



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
CENTRO DE ENGENHARIAS  
ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO VICTOR VIDAL PONTES

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS NO COEFICIENTE DE  
SUSTENTAÇÃO EM UMA PÁ DE UMA TURBINA HIDRÁULICA**

MOSSORÓ – RN

2017

PAULO VICTOR VIDAL PONTES

**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS NO COEFICIENTE DE  
SUSTENTAÇÃO EM UMA PÁ DE UMA TURBINA HIDRÁULICA**

Projeto de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal Rural  
do Semi-Árido – UFERSA, Centro de  
Engenharias para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Morão Cabral  
Ferro - UFERSA

MOSSORÓ – RN

2017

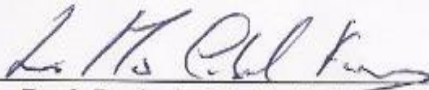
PAULO VICTOR VIDAL PONTES

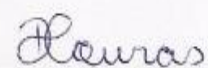
**INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS NO COEFICIENTE DE  
SUSTENTAÇÃO EM UMA PÁ DE UMA TURBINA HIDRÁULICA**

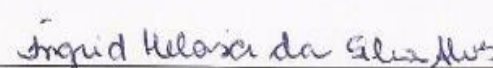
Projeto de conclusão de curso  
apresentado a Universidade Federal Rural  
do Semi-Árido – UFERSA, Centro de  
Engenharias para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

APROVADA EM: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luís Morão Cabral Fero  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. MSc. Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras  
Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Ingrid Heloisa da Silva Alves  
Membro

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

V648i Vidal, Paulo.

Influência do Número de Reynolds no  
Coeficiente de Sustentação em uma Pá de uma  
Turbina Hidráulica / Paulo Vidal. - 2017.  
36 f. : il.

Orientador: Luís Ferro.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia  
Mecânica, 2017.

1. NACA 66-209. 2. Coeficiente de Sustentação.  
3. Turbinas. I. Ferro, Luís, orient. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me ajudaram a chegar nesse momento, minha família, principalmente minha mãe, Maria Lucineide Vidal e meu pai, Paulo Nairton Pontes, que me deram todas as ferramentas para poder correr atrás de uma vida melhor.

Agradecer também a minha irmã Milena Vidal que da sua inocência ainda não consegue enxergar como me ajuda a querer ser uma pessoa melhor.

Agradeço a minha namorada Ana Carolina Costa por toda a paciência, compreensão e incentivo que me foi concedido.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos pela companhia em longas e cansativas horas de estudos, principalmente aos grandes amigos Breno Fernandes, Yuri Slovic, Raimundo Nonato. Ao meu orientador Luís Morão Ferro pela ajuda e orientação.

Agradeço a Equipe Cactus Baja pela melhor experiência vivida dentro da faculdade, a todos os integrantes e ex-integrantes um profundo obrigado, em especial a todos da equipe de 2016. Agradeço a Juarez Neto e William Lopes por me fazerem entrar na equipe e pela amizade construída durante esse ano dentro da Cactus e durante o curso.

Aos meus grandes amigos e irmãos do BOS, Paulo Perez, Hedilberto Barros e Jefferson Rodrigues (o gordo) e em especial Allison Guilherme a quem está na mesma caminhada que eu desde o início.

*“Confio em todos os homens, só não confio  
no demonio que há dentro deles.”*

*(John Brigder)*

## RESUMO

As turbomáquinas são máquinas que realizam transferência de energia entre o fluido em escoamento contínuo e um rotor, podemos classificar as turbomáquinas de acordo com a troca de energia. Quando a turbomáquina fornece energia ao fluido proveniente de uma fonte exterior, temos uma turbomáquina movida, já quando temos o contrário, onde o fluido cede a energia, nesse caso temos uma turbomáquina motriz, comumente chamadas de turbinas. Ao longo da história essas turbinas foram evoluindo e para melhorar a eficiência de uma turbina cada fator que pode ser melhorado deve ser estudado, um deles é o coeficiente de sustentação. Perfis aerodinâmicos foram desenvolvidos ao longo dos anos, buscando a melhor geometria para uma máxima eficiência, onde temos em destaque o trabalho realizado no Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica (NACA). O cálculo do coeficiente de sustentação através das forças atuantes em um aerofólio quando este está submetido à ação de um fluxo contínuo, caracteriza-se como uma ferramenta fundamental na área de aerodinâmica, principalmente no que diz respeito à classificação e utilização dos aerofólios em áreas de atuação específicas. De uma forma simplificada, é a capacidade que tem um determinado perfil de gerar sustentação. Utilizando o software Ansys foi analisado a influência sofrida no coeficiente de sustentação quando se varia o ângulo de ataque e o número de Reynolds. No qual foi observado para maiores números de Reynolds obtivemos maiores coeficientes de sustentação e maiores ângulos estol.

Palavras-chave: NACA 66-209; Coeficiente de sustentação; Turbinas.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Faixa de Velocidade específica.....                      | 15 |
| Figura 2: Comparação de rendimentos.....                           | 16 |
| Figura 3: Campo de aplicações das turbinas .....                   | 17 |
| Figura 4: Turbina Pelton .....                                     | 18 |
| Figura 5: Turbina Francis, esquemático .....                       | 18 |
| Figura 6: Turbina Kaplan .....                                     | 19 |
| Figura 7- Escoamento Laminar, transitório e turbulento .....       | 20 |
| Figura 8: Perfis Aerodinâmicos.....                                | 21 |
| Figura 9- Força de sustentação agindo em um perfil .....           | 22 |
| Figura 10- Perda de sustentação devido alto ângulo de ataque ..... | 23 |
| Figura 11: Geometria de um Perfil Aerodinâmico .....               | 24 |
| Figura 12- Ângulo de ataque( $\alpha$ ) .....                      | 25 |
| Figura 13- Fluxograma das etapas de modelagem .....                | 26 |
| Figura 14- Perfil modelado no NX.....                              | 28 |
| Figura 15- Volume de controle .....                                | 28 |
| Figura 16- Calculadora CFD online .....                            | 29 |
| Figura 17- Malha estruturada próxima ao perfil .....               | 29 |
| Figura 18- Malha para $\alpha=11^\circ$ .....                      | 30 |
| Figura 19- Perfil NACA 66-209.....                                 | 31 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1- Discretização da malha .....                                       | 32 |
| Gráfico 2- Curvas $c_l$ versus $\alpha$ para vários números de Reynolds ..... | 32 |

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

NACA - National Advisory Committee for Aeronautics

NASA - National Aeronautics and Space Administration

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                         |
|---------------|-----------------------------------------|
| $c_l$         | Coeficiente de sustentação do perfil    |
| $L$           | Força de sustentação                    |
| $Re$          | Número de Reynolds                      |
| $u$           | Componente de velocidade na direção $x$ |
| $\vec{U}$     | Velocidade do fluido                    |
| $v$           | Componente de velocidade na direção $y$ |
| $v$           | Velocidade do escoamento                |
| $\nabla^2$    | Operador Laplaciano                     |
| $\alpha$      | Ângulo de ataque                        |
| $\rho$        | Massa específica                        |
| $\mu$         | Viscosidade dinâmica do fluido          |
| $Nq$          | Rotação específica do Rotor             |
| $Q$           | Vazão                                   |
| $H$           | Altura                                  |
| $C$           | Comprimento da corda do perfil          |
| $k$           | Energia cinética                        |
| $\varepsilon$ | Dissipação de energia turbulenta        |
| $n$           | Rendimento                              |

## **Sumário**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                              | 13 |
| 2. OBJETIVOS .....                               | 14 |
| 2.1 Objetivo geral .....                         | 14 |
| 2.1.1 Objetivos específicos.....                 | 14 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                   | 15 |
| 3.1 Campo de Aplicações .....                    | 17 |
| 3.2 Escoamento .....                             | 19 |
| 3.3 Número de Reynolds .....                     | 19 |
| 3.4 Perfis Aerodinâmicos.....                    | 20 |
| 3.4.1 Forças atuantes entorno de um perfil ..... | 21 |
| 3.4.1.1 Força de Sustentação .....               | 22 |
| 3.4.2 Geometria do Perfil Aerodinâmico .....     | 23 |
| 3.5 NACA .....                                   | 25 |
| 3.6 Método Numérico .....                        | 25 |
| 3.6.1 Volume finitos.....                        | 26 |
| 3.6.2 Modelos de turbulência .....               | 26 |
| 3.6.2.1 Modelo k- $\epsilon$ .....               | 27 |
| 4. METODOLOGIA.....                              | 28 |
| 5. RESULTADOS .....                              | 31 |
| 5.1 Discretização da Malha.....                  | 31 |
| 5.2 Coeficiente de Sustentação. ....             | 32 |
| 6. CONCLUSÃO.....                                | 34 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                 | 35 |

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das turbinas foi realizado ao longo da história por vários cientistas que ao decorrer do tempo iam aperfeiçoando as já existentes e/ou criando seus próprios projetos. Leonard Euler (1707-1783) criou uma máquina precursora da turbina, e em 1754 desenvolveu o balanço de energia de uma turbomáquina, a equação de Euler para as turbomáquinas. Com forte ligação ao desenvolvimento de energia elétrica as turbinas são usadas nas hidroelétricas para moverem os hidrogeradores. Três tipos de turbinas são amplamente utilizados: Turbinas Pelton, Turbinas Francis e Turbinas Kaplan.

Turbinas como qualquer outra máquina que utiliza do escoamento de algum fluido para cumprir seus objetivos, deve considerar no seu projeto um perfil adequado, segundo Gilmour (2012), visto que aerofólios são utilizados em várias aplicações e que sua performance afeta em grande parte o desempenho geral da máquina onde ele é aplicado. Um dos principais fatores que afeta o funcionamento de um perfil é o coeficiente de sustentação do perfil.

Para estudar o coeficiente de sustentação, é necessário um túnel de vento ou um software que tenha a capacidade de simular o comportamento complexo do escoamento em relação ao fluxo. Segundo Yoshimoto (2006), é verdade que, em muitos casos, a melhor maneira de aprender comportamentos complexos é por meio da simulação. Assim, será utilizado o software ANSYS para simular e resolver através do método dos elementos finitos os problemas necessários para conclusão deste estudo.

O presente trabalho visa abordar um estudo no comportamento do coeficiente de sustentação do perfil NACA 66-209, em que irá variar o número de Reynolds e o ângulo do bordo de ataque.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudo do coeficiente de sustentação do perfil NACA 66-209, analisando a influência do número de Reynolds e do ângulo de ataque.

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Calcular o coeficiente de sustentação do perfil e avaliar em função do ângulo de ataque e do número de Reynolds.
- Utilizar programas com o método FLUENT

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As turbinas hidráulicas são máquinas motoras que transformam a energia potencial hidráulica em energia mecânica. O fluxo d'água geralmente é controlado para que permaneça uniforme e evite perda de cargas. Seu funcionamento consiste na transferência da quantidade de movimento d'água para o rotor em forma de torque e velocidade de rotação, sendo que as pás possuem perfil hidráulico para que essa transferência seja a maior possível (LOPES, 2011).

De acordo com Lopes (2011), ao se escolher uma determinada turbina, mais informações devem ser consideradas, como: histórico de vazões, altura de queda e velocidade específica. Isto se deve ao fato que existem turbinas que possuem um desempenho melhor em certo campo de atuação. Assim, tendo em vista as variáveis de escolhas, atualmente as turbinas mais utilizadas como afirma Costa (2003) são: Pelton, Francis e Kaplan. Segundo Macintyre (1983), a rotação específica é uma característica que fornece o tipo de turbina tendo por base elementos, tais como vazão, altura de queda, grandezas obtidas por estudos hidráulicos, hidrológicos, topográficos, consumo, custos e outros. Então temos a Equação 1 que determina a rotação específica. Onde “ $N_q$ ” é a rotação específica, “ $n$ ” é o rendimento, “ $Q$ ” a vazão e “ $H$ ” altura.

$$N_q = \frac{n * \sqrt{Q}}{\sqrt[3]{H^4}} \quad (1)$$

Na Figura 1, é apresentado a faixa de velocidade específica para cada turbina.

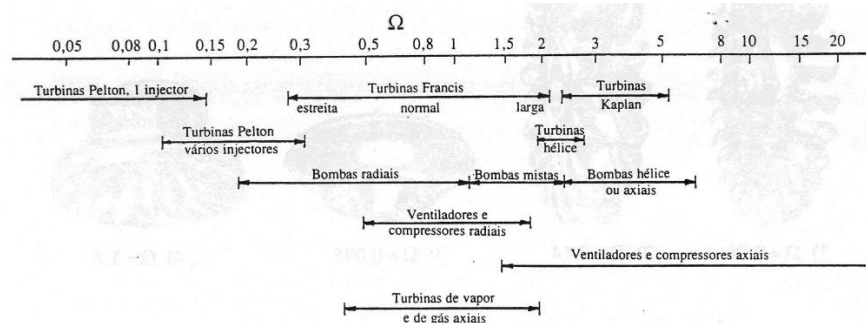


Figura 1: Faixa de Velocidade específica.

Fonte: Falcão (2004, p.33)

A mais importante classificação das turbinas é aquela que atende ao modo de atuar d'água. (Lopes, 2011).

Pode-se observar que para mesmo valores de velocidade específica há a indicação de 2 turbinas.

Nas turbinas de ação, segundo Arne Kjolle (2001), a energia do fluxo d'água é completamente convertida em energia cinética antes de entrar em contato com o rotor. Isto significa que o fluxo d'água passa no distribuidor sem nenhuma diferença de pressão entre a entrada e a saída. Portanto, somente a ação das forças devido à mudança no vetor velocidade cria a energia mecânica no eixo do rotor, um exemplo de uma turbina de ação é a Pelton.

O fluxo entra no eixo com pressão muito próxima da atmosférica na forma de um ou mais jatos espaçados regularmente em torno da borda do rotor. Isto significa que cada jato atinge momentaneamente apenas uma fração ou parte da circunferência do rotor. (Lopes, 2011)

Nas turbinas de reação dois efeitos causam a transferência de energia do fluxo d'água para a energia mecânica no eixo da turbina. Primeiramente ocorre uma queda de pressão da entrada para a saída do rotor, gerando uma diferença de pressão que faz com que o rotor se mova. O outro efeito é a ação das forças devido à mudança no vetor velocidade criando a energia mecânica no eixo do rotor, (Arne Kjolle, 2001). Na figura 2, temos um comparativo entre os rendimentos de algumas turbinas, para exemplificar uma turbina de reação, podemos citar uma turbina Kaplan.

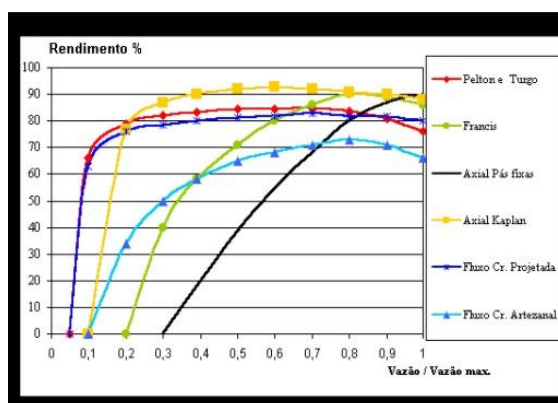


Figura 2: Comparação de rendimentos.

Fonte: Meu site Mackenzie

O rendimento de alguns tipos de turbinas variando a vazão e considerando a altura útil constante. Onde podemos ver que a turbina Axial Kaplan tem o maior rendimento.

### 3.1 Campo de Aplicações

As Turbinas podem ser classificadas de acordo com o fluxo. Fluxo paralelo ao eixo de rotação, são as turbinas axiais, fluxo perpendicular ao eixo de rotação são as radiais (MACINTYRE, 1983).

Para Silva (2009), as turbinas hidráulicas normalmente se instalam máquinas radiais tais como as Francis, em locais de grande altura de queda e vazões médias e máquinas axiais como a Kaplan em condições de grandes vazões e baixa altura de queda. Na figura 3 apresenta faixa de altura e vazão para a aplicação de algumas turbinas.

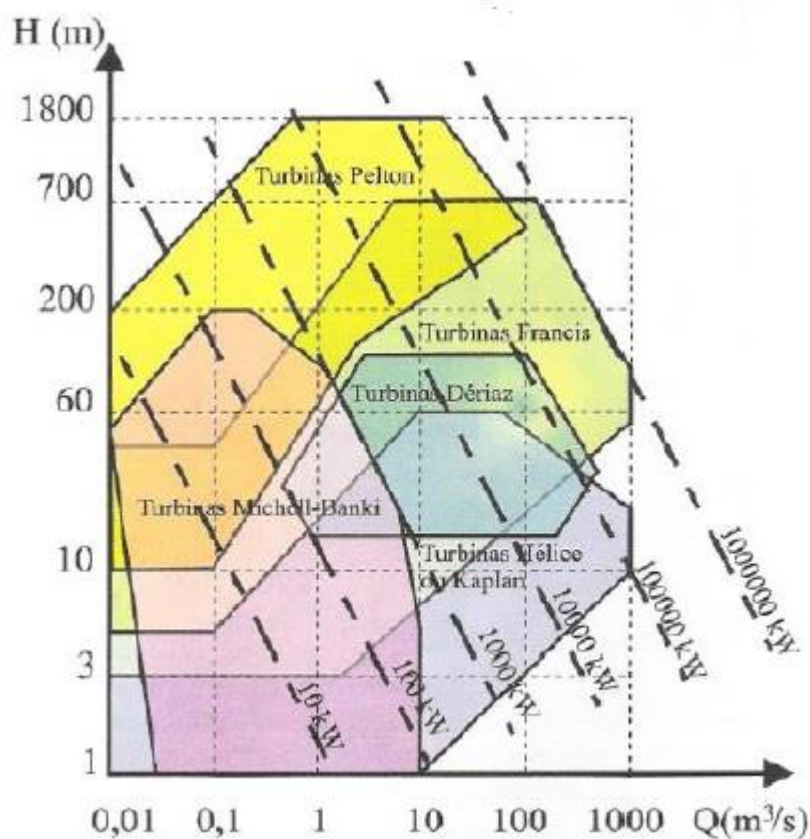


Figura 3: Campo de aplicações das turbinas.  
Fonte: Filho (2015, p.22)

As turbinas Pelton é geralmente utilizada em usinas cuja altura útil é maior do que 250 metros, embora seja também utilizada para alturas menores. Há instalações nos Alpes

europeus onde a altura chega a quase 1800 metros, (COSTA, 2003). Na Figura 3 temos a composição uma turbina Pelton.



Figura 4: Turbina Pelton  
Fonte: Meu site Mackenzie

Já as turbinas Francis são usadas principalmente em médias quedas de até 600 metros, e vazões elevadas. Tem sido aplicada largamente, pelo fato das suas características cobrirem um grande campo de velocidade específico. Atualmente se constroem para grandes aproveitamentos, podendo ultrapassar a potência unitária de 750MW, segundo Filho (2015). Na Figura 4 temos uma demonstração de como a turbina Francis é utilizada. A água entra no duto onde vai para direção das paletas fazendo as mesmas girarem e assim gerando a energia, depois a mesma sai na direção do eixo de rotação.

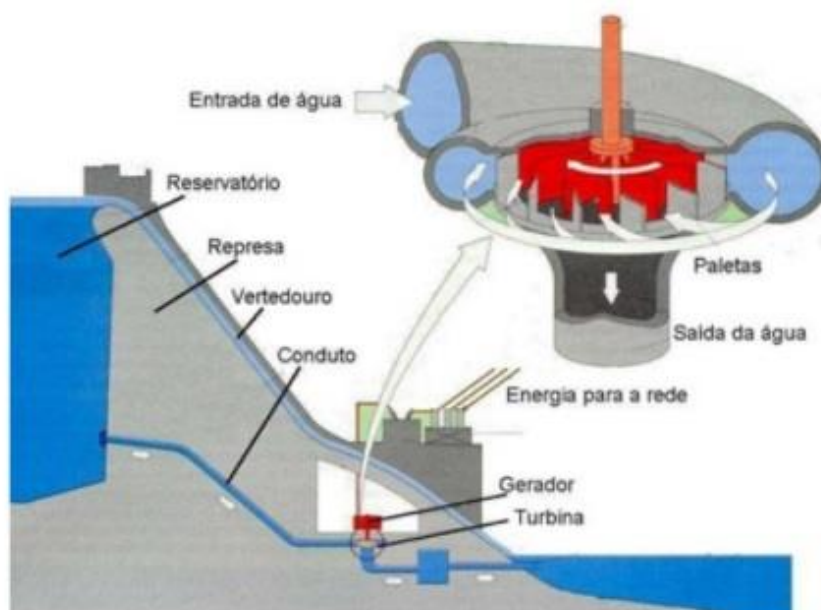


Figura 5: Turbina Francis, esquemático.  
Fonte: Filho (2015, p. 9)

As turbinas Kaplan são indicadas para quedas de até 60 metros e rotação específica acima de 350 rpm, permitindo uma ampla variação da descarga e da potência sem apreciável variação do rendimento total, segundo Filho (2015). Na Figura 5 temos um exemplo de uma turbina Kaplan.

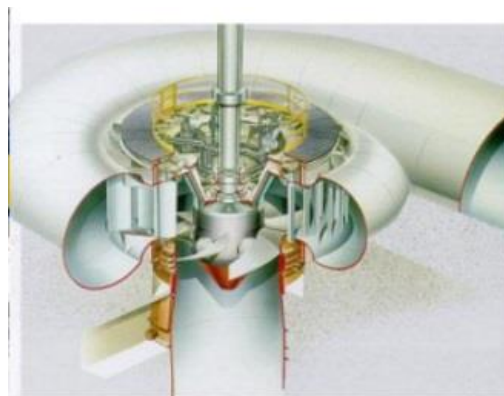


Figura 6: Turbina Kaplan  
Fonte: Filho (2015,p 11)

### 3.2 Escoamento

Há uma grande variedade de problemas de escoamento de fluidos encontrados hoje em dia, onde a classificação com base nas suas características comuns para estudá-los em grupos se torna conveniente, segundo Çengel (2007). O escoamento na qual a variação da massa específica é considerado desprezível é denominado incompressível, e quando a variação de massa não é desprezível, temos o escoamento compressível, segundo Fox(1998).

Quando duas camadas fluidas se movem uma em relação à outra, desenvolve-se uma força de atrito entre elas e a camada mais lenta tenta reduzir a velocidade da camada mais rápida. Os escoamentos em que os efeitos do atrito são significativos chamam-se escoamento viscoso. Entretanto, em muitos escoamentos de interesse prático, há regiões onde as forças viscosas são pequenas comparadas às forças inerciais e de pressão. Desprezar os termos viscosos em regiões de escoamento não viscoso simplifica bastante a análise, (ÇENGEL,2007).

### 3.3 Número de Reynolds

O número de Reynolds, embora introduzido conceitualmente em 1851 por um cientista da época, tornou-se popularizado na mecânica dos fluidos pelo engenheiro hidráulico e físico

Irlandês, Osborne Reynolds em 1883. Em seus estudos teóricos, demonstrações e experiências práticas de laboratório, ele demonstrou a existência de três tipos de escoamento, laminar, transitório e turbulento, segundo Marcos (2010). Assim, pode-se dizer que o número de Reynolds basicamente define o regime do escoamento. Onde esse segundo Çengel (2007), o escoamento é laminar quando o movimento dos fluidos é altamente ordenado caracterizado por uma estrutura laminar de camadas suaves, devido as moléculas estarem aderidas umas nas outras.

De acordo com Fox (2012) quando o escoamento é altamente desordenado caracterizado por movimentos tridimensionais aleatórios de partículas fluidas onde não existe uma camada suave, sendo assim um escoamento caótico conhecido como turbulento. Ainda temos o regime transitório, que segundo Fox (2012), consiste no ponto em que o regime muda o seu comportamento, de laminar para turbulento ou de turbulento para laminar. A Figura 7 exemplifica os três tipos de escoamento.

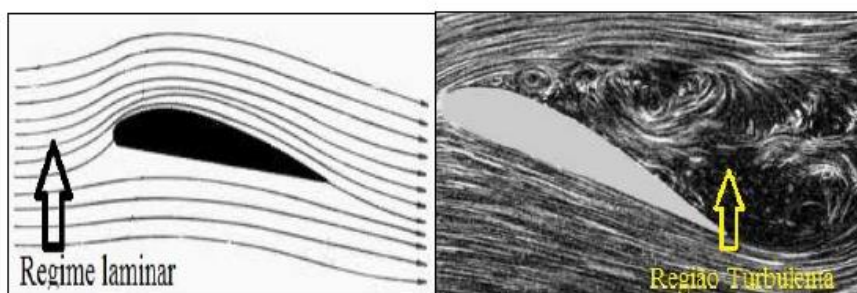


Figura 7-E escoamento Laminar, transitório e turbulento.  
Fonte: Dantas( 2014, p 30).

Segundo Bruno et.al. (2016), número de Reynolds ( $Re$ ) é um número adimensional utilizado para cálculo do escoamento de um fluido em determinada superfície. Segundo Brunetti (2008), Reynolds analisou a ocorrência da variação do escoamento dependendo do valor dado pela equação (2), onde “ $\rho$ ” é a densidade do fluido, “ $C$ ” o comprimento da corda do perfil, “ $v$ ” a velocidade do escoamento e “ $\mu$ ” a viscosidade dinâmica do fluido.

$$Re = \frac{\rho v C}{\mu} \quad (2)$$

### 3.4 Perfis Aerodinâmicos

A história dos perfis aerodinâmicos é longa e envolve vários nomes que contribuíram para seu desenvolvimento em busca de uma melhor eficiência. Para Miranda (2013) um perfil aerodinâmico é uma superfície projetada com a finalidade de se obter uma reação aerodinâmica a partir do escoamento do fluido ao seu redor. Apenas no século XX que começaram os estudos sobre perfis aerodinâmicos, após as observações necessárias que deram início as teorias e formulações matemáticas que representavam os efeitos analisados nos tuneis de vento.

Estes perfis aerodinâmicos estavam longe de serem considerados de alto desempenho, segundo Dantas (2014) só no começo do século 20 a NACA iniciou um grande projeto experimental, qual o intuito era desenvolver perfis com grande capacidade aerodinâmica e categorizar cada família de perfis aerodinâmicos mostrando os efeitos gerados em cada geometria específica. Cada perfil aerodinâmico recebeu sua nomenclatura e foi classificado e separado para melhor organização dos perfis desenvolvidos. A separação das geometrias se iniciou pela família de quatro dígitos, NACA 4412 e todo o desenvolvimento da NACA foi baseado na definição da geometria da distribuição de espessura do perfil e da sua linha média, segundo Rosa (2006). Na Figura 8, temos um exemplo de alguns perfis aerodinâmicos.

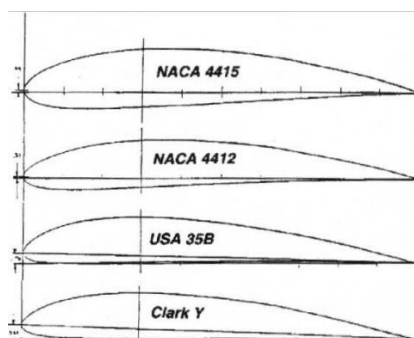


Figura 8:Perfis Aerodinâmicos

Fonte: Aviação experimental

### 3.4.1 Forças atuantes entorno de um perfil

Para se chegar á escolha do perfil mais adequado para o projeto, é de extrema importância conhecer todas as forças que atuam ao seu redor. Basicamente as forças geradas em um perfil são provenientes da reação que o fluido gera ao entrar em contato com um corpo solido em movimento. Essas reações são as responsáveis por gerar pressões em torno da superfície inferior e superior do perfil, e dessa forma podemos calcular as forças de sustentação, arrasto e momento em torno do mesmo, todas essas provenientes da pressão gerada em torno do aerofólio, Dantas (2014).

### 3.4.1.1 Força de Sustentação

Variações de pressão são causadas pelo desvio de um fluido em movimento. A sustentação é uma força em um objeto sólido imerso em um fluido em movimento, e atua de forma perpendicular ao fluxo do fluido. A força líquida é criada por diferenças de pressão geradas por variações na velocidade do fluido em todos os pontos ao redor do objeto, Ribeiro (2011). Alguns princípios básicos da física podem ser aplicados para o entendimento da criação da força de sustentação como a terceira lei de Newton e o teorema de Bernoulli. É do conhecimento de todos que a terceira lei de Newton diz que para toda ação há uma reação, de igual magnitude e direção, com sentido oposto.

Segundo Dantas (2014) o entendimento dessa lei nos dá a possibilidade de entender a geração de força resultante no perfil, quando o aerofólio está imerso no fluido e em movimento, temos que uma força é gerada a partir do movimento das partículas de fluido em torno do aerofólio, por meio de uma variação de pressão entre a parte de cima e a parte de baixo do mesmo. A Figura 9 mostra a distribuição da pressão ao redor do perfil.

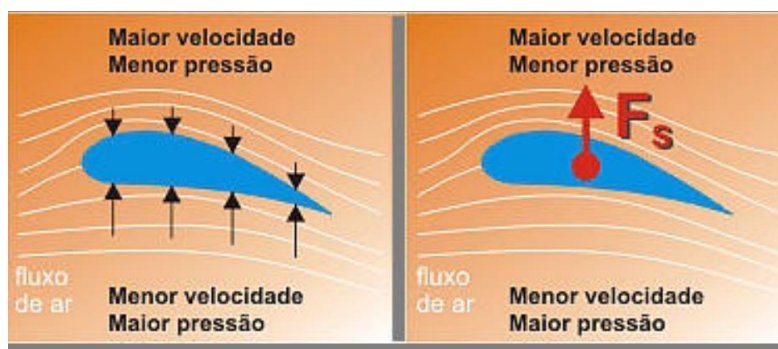


Figura 9- Força de sustentação agindo em um perfil.  
Fonte: Física Moderna

Segundo Dantas (2014) em regra para se expressar a força de sustentação, utiliza-se de túneis de vento ou de software específico para determinação dos coeficientes. Esses coeficientes nos ajudam prever o quanto de força será gerada em função da inclinação que o perfil faz com linha imaginária horizontal do escoamento, assim chamado de ângulo de ataque. Segundo Ribeiro (2011), o coeficiente de sustentação  $c_l$  é adimensional e é função do modelo do perfil, do número de Reynolds e do ângulo de ataque. Para todo e qualquer projeto sempre se procura a máxima eficiência em sustentação, onde um bom perfil fornece essas condições, já que perfis

que tem grandes valores de  $c_l$  são considerados perfis eficientes de geração de força, segundo Rosa (2006).

O coeficiente de sustentação pode crescer até o ângulo de estol, dependente da inclinação do ângulo de ataque. Uma vez ultrapassando essa inclinação máxima, ocorre a redução do coeficiente de sustentação. Esse ângulo máximo de ataque em que se tem  $C_{lmax}$  coincide com o ângulo de estol. Segundo Miranda (2013), o estol é provocado pelo descolamento do escoamento na superfície superior do perfil, esse deslocamento é devido a um gradiente adverso de pressão que possui a tendência de fazer com que a camada limite se desprenda da superfície, portanto a partir do ângulo de estol, temos a queda do coeficiente de sustentação. A Figura 10 a abaixo exemplifica esse fenômeno.

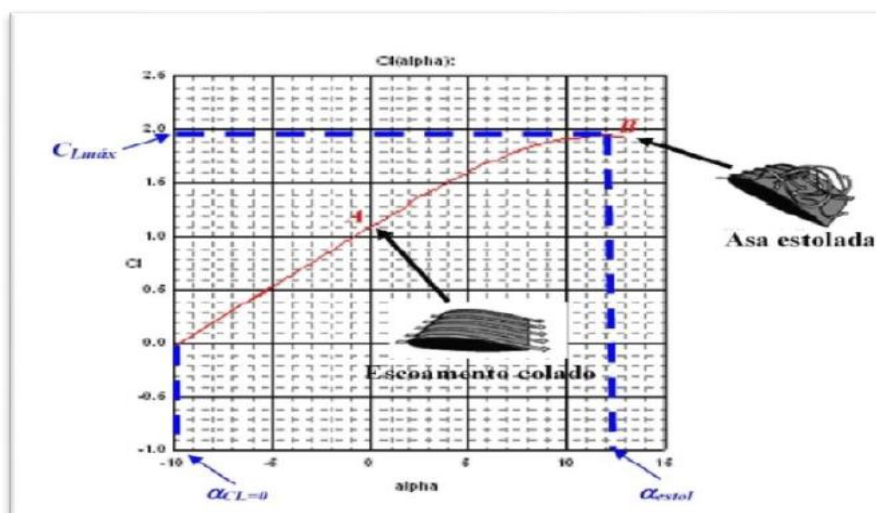


Figura 10-Perda de sustentação devido alto ângulo de ataque.

Fonte: Miranda (2013, p. 28.)

Portanto a sustentação é proporcional ao seu coeficiente  $c_l$ , e esse é diretamente dependente das características de cada aerofólio escolhido para o projeto. Dessa forma, fica evidente a importância de se determinar o melhor perfil para o projeto, pois a escolha do melhor aerofólio para cada tipo de projeto trará certamente o melhor desempenho, (DANTAS, 2014).

### 3.4.2 Geometria do Perfil Aerodinâmico

Como cada perfil tem sua geometria distinta, essa geometria fica definida por alguns parâmetros básicos, que segundo Miranda (2013), temos a lista desses parâmetros a baixo:

- Linha de Corda.

- Linha de arqueamento médio.
- Espessura.
- Raio do bordo de ataque.
- Raio do Bordo de fuga.

Na Figura 11, podemos visualizar os parâmetros citados anteriormente ao longo do perfil.

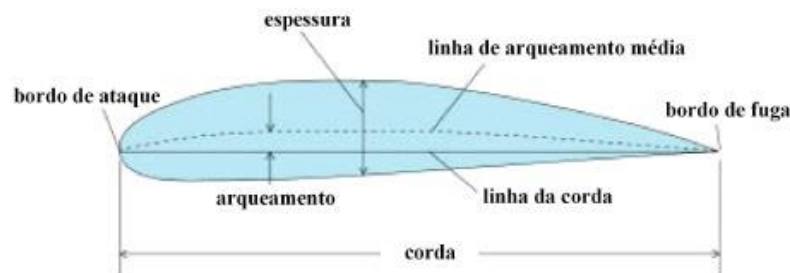


Figura 11: Geometria de um Perfil Aerodinâmico

Fonte: Miranda (2013, p. 29)

A linha de arqueamento médio representa a linha que define o ponto médio entre todos os pontos que formam as superfícies superior e inferior do perfil, a linha de corda representa a linha reta que une os pontos inicial e final da linha de arqueamento média. Já a espessura representa a altura do perfil medida perpendicularmente à linha da corda, segundo Miranda (2013).

De acordo com Rosa (2006), o raio do bordo de ataque é o raio no qual se determina a curvatura do bordo de ataque do perfil, e esse raio é medido em porcentagem da corda. Para Dantas (2014), a geometria do perfil é função exclusivamente da corda, todos seus parâmetros são dependentes, em porcentagem, do seu comprimento. Segundo Rosa (2006), normalmente considera-se a corda unitária, com os pontos iniciando no bordo de ataque seguindo pela superfície superior e retornando pela superfície inferior, desta forma percorrendo um sentido anti-horário.

O ângulo de ataque( $\alpha$ ) é a inclinação que o perfil tem perante a linha imaginária horizontal do escoamento, observado na Figura 12.

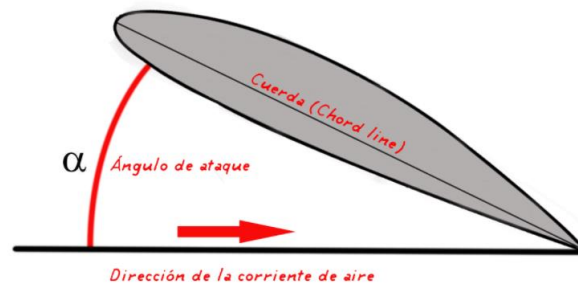


Figura 12- Ângulo de ataque( $\alpha$ )  
Fonte: Rinconcete

### 3.5 NACA

Tudo se iniciou com 12 homens trabalhando em pesquisas no campo da aeronáutica. Em março de 1915 surge a NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), enquanto muitas nações estavam lutando na primeira guerra mundial, o congresso dos Estados Unidos da América e o presidente Woodrow Wilson assinaram o projeto de aprovação naval que especificava a missão do NACA: (Supervisionar e dirigir o estudo científico dos problemas do voo com uma solução prática, e determinar os problemas que devem ser atacados experimentalmente e discutir a sua solução e a sua aplicação a questões práticas), (ABBOTT, 1959).

### 3.6 Método Numérico

Segundo Chapra (2011), os métodos numéricos são técnicas pelas quais os problemas matemáticos são formulados de modo que possam ser resolvidos com operações aritméticas. Com o desenvolvimento de computadores digitais rápidos e eficientes, o papel dos métodos numéricos na resolução de problemas de engenharia aumentou dramaticamente nos últimos anos.

Os algoritmos numéricos são voltados ao processamento numérico, isto é, as operações aritméticas formam o núcleo do algoritmo e seu objetivo é obter um ou mais resultados numéricos. O desenvolvimento e aplicação dos métodos numéricos estão vinculados a evolução computacional. Por isso, a escolha de um algoritmo deve envolver fatores relevantes, como os

aspectos de precisão desejada, capacidade do método em conduzir os resultados desejados e o esforço computacional utilizado, (CHERRI, 2007). O processo de modelagem segue o fluxograma descrito na Figura 13, onde começa o levantamento de dados de um problema real selecionado, sem seguida constrói um modelo matemático do problema, o próximo passo é escolher um método para resolver esse modelo matemático que foi elaborado. Os cálculos são realizados por computadores, essa é a fase da implementação computacional, para em seguida analisa-se os resultados.

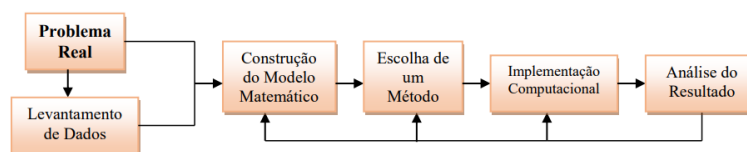


Figura 13-Fluxograma das etapas de modelagem.

Fonte: Cherri (2007)

### 3.6.1 Volume finitos

O Método dos Volumes Finitos é definido como a integração no espaço e no tempo da equação diferencial na forma conservativa em um dos volumes de controle, (Patankar, 1980). Neste método, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas de elementos. As equações são discretizadas e resolvidas numericamente em cada elemento. Com o resultado, umas aproximações do valor de cada variável em pontos específicos de todo o domínio podem ser obtidos. Deste modo, pode-se obter uma imagem completa do comportamento do escoamento (ANSYS, 2006).

### 3.6.2 Modelos de turbulência

De acordo com Neto (2007), a escolha de um modelo ideal para o escoamento turbulento deve introduzir o mínimo em complexidade, enquanto adquire a essência física relevante. Por ser um fenômeno complexo, é importante se ter uma grande quantidade de informações: assim, espera-se que quanto mais complexo seja o problema a ser resolvido, mais sofisticado deverá ser o método de solução ser adotado. Logo, o requisito de simplicidade do modelo de turbulência será relativo à complexidade do problema a ser solucionado, conforme Sant'anna (2012).

A turbulência é um fenômeno no qual as partículas do fluido se misturam de forma não linear, que é descrito através de diversos modelos de turbulência. Os modelos que estão sendo estudados são: Omega Reynolds Stress; QI Reynolds Stress; LRR Reynolds Stress; kOmega; RNG k-Epsilon; Zero Equation; SSG Reynolds Stress; Shear Stress Transport; kEpsilon. Percebeu-se que o modelo  $k-\varepsilon$  apresenta uma maior proximidade com os dados experimentais, o que nos leva a apresentá-lo a seguir, segundo Heuert (2009).

### 3.6.2.1 Modelo $k-\varepsilon$

O modelo  $k-\varepsilon$  apresenta vantagens por ser um modelo simples que necessita somente de condições iniciais e de contorno para sua aplicação. Possui uma excelente performance na maioria dos escoamentos relevantes na indústria, e, além disso, é o modelo mais validado com dados experimentais e indústrias (GOMEZ, 2008).

De acordo com Heuert e Khatchatourian (2007), no modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ ,  $k$  é a energia cinética de turbulência e é definida como a variação das flutuações de velocidade e  $\varepsilon$  é a dissipação de energia turbulenta, a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam. Conforme Gomez (2008), o modelo  $k-\varepsilon$  foi desenvolvido por Launder e Spalding em 1974. A energia cinética turbulenta é o ponto de partida deste modelo e é definida em relação às flutuações dos componentes da velocidade. A dissipação de energia turbulenta é uma variável que aparece como termo de destruição na equação do transporte de energia turbulenta.

Segundo Heuert e Khatchatourian (2007), além do modelo  $k-\varepsilon$  standard (padrão), existem duas variações deste que podem ser referidas. Portanto, o modelo  $k-\varepsilon$  é apresentável nas formas: standard  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$  e realizable  $k-\varepsilon$ . Suas três formas são muito similares, uma vez que as equações de transporte se baseiam em  $k$  e  $\varepsilon$ . As principais diferenças estão no método de calcular a viscosidade turbulenta, os números de Prandtl que governam a difusão turbulenta de  $k$  e  $\varepsilon$  e os termos de geração e destruição na equação  $\varepsilon$ . Conforme Souza (2006), apresentando-se como a segunda variação do modelo Standard  $k-\varepsilon$ , esta versão é chamada pela expressão “*realizable*”, cujo significado vem expressar que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas, coerente com a física dos escoamentos turbulentos. Nem os modelos Standard e RNG  $k-\varepsilon$  possuem estas considerações.

#### 4. METODOLOGIA

O escoamento bidimensional ao redor do perfil foi calculado utilizando software Ansys, o mesmo utiliza do código FLUENT para resolução. No código FLUENT temos a utilização das equações de Navier-Stokes para solucionar o problema do escoamento viscoso. O modelo de turbulência utilizado é *Realizable  $k-\varepsilon$*  com *Enhanced Wall Treatment* (tratamento de parede aprimorada) na qual essa última opção permite um aumento de precisão na zona próxima a parede do perfil.

Para a determinação do escoamento viscoso em torno do perfil, foi utilizado o código FLUENT ao invés do código CFX, e isso se deve ao fato de poder utilizar geometrias bidimensionais diretamente.

Para início obtivemos os pontos do perfil NACA 66-209 disponível na página “Airfoiltools”, assim podemos modelar o perfil bidimensional utilizando o software NX Siemens, como mostra a Figura 14 abaixo.

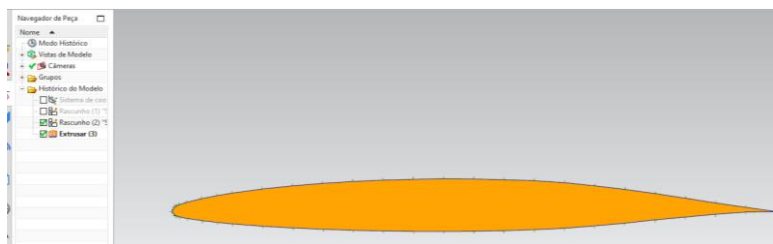


Figura 14-Perfil modelado no NX

Fonte: acervo pessoal

Agora que o perfil foi obtido passa-se para o ANSYS onde irá se criar o volume de controle, a Figura 15 mostra o volume de controle obtido.

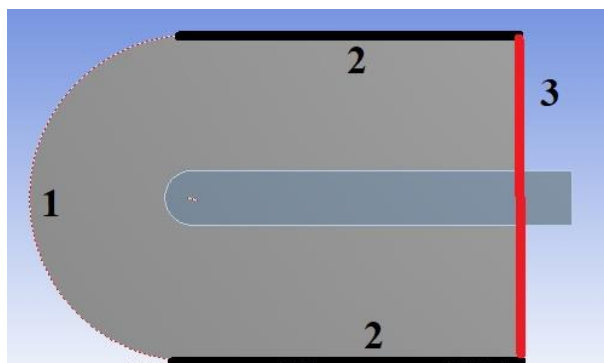


Figura 15-Volume de controle

Fonte: acervo pessoal

O volume de controle acima tem o comprimento de 3 metros pois a corda do perfil é de 0,1 metros. De acordo com o manual do ANSYS(2010), o volume de controle tem que ser 30 vezes maior que a corda do perfil. O escoamento do fluido se dá na direção de 1 para 3. As condições de contorno escolhidas para se obter uma maior aproximação da realidade foram Velocidade imposta (*velocity inlet*), direção e modulo, nas seções 1 e 2. e outflow na secção de saída (3).

O próximo passo é a criação da malha, que próximo ao perfil deve ser bem refinada. Assim usamos uma zona de malha estruturada (*boundary layer mesh*), utilizando um *inflation* com *first layer thickness* onde indica que a geração da malha irá ser próxima ao perfil, com *first layer height* que determinar a altura da mesma, na qual foi calculado através da calculadora online. Entra-se com alguns dados e obtém-se o número de Reynolds e a altura da primeira camada, os valores obtidos através da calculadora online são todos referentes a temperatura ambiente de 298,15 kelvin. A calculadora online pode ser vista na Figura 16 logo a baixo.

**Y+ Wall Distance Estimation**

| Input                    |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| Freestream velocity:     | 10 [m/s]                 |
| Density:                 | 998 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Dynamic viscosity:       | 9.8e-4 [kg/ms]           |
| Boundary layer length:   | 0.1 [m]                  |
| Desired Y+ value:        | 1.0 []                   |
| Output                   |                          |
| Reynolds number:         | 1.0e+6 []                |
| Estimated wall distance: | 2.3e-6 [m]               |

Figura 16- Calculadora CFD online  
Fonte: Acervo pessoal.

Foram utilizados 2000 divisões e uma taxa de crescimento (*grow rate*) de 1,2 e uma zona não estruturada no restante domínio do escoamento. Regiões próximas ao perfil e na esteira tiveram malha refinada, com elementos de tamanho mínimo de 3mm e com taxa de crescimento de 1,2. Na Figura 17 tem-se a imagem da malha estruturada próxima ao perfil.

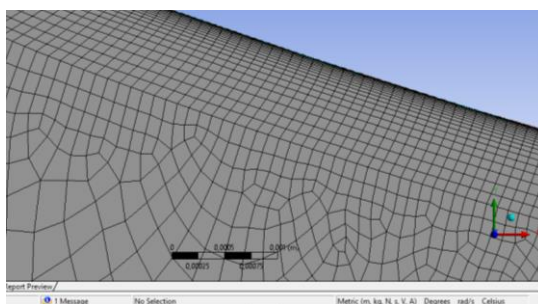


Figura 17-Malha estruturada próxima ao perfil  
fonte: Acervo pessoal.

Para cada ângulo de ataque ( $\alpha$ ) foi gerado uma malha que diferencia da outra em números de nós, mas apresentam discretizações semelhantes. Para exemplificar na Figura 18 tem-se um número de 151939 nós na malha gerada para o  $\alpha=11^\circ$ .

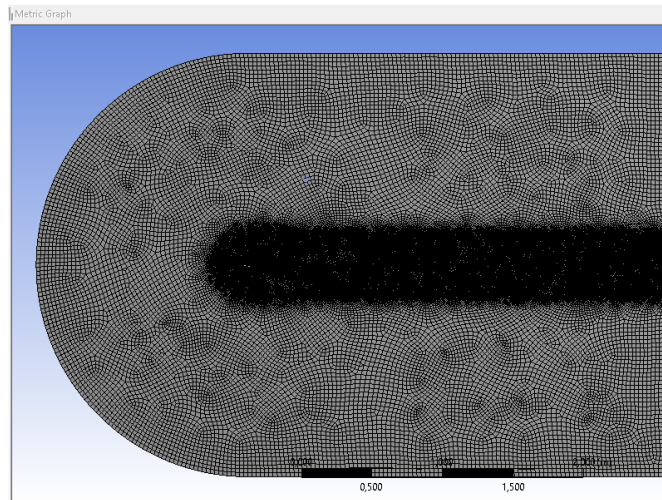


Figura 18- Malha para  $\alpha=11^\circ$ .  
Fonte: Acervo pessoal.

Para finalizar a opção *solver* foram utilizadas as configurações padrão, com o modelo de turbulência do *Realizable k- $\epsilon$* . A discretização espacial também foi deixada nas opções padrão, que são *Last squares cell based Gradient*, *Second Order Upwind Flow* e *Turbulent Kinetic Energy* e *Dissipation Rate* com *Second order upwind*.

## 5. RESULTADOS

O objetivo do trabalho desenvolvido foi analisar o comportamento do coeficiente de sustentação do perfil NACA 66-209, quando se varia o número de Reynolds do escoamento. Para essa análise foi utilizado o software Ansys que através do código FLUENT utiliza o método numérico dos volumes finitos para determinação do escoamento em torno do perfil. O NACA 66-209 está representado na figura 19, tendo como espessura relativa máxima  $t/c=9\%$  a  $x/c=45\%$ , onde a corda do perfil foi de 0,1m afim de diminuir o tempo de processamento na geração da malha.

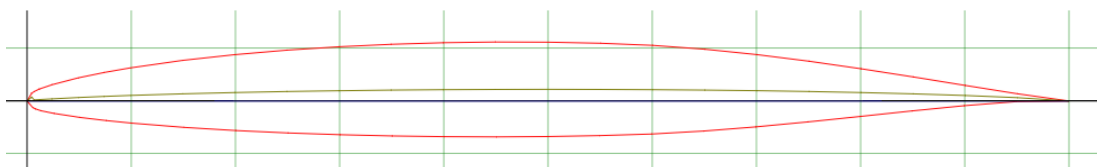


Figura 19- Perfil NACA 66-209  
fonte: AirfoilsTools

### 5.1 Discretização da Malha

Para justificar a escolha da malha na análise realizada foi feita uma caracterização da mesma usando o parâmetro  $h_i/h_1$ , onde temos a relação do volume total com a quantidade de elementos. Para cada malha é gerado um  $h_i$  partindo da malha com o menor número de elementos até a malha com o maior número de elementos ( $h_1$ ). No software ANSYS, a dependência da malha foi calculada a variação do  $cl$  em função do parâmetro citado a cima, para um número de Reynolds  $Re=500000$  e para um ângulo de ataque  $\alpha=0^\circ$ . O gráfico 1 abaixo mostra a relação do  $Cl$  com  $h_i/h_1$ .

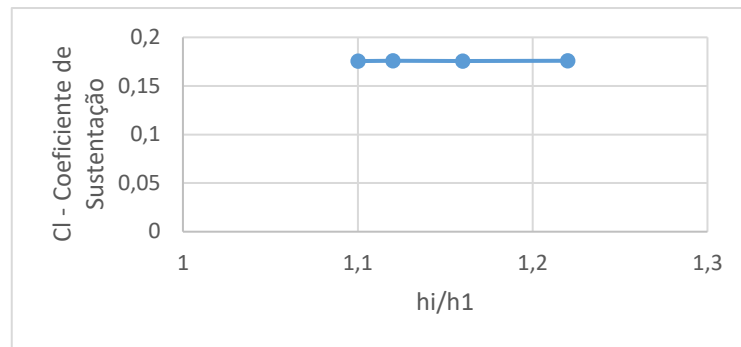


Gráfico 1- Discretização da malha  
fonte: Acervo pessoal.

Quando temos  $h_i/h_1 = 1,12$  o valor de  $c_l$  não varia mais com número de nós igual acima de 150000.

## 5.2 Coeficiente de Sustentação.

Foram plotados os gráficos do coeficiente de sustentação em relação ao ângulo de ataque para vários números de Reynolds distintos.

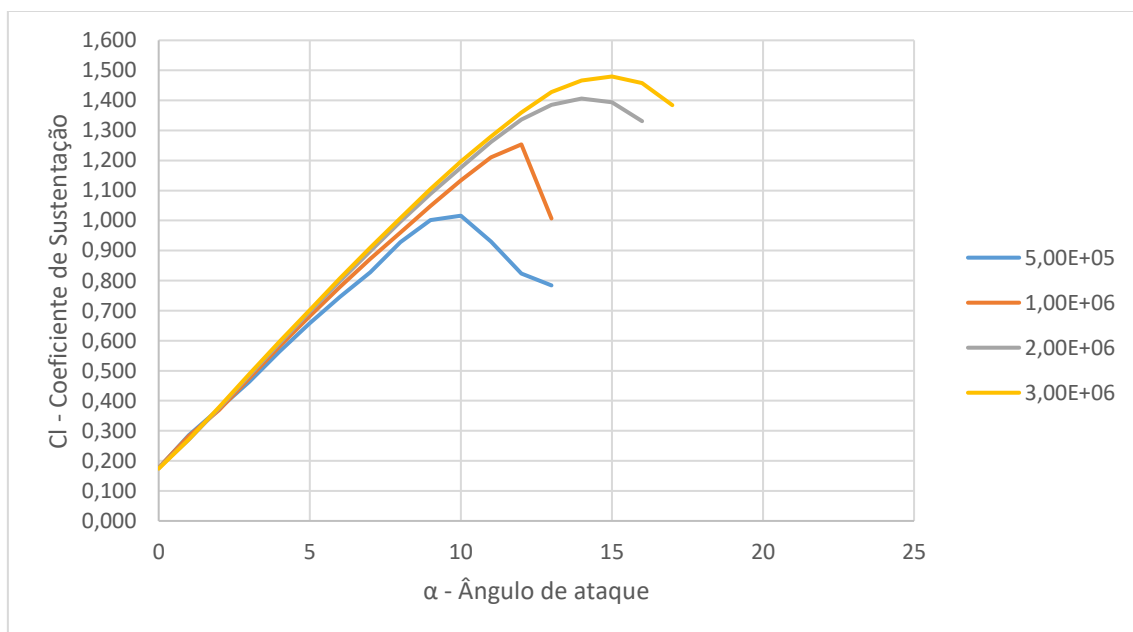


Gráfico 2- Curvas  $c_l$  versus  $\alpha$  para vários números de Reynolds  
Fonte: acervo pessoal

Pode-se observar no gráfico 2 que de 0 graus a 5 graus os gráficos se sobrepõem e de 5 graus a aproximadamente 8 graus temos uma pequena divergência de valores, isso pode ser devido a falta de experiência na utilização do ANSYS onde os ajustes finos da malha devem ser minuciosos. Considerando essa zona linear, tem-se a independência do número de Reynolds para a relação  $c_l$  versus  $\alpha$ . Algo que não se é observado para valores de  $\alpha$  maiores que 10 graus, onde a partir desse ponto o  $c_{lmax}$  aumenta de acordo com o crescimento do número de Reynolds.

Para curva com o número de Reynolds  $Re = 5 * 10^5$  temos o ângulo de estol igual aproximadamente a 11 graus. Com o aumento do número de Reynolds, esse ângulo de estol aumenta aproximadamente para 13 graus, 14 graus e 16 graus; respectivamente  $Re = 1 * 10^6, Re = 2 * 10^6, Re = 3 * 10^6$ . A tendência é que o ângulo de estol acompanhe o crescimento do número de Reynolds.

Esses resultados foram obtidos utilizando um fluido com densidade de  $998 \text{ kg/m}^3$  e uma viscosidade dinâmica de  $9,8 * 10^{-4} \text{ Kg/ms}$ . A escolha desses valores como propriedades mecânicas do fluido dá-se devido a tentativa de simular o escoamento de trabalho de uma turbina hidráulica onde tem-se elevados números de Reynolds.

## 6. CONCLUSÃO

A utilização do método numérico do volume finito, através da resolução dos problemas resultantes do escoamento bidimensional incompressível com as equações de Navier-Stokes com modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  foi possível devido o Software ANSYS. Assim pode-se analisar o escoamento ao redor do perfil NACA 66-209 que sem o auxílio do software não seria possível.

A curva  $c_l$  versus ângulo de ataque ( $\alpha$ ) foi plotada no excel, onde facilmente pode-se observar os dados e montar um gráfico. A obtenção desses dados foi concebida através do código FLUENT que o ANSYS utiliza, que se demonstrou um desafio na sua complexidade de setup e principalmente no quesito computacional onde se faz necessário um suporte de bons hardwares para o grande processamento de dados que o método numérico exige. O alto nível do software dá uma gama de possibilidades para explorar os vários perfis existentes e obter muitas informações úteis tanto para o meio acadêmico quanto para fins comerciais.

A variação da velocidade do escoamento para obtenção de números de Reynolds diferentes, conclui que para uma variação de vazão que não altere a área da secção de entrada, tem-se que o comportamento do coeficiente de sustentação é também influenciado pela angulação do aerofólio, assim podemos pré-definir um ângulo de ataque onde teremos um  $c_{lmax}$  para o número de Reynolds conhecido, aumentando a eficiência da turbina.

Como sugestões de trabalhos futuros pode-se analisar a influência do número de Reynolds em outras forças atuantes em um perfil como coeficiente de arrasto e coeficiente de momento. Essa análise pode ser feita utilizando outros métodos numéricos e até outros softwares. Até a mesma análise realizada nesse trabalho pode ser feita de maneira tridimensional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, I.H; DOENHOFF, A.E.V. **Theory of Wing Sections**; 1ed. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1959.
- ANSYS INC. ANSYS CFX-11.0, CFXSolver, Theory Guide, 2006.
- ANSYS INC. ANSYS CFX-11.0, CFXSolver, Theory Guide, 2010.
- BRUNO, ALEX. Et al. **Número de Reynolds**; Minas Gerais; Setembro, 2016.
- BRAGA, Danilo de Souza. **Metodologia Para o Desenvolvimento E Análise Estrutural de Um Aeromodelo**; 2011. 178f. TCC (Graduação)- Curso de engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica Dos Fluidos**; 2ed. São Paulo, Pearson 2008.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, JOHN M.. **Mecânica Dos Fluidos: Fundamentos E Aplicações**; Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2007.
- COSTA, Antonio Simões; **Turbinas Hidráulicas E Condutas Forçadas**; Santa Catarina; Março, 2003.
- CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P.; **Métodos Numéricos Para Engenharia**; 5ed. Brasil, Mc Graw-Hill Book Company, 2011.
- CHERRI, Adriana. **Métodos Numéricos**; São Paulo, 2007.
- DANTAS, Albert Franklin De Moura; **Análise Aerodinâmica De Perfis De Asa Para Veículos Aéreos Não Tripulados Usando O Software Xflr5**; Dissertação (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido; Angicos, 2014.
- FOX, Et al. **Introdução A Mecânica Dos Fluidos**; 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- FILHO, José Gilberto Dalfré; **Turbinas Hidráulicas- Tipos E Usos**; Disponível em:<<http://docslide.com.br/documents/turbinas-hidraulicas-55ef3ff5660bb.html>> . Acesso em 20 de abril de 2017.
- GILMOUR, Allan A.; **Estudo Sobre O Modelamento de Um Aerofólio NACA 0012**; São Paulo, 2012.
- GOMEZ, D.A; **Análise Do escoamento Compressível De Gás Natural Em Espaços Com Restrições Para Elevação De Petróleo**; Dissertação de Mestrado, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- HEUERT, Jenifer; KHARTCHATOURIAN, Oleg; **Interação Entre Jatos Transversais E Fluxo Principal: Simulação Análise Comparativa De Modelos De Turbulência**; Rio Grande do Sul, 2009.
- KJOLLE, Arne; **Hydropower In Norway Mechanical Equipment**; Trondheim: Norwegian Universite of Science and Tecnology, 2001.
- LOPES, Rafael; **Comissionamento De Turbinas Hidráulicas: Ensaios De Faixa Operativa, Índex Teste E Rejeição De Carga**; Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- MARCOS, Junior; **Experiência De Reynolds**; Alagoas, 2010.

MACINTYRE, ARCHIBALD, JOSEPH; **Máquinas Motrizes Hidráulicas**; Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1983. 640 p.

MIRANDA, R.L.E; **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica**; 1.ed. Salto: Cengage, 2013.

NETO, Lima S.C.; **Análise Híbrida Do escoamento Turbulento Em Canais Via Modelos De Turbulência De Uma Equação De Transporte**; Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

PEREIRA, L. H. G.; **Análise Do Desempenho Do Método Dos Painéis De Ordem Superior Para O Cálculo Do Escoamento Em Torno De Um Aerofólio**; 2005.127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RAMOS, Ricardo Alan Verdú; SILVA, João Batista Campos; **Máquinas Hidráulicas E Térmicas**; Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José; **Fundamentos Da Engenharia Aeronáutica Com Aplicações Ao Projeto SAE-Aerodesign: Aerodinâmica E Desempenho**; Salto, 1.ed, 2014.

RIBEIRO, Thales, S. G.; **Voando Mais Alto Mecânica Aérea**; São Paulo, 2011. (Apostila)

PATANKAR, S.V.; **Numerical Heat Transfer And Fluid Flow**; Hemisphere, 1980.

SOUZA, Leonardo. B. S.; **Estudo Experimental E Modelagem Numérica Do Escoamento E Do Assoreamento Em Uma Armadilha De Sedimentos**; Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SANT'ANNA, Mikele C. S.; **Otimização De Um Misturador Estático Para A Produção De Biodiesel**; Sergipe, 2012.

YOSHIMOTO, S.; NAKASONE, Y.; STOLARKSI, T. A.; **Engineering Analysis With Ansys Software**; 1 ed, Tokyo, Elsevier ButterWorth-Heinemann, 2006.