5$ ]	Estol [°]
NACA 0012 35 15	0,0353	15	1,11195	13
NACA 0012 35 21	0,0353	21	1,55673	13
NACA 0012 56 15	0,0565	15	1,77975	16
NACA 0012 56 21	0,0565	21	2,49165	15
NACA 0021 35 15	0,0353	15	1,11195	16
NACA 0021 35 21	0,0353	21	1,55673	16
NACA 0021 56 15	0,0565	15	1,77975	15
NACA 0021 56 21	0,0565	21	2,49165	16

Analisando a Fig. 5 verifica-se uma variação no coeficiente de sustentação máximo apresentado pelo perfil NACA 0012 que ocorreu principalmente devido aos diferentes ângulos de estol para cada parâmetro de simulação. Para os perfis NACA 0012 e corda de 35 mm o estol ocorreu com 13° de ângulo de ataque, enquanto para os perfis NACA 0012 com corda de 56 mm o estol ocorreu com ângulos maiores. Essa variação no ângulo máximo de ataque ocasionou a variação de 12% no coeficiente de sustentação máximo entre os parâmetros de simulação, aproximadamente 1,38 para NACA 0012 56 21, contra 1,21 para NACA 0012 35 15.

Já na Fig. 6 observa-se que os coeficientes de sustentação do perfil NACA 0021 para ângulo de ataque de 5° estavam todos na ordem de 0,42 até 0,44. Ao ser verificado o coeficiente de sustentação máximo atingido pelo perfil o resultado apresentou variação maior, pois para o perfil com corda de 56 mm e 21 m/s de velocidade do escoamento, atingiu valores de até 1,18, enquanto para o perfil com de 35 mm e 15 m/s, esse resultado não ultrapassou 1,07. A variação entre os coeficientes de sustentação máximo ocorreu principalmente devido ao ângulo em que o perfil perdeu sua capacidade de sustentação, 17° para o primeiro e 16° para o segundo. Além da variação no ângulo de estol, conforme mostrado na Tab. 1, a diferença entre os coeficientes de sustentação também ocorreu devido aos diferentes números de Reynolds para cada simulação. Nesta mesma tabela, é possível verificar que o perfil NACA 0021 56 21 possui número de Reynolds 2,24 vezes maior do que o NACA 0021 35 15. (Ver Apêndice B)

Para fazer a comparação entre os perfis NACA 0012 e NACA 0021 é apresentado na Fig. 7 somente perfis que possuem corda de 56 mm e escoamento de 21 m/s. Desta maneira a comparação é feita entre 2 simulações com o mesmo número de Reynolds, 249165, e pode ser expandida para os demais casos de mesmo Reynolds deste trabalho.

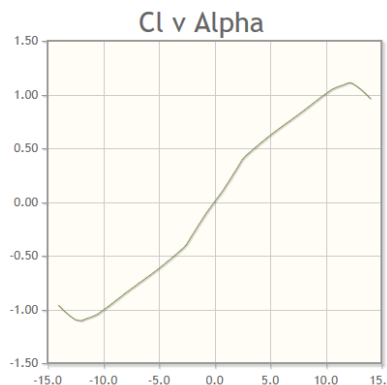
Figura 7: Coeficiente de Sustentação para os perfis NACA 0021 56 21 e NACA 0012 56 21. Reynolds  $2,5 \times 10^5$ .



A partir da Fig. 7 é possível observar que o perfil NACA 0012 possui, desde ângulo de ataque  $5^\circ$ , coeficiente de sustentação maior do que o perfil NACA 0021. Mesmo que o primeiro possua ângulo de estol em  $15^\circ$ , o coeficiente de sustentação máximo é maior do que para o perfil NACA 0021 que possui estol em ângulos maiores.

O site AirfoilTools fornece características de sustentação e arrasto para perfis NACA, além disso é possível realizar a seleção em função da quantidade de turbulência, número de Reynolds e número de Mach. Para a realização das simulações e obtenção dos resultados é utilizado o programa Xfoil, criado por Drela & Harold (2000) do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Com o intuito de comparação dos resultados obtidos pela simulação no programa Ansys é apresentado na Fig. 8 o gráfico de coeficiente de sustentação em relação ao ângulo de ataque para o perfil NACA 0012 com número de Reynolds de  $2 \times 10^5$ .

Figura 8: Coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque para perfil NACA 0012 com Reynolds  $2 \times 10^5$ . Fonte: Airfoiltools<sup>2</sup>.



Realizando a comparação entre os resultados da simulação e a Fig. 8 percebe-se que o perfil NACA 0012 deveria apresentar ângulo de ataque máximo próximo de  $11^\circ$  enquanto a simulação apresentou estol em  $15^\circ$ . Esse fato fez com que o perfil simulado apresentasse coeficiente de sustentação máximo maior do que o espero pela bibliografia. Mesmo assim, é possível verificar que, para  $11^\circ$ , o valor do coeficiente de sustentação apresentado pelo site é próximo de 1,1 enquanto o encontrado em simulação, com Reynolds de  $2,49 \times 10^5$ , foi de 1,110428. Essa mesma análise pode ser repetida para ângulo de ataque de  $5^\circ$  e também será encontrado valores próximos. Dessa maneira, é possível observar que os coeficientes de sustentação obtidos em simulação convergem com o apresentado pelo site AirfoilTools porém a simulação não obteve sucesso na representação do ângulo de estol.

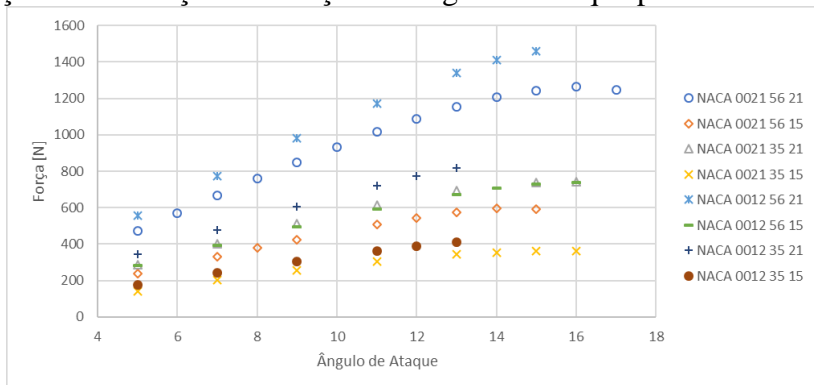
<sup>2</sup> Fonte: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>> Acessado em 28/11/2019.



Nas Fig. C.1 e C.2, do apêndice C, são apresentados os coeficientes de arrasto para os perfis NACA 0012 e NACA 0021. Em relação ao coeficiente de arrasto é possível verificar que, como esperado, o perfil NACA 0012 simulado, possui menor valor para todos os casos em relação ao perfil NACA 0021. Além disso os valores para o perfil NACA 0012 concordam com o apresentado por Eleni, et al (2012), para o modelo de simulação  $k - \omega SST$ .

Na Fig. 9 é plotado o gráfico de força de sustentação pelo ângulo de ataque para todos os casos testados.

Figura 9: Força de sustentação em função do ângulo de ataque para todos os casos testados.



Através da Fig. 9 e junto das Fig. 5 e 6, que apresentam o coeficiente de sustentação para os dois perfis hidrodinâmicos, é possível verificar a forte dependência da velocidade para a resposta final. Como exemplo pode-se verificar que a maior força de sustentação do perfil NACA 0012 atinge valores de 1460 N com 21 m/s enquanto que se essa velocidade for diminuída para 15 m/s o valor máximo encontrado para o mesmo perfil é de 737 N, aproximadamente metade.

Já para a corda do leme percebe-se que seu efeito sobre a força de manobra é menor do que aquele da velocidade. Esse efeito pode ser verificado quando se compara a força de sustentação para os casos de perfil NACA 0021 com velocidade de 21 m/s que, para corda de 56 mm, a força encontrada é de 1248 N, enquanto que para 35 mm de corda o valor máximo é de 742 N.

Nas figuras Fig. 10 e 11, são apresentados, respectivamente, os coeficientes de sustentação para perfis com corda de 56 mm e corda de 35 mm. O coeficiente teórico apresentado é a solução da Eq. (5), de Fuji & Tuda (1961), para as dimensões ensaiadas.

Figura 10: Coeficiente de sustentação teórico e numérico para corda de 56 mm.

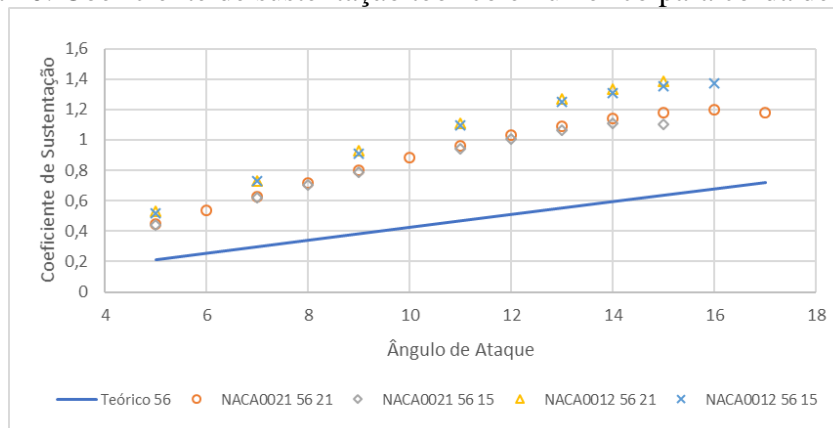
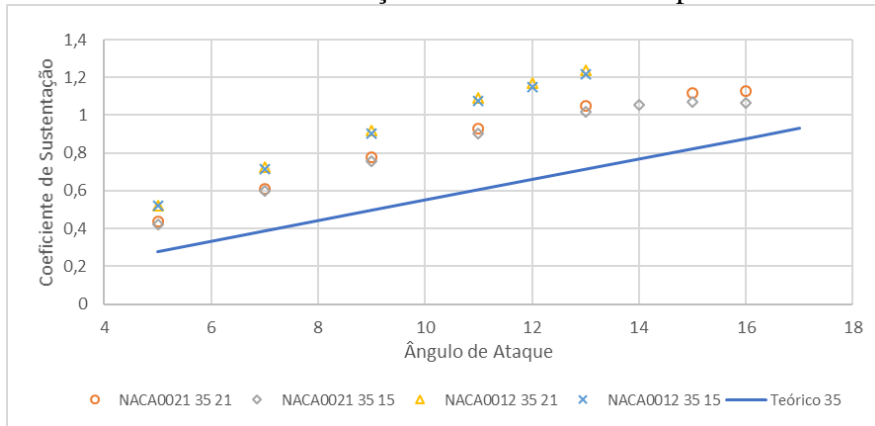


Figura 11: Coeficiente de sustentação teórico e numérico para corda de 35 mm.

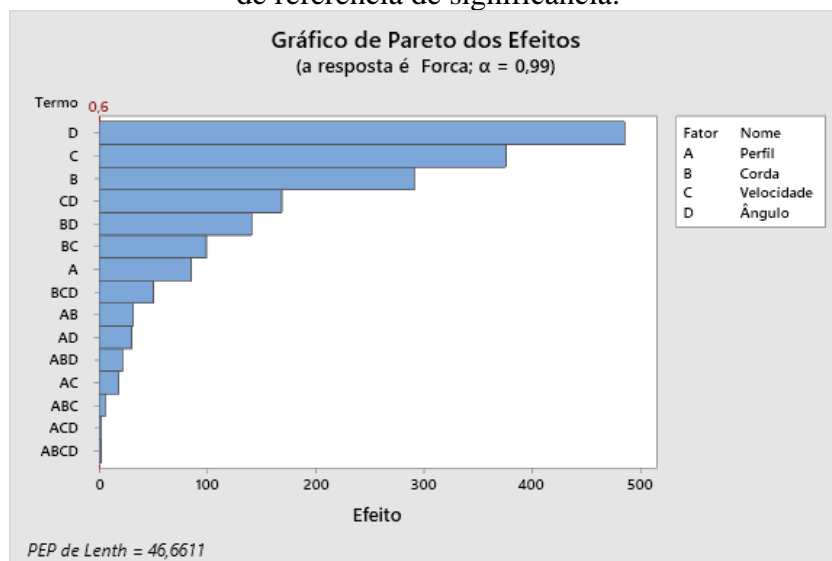


Analisando as figuras é possível verificar que o coeficiente de sustentação teórico é menor do que o obtido na simulação para todos os ângulos de ataque. Além disso, também é possível verificar que o coeficiente de sustentação teórico cresce linearmente enquanto os perfis ensaiados tendem a estabilizar conforme o ângulo de ataque aumenta e, posteriormente, diminuir.

A solução proposta por Fuji & Tuda (1961) é recomendada para lemes de perfil delgado, ou seja, sem perfil hidrodinâmico. Esse fato acarreta em desvios para estimar o coeficiente e a força de sustentação para lemes que não seguem esta característica, pois constantemente a força responsável pela manobra é subdimensionada. Esses fatores fazem que seja necessário procurar novos equacionamentos para o coeficiente de sustentação quando for trabalhar com perfil NACA.

Buscando sistematizar as relações de dependência da força de manobra sobre as variáveis de ensaio, procedeu-se para o estudo empregando DoE. Na Fig. 12 abaixo é mostrado o gráfico de Pareto de relevância para cada um dos fatores na força de sustentação gerada pelo leme nas simulações e foram obtidos utilizando a ferramenta de DoE do Minitab. Neste gráfico foi retirada a linha de referência de significância para realizar as análises de maneira manual, devido este motivos  $\alpha$  aparece como 0,99.

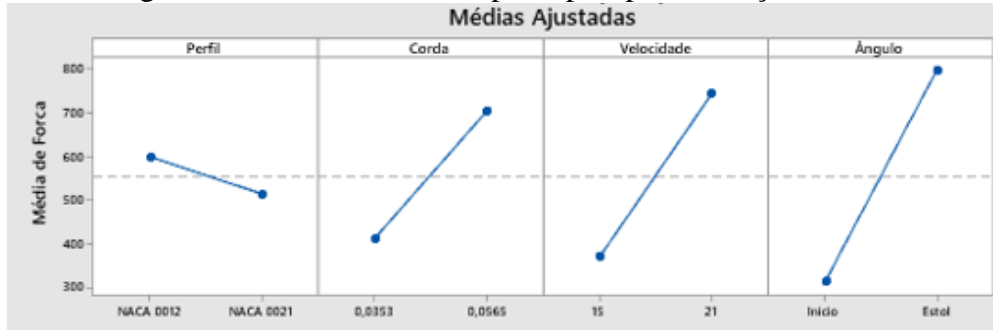
Figura 12: Pareto de relevância apresentado pelo DoE. O parâmetro  $\alpha$  relaciona-se com a linha de referência de significância.



A partir do gráfico mostrado na Fig. 12 é possível verificar que a força de manobra do leme tem influência do ângulo de ataque (D), seguido da velocidade do fluido (C), e da corda (B), respectivamente. Além disso, em menor proporção, é possível verificar que a relação entre velocidade

e ângulo (CD), corda e ângulo (BD) e corda com velocidade (BC) são mais relevantes do que o perfil do leme. As demais interações mostraram-se menos relevantes para a força resultante. Para melhor compreensão é mostrado na Fig. 13 o efeito de cada uma das variáveis sobre a média de força.

Figura 13: Gráfico de efeitos principais para a Força no DoE.

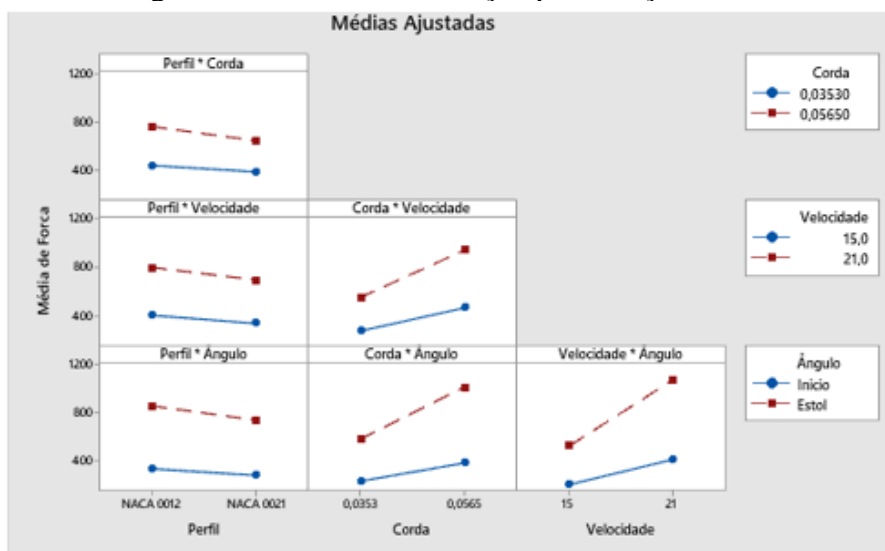


A Fig. 13 reafirma a informação fornecida pelo gráfico da Fig. 12. Pela inclinação da reta e pontos máximos alcançados é possível verificar que o ângulo é o fator mais influente para a força de manobra do leme. Além do ângulo, a velocidade e a corda apresentam grande relevância para a resposta final.

Já o perfil possui pouca influência para a força pois, como pode ser visto na Fig. 9, variando somente o perfil hidrodinâmico a força é pouco alterada. Como exemplo, o perfil NACA 0012 56 21 possui força de aproximadamente 1200 N para ângulo de ataque de 11°, enquanto NACA 0021 56 21 possui força de aproximadamente 1000 N. A inclinação da reta, mostrada na Fig. 13, mostra que entre os efeitos principais analisados este é o de menor relevância.

Na Fig. 14 é mostrado o efeito da interação entre variáveis na força de manobra do leme.

Figura 14: Gráfico de Interação para Força no DoE.



Na Fig. 14 exibe-se a relevância das interações entre alguns fatores. É possível verificar que, principalmente para o ângulo de estol, a velocidade e a corda afetam fortemente na força de manobra. Além disso é possível verificar que a corda, principalmente com a velocidade de 21 m/s, possui grande influência na resposta final. Por fim, todas as demais interações mostram-se pouco influentes para a força.

A Eq. (12) é fornecida pela ferramenta de DoE do Minitab e apresenta a força normal, em Newton, gerada pelo leme em função dos parâmetros testados. Essa equação é codificada e trata-se de uma alternativa para a visualização gráfica de relevância dos fatores.

$$F_N = 555,6 - 42,7A + 145,6B + 188C + 243D - 15,94AB - 9,298AC - 15,17AD \quad (12)$$

$$+ 49,64BC + 70,48BD + 84,50CD - 2,743ABC - 10,84ABD - 1,224ACD$$

$$+ 25,07BCD + 1,069ABCD$$

onde A é perfil, B é corda, C trata-se da velocidade e D o ângulo. Além disso é importante ressaltar que como essa equação é codificada ela é válida somente para os valores preestabelecidos, então para obter resultados corretos deve-se utilizar a codificação exposta na Tab. 6.

Tabela 6: Codificação para a Eq. (12).

	<b>PERFIL</b>	<b>CORDA</b>	<b>VELOCIDADE</b>	<b>ÂNGULO</b>
<b>+1</b>	NACA 0021	0,0565m	21 m/s	Estol
<b>-1</b>	NACA 0012	0,0353m	15 m/s	5°

Através da Eq. (12) é possível observar, em coeficientes, a relevância de um dos parâmetros e interações entre parâmetros. Verifica-se novamente que o ângulo, seguido da velocidade e corda, respectivamente, são os fatores mais relevantes para a força normal gerada pelo leme. Além disso, a equação mostra que a interação mais relevante é entre os fatores de velocidade e ângulo.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou os coeficientes de sustentação e força de sustentação para diferentes perfis de leme. Além disso foi apresentado a relação de relevância para cada um desses fatores. A partir da sistematização dos experimentos numéricos empregando a ferramenta DoE observou-se a importância do estudo do leme projetado para seu máximo desempenho, pois as propostas de Liu & Hekkenberg (2017) mostraram-se pouco precisas. Além disso, mostrou-se que a método de Fuji & Tuda (1961) para o cálculo da força de manobra gerada pelo leme gera grandes divergências para perfis que não sejam delgados.

Com as informações presentes, ao ser desenvolvido um novo leme, deve-se enfatizar em realizar a construção de maneira precisa para possuir o ângulo de ataque correto, além de posicionar próximo ao hélice para assim possuir maior velocidade de escoamento. Em relação ao projeto de um leme, é mais importante possuir a maior área lateral possível para consequentemente ter maior corda, do que perfis hidrodinâmicos de maior largura.

As indicações de área lateral e posicionamento do leme apresentaram grandes variações na resposta de manobra da embarcação. Conforme apresentado na figura 9, para o mesmo ângulo de ataque, dois lemes podem apresentar variação de aproximadamente 300% do seu valor (360 N contra 1460 N) variando dimensão, velocidade e perfil. Além dessas informações, através dos ensaios realizados utilizando o modelo de turbulência  $k - \omega SST$ , é clara a necessidade de estudo do ângulo de ataque máximo para cada tipo de leme e velocidade devido a variação do ângulo de estol e do coeficiente de sustentação máximo para configuração de leme.

Assim, o desenvolvimento de novos lemes para nautimodelos pode ser otimizado a partir deste trabalho, que proporcionou de maneira objetiva, observações a respeito de questões de projeto.

Como proposta para futuros trabalhos é importante a avaliação da rugosidade ocasionada pelos processos de fabricação como causador de possíveis alterações do ângulo estol. Outro trabalho sugerido é a necessidade de estudo do melhor modelo de turbulência para que seja representado fielmente a curva de coeficiente de sustentação por ângulo de ataque para os diversos tipos de perfil hidrodinâmico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EGER, Roger S.; “**Modelação de escoamentos turbulentos sob a ação de rotação alternada**”; Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Março 2010. pp 20-28.

ELENI, Douvi C.; ATHANASIOS, Tsavalos I.; DIONISSIOS, Margaris P.; “**Evaluation of turbulence models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0012 airfoil**”; Journal of Mechanic Engineering; vol 4; 2012; pp 100-111.

FRAGOSO, Otávio A.; CAJATY, Marcelo. “**Rebocadores Portuários**”. 1º Edição. Conselho Nacional de Praticagem. pp 13-27.

FUJI, H; TUDA, T; “**Experimental researches on rudder performance**”; Journal of the Society of Naval Architects of Japan; vol 109; 1961; pp 31-42.

LAMB, B. J.; COOK, S. B.; “**A practical approach to rudder design**”; Shipbuilding and Shipping Record; Setembro; 1961.

LIU, Jialun; HEKKENBERG, Robert. “**Sixty years of research on ship rudders: effects of design choices on rudder performance**”; Ships and Offshore Structures; vol 12; 2017; pp 495-512.

LIU, Jialun, QUADVLIEG, F., HEKKENBERG, Robert. “**Impacts of rudder profiles on ship manoeuvrability**”. International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability. Setembro, 2015. pp 1-15

MARIN, Bollard Pull Joint Industry Project partners; “**International Standard For Bollard Pull Trials**”, 2019. pp 1-31

MATHEWS, Paul G.; “**Design of Experiments with MINITAB**”; ASQ Quality Press, Milwaukee Wisconsin: 2004. pp 358-398.

MiniTab R2019; “**MiniTab 2019 Support**”. Em: MiniTab Help. Minitab Inc., 2019.

MUCHA, Phillip; “**On Simulation-based Ship Maneuvering Prediction in Deep and Shallow Water**”; Tese (Doutorado) – Universidade Duisburg-Essen; 2017; pp 1-178.

OZDEMIR, Yavuz; BAYRAKTARr, Seyfettin; YLMAZ, Tamer. “**Flowfield Analysis of a Rudder by Using Computational Fluid Dynamics**”; 5º International Advanced Technologies Symposium; 2009; pp 1-5.

ROACHE, P. J. “**Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies**”. Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 405-413, 1994

TASIFA, Tahsinul Haque; RAHMANA, Md. Habibur; FAZLEA, Arafat Bin; KARIMA, Md. MASHUD. “**Numerical Prediction of Flow Past a Marine Rudder.**” Procedia Engineering, Volume 194, 2017, pp 59-66.

ZELANY, K.; “**Approximate Method of Calculating Forces on Rudder During Ship Sailing on a Shipping Route**”; TransNav; vol 8; 2014; pp 459-464.

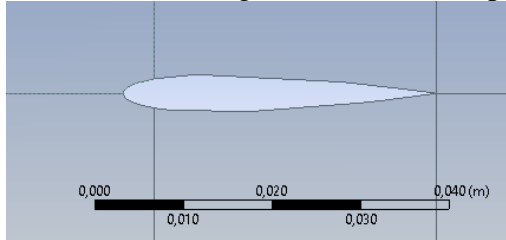
## NOMENCLATURA

$b$	Altura do leme	m
$c$	Corda máxima	m
$t$	Espessura máxima	m
$\alpha$	Ângulo de ataque escoamento	°
$V_R$	Velocidade do fluido incidente	m/s
$b_{m\acute{a}xima}$	Altura máxima do leme	m
$D_{h\acute{e}lice}$	Diâmetro do hélice	m
$c_m$	Corda média	m
$A_l$	Área lateral do leme	m <sup>2</sup>
$r$	Razão de aspecto	adim
$F_N$	Força normal do leme	N
$\rho$	Massa específica do fluido	kg/m <sup>3</sup>
$C_N$	Coefficiente normal de Fuji & Tuda (1961)	adim
$V$	Velocidade do barco	m/s
$w_R$	Wake fraction	adim
$K_2$	Constante de influência do propulsor no leme	adim
$G_s$	Coefficiente de carga sobre o leme	adim
$D_P$	Diâmetro do hélice	m
$s$	Razão de escorregamento	m
$P$	Passo	m
$n_P$	Número de rotações do propulsor	rps

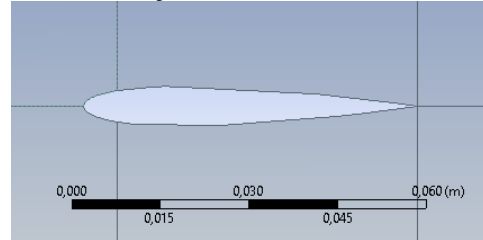
## APÊNDICE A

A figura A.1. mostra os perfis de simulação bidimensionais utilizados na simulação do Ansys. Na figura A.1a. mostra o perfil NACA 0021, onde a espessura máxima é 21% da corda. Já na figura A.1b é apresentado o perfil NACA 0012, que a espessura máxima é 12% da corda.

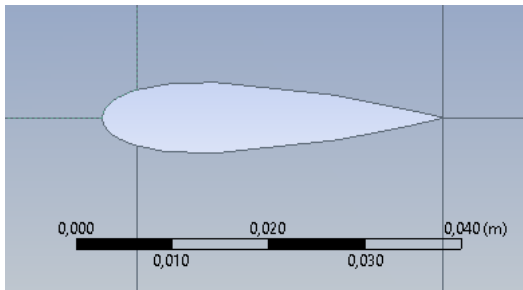
Figura A.1: Perfis empregados para a simulação numérica.



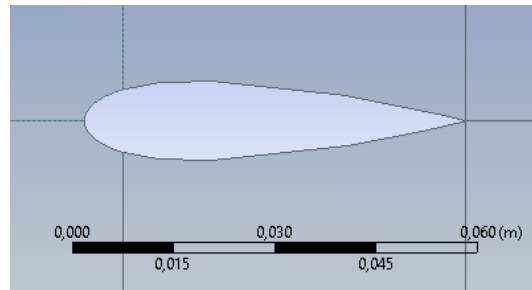
a) NACA 0012 com 35 mm de corda.



b) NACA 0012 com 56 mm de corda.



c) NACA 0021 com 35 mm de corda.

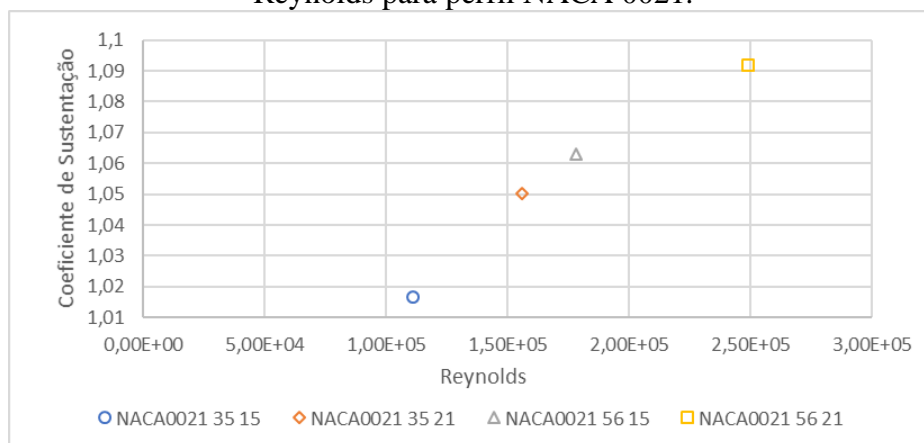


d) NACA 0021 com 56 mm de corda.

## APÊNDICE B

A Fig. B.1. mostra um rearranjo do gráfico mostrado na Fig.6. Nesta figura somente é mostrado o valor do coeficiente de sustentação para o ângulo de ataque de  $13^\circ$  em função do número de Reynolds.

Figura B.1: Coeficiente de sustentação para ângulo de ataque de  $13^\circ$  em função do número de Reynolds para perfil NACA 0021.

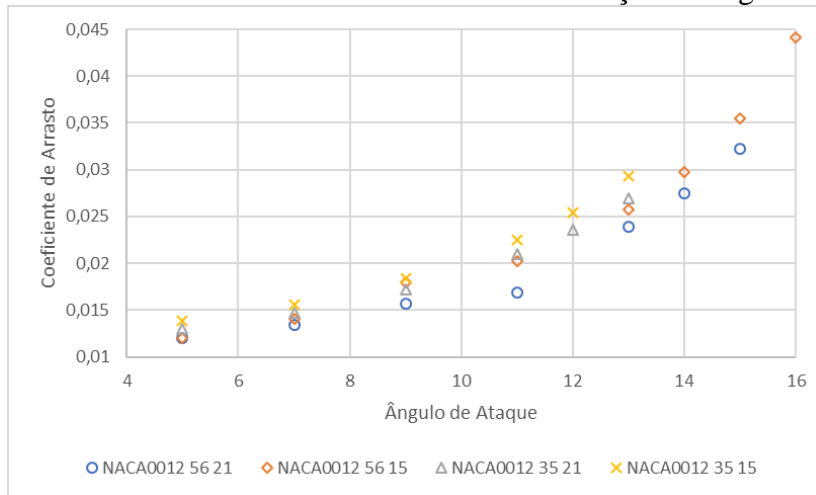


Nesta figura é mostrado o coeficiente de sustentação, para  $13^\circ$  de ângulo de ataque, em função do número de Reynolds do perfil ensaiado. Como pode ser observado, o número de Reynolds afeta no coeficiente de sustentação de um perfil de maneira crescente, à medida que o seu valor aumenta a sustentação também aumenta. A mesma analogia poderia ser repetida para a Fig. 5 que seria encontrada a mesma relação.

## APÊNDICE C

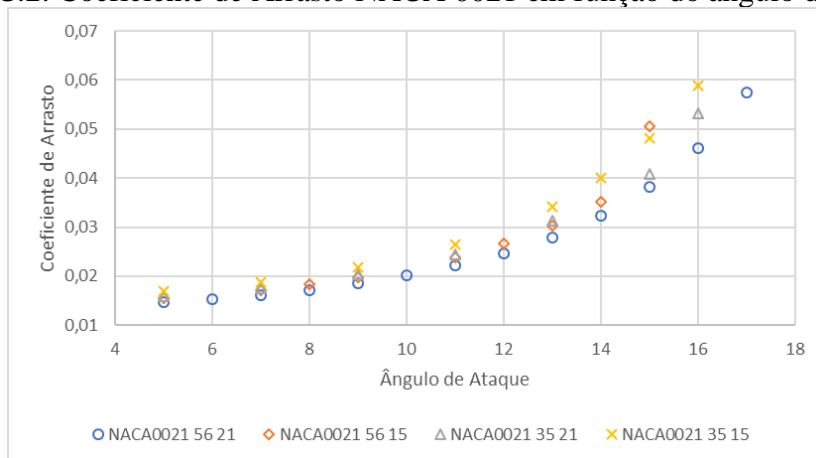
A figura C.1 mostra o gráfico de coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque para o perfil NACA 0012.

Figura C.1: Coeficiente de Arrasto NACA 0012 em função do ângulo de ataque.



A figura C.2 mostra o gráfico de coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque para o perfil NACA 0021.

Figura C.2: Coeficiente de Arrasto NACA 0021 em função do ângulo de ataque.



## APÊNDICE D

A extrapolação de Richardson é realizada para estimar qual seria o valor encontrado em caso de número infinito de elementos, ou seja, tamanho de caracterização zero. Para se poder realizar essa extrapolação é necessário possuir a resposta de um parâmetro de comparação com três tipos de refinamentos diferentes: grosso, médio e refinado. Na Eq. (13) é apresentada a extrapolação de Richardson:

$$f_R \cong f_3 + \frac{(f_2 - f_3)r_{23}^p}{r_{23}^p - 1} \quad (13)$$



onde  $f_R$  é a extrapolação de Richardson,  $f_3$  valor encontrado na simulação para o caso mais refinado,  $f_2$  valor encontrado na simulação para a malha intermediária,  $r_{23}$  razão de refinamento entre a malha intermediária e mais fina e, por fim,  $p$  é a ordem de convergência.

As variáveis necessárias para a extrapolação podem ser calculadas pelo método proposto por Roache (1994), *Grid Convergence Index* (GCI). O valor de  $p$ , ordem de convergência, é calculado a partir da razão de refinamento entre a malha mais grossa e intermediária,  $r_{12}$ ; razão de refinamento entre a malha intermediária e a mais refinada,  $r_{23}$  e os valores de simulação para os três tipos de malha,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  conforme Eq. (14).

$$p = \frac{\ln \left( \left( \frac{r_{12} - 1}{r_{23} - 1} \right) \left( \frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right) \right)}{\ln(r_{12})} \quad (14)$$

Além do valor da ordem de convergência é necessário saber a razão de refinamento que pode ser calculada conforme a Eq. (15), para o caso de simulações em duas dimensões.

$$r_{ij} = \left( \frac{N_j}{N_i} \right)^{0,5} \quad (15)$$

onde  $N_j$  e  $N_i$  são a quantidade de elementos da malha mais refinada e mais grossa, respectivamente.