

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KEVEEN RODRIGO ENFERDI TENERELI

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM BOCAL
CONVERGENTE-DIVERGENTE EM MOTOR-FOGUETE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

KEVEEN RODRIGO ENFERDI TENERELI

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM BOCAL
CONVERGENTE-DIVERGENTE EM MOTOR-FOGUETE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO apresentada à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza
Lourenço

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO NUMÉRICO DE UM BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE EM MOTOR-FOGUETE

por

KEVEEN RODRIGO ENFERDI TENERELI

Esta **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO** foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Mecânica” e aprovado em sua forma final pelo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 25/05/2018

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Fabio Kenji Suguimoto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Henrique Cotait Razuk
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte incondicional que me demonstraram ao longo dos anos e por tudo que fizeram para que eu possa estar aqui agora. Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Lourenço, por todo conhecimento e conselhos compartilhados. A Ana Paula Mourão Gregghi pela motivação, carinho e suporte sempre que necessário. E aos meus colegas da Equipe Rocket, que me fazem acreditar que o céu não é o limite.

RESUMO

TENERELI, Keveen. ESTUDO NUMÉRICO DE UM BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE EM MOTOR-FOGUETE. 59 f. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Bocais Convergente-Divergente são partes essenciais de sistemas de propulsão de foguetes, muito tem sido desenvolvido para o estudo desses bocais, no entanto esses estudos são focados em sistemas de grande porte. Esse trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um estudo numérico desses bocais. Foi desenvolvido e validado um caso de escoamento utilizando da aplicação OpenFOAM, em seguida utilizando esse caso, um bocal de pequeno porte e diversas variações de sua geometria são avaliadas.

Palavras-chave: bocal convergente-divergente, deLaval, motor-foguete, CFD, OpenFOAM

ABSTRACT

TENERELI, Keveen. . 59 f. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Convergent-Divergent nozzles are essential parts in rocket propulsion systems, a lot has been developed over the study of these nozzles, however, those studies are focused on large systems. The goal of this study was the development of a numeric study of these nozzles. A flow case was developed and validated using the OpenFOAM application, next, using this case, a small nozzle and various geometry changes were evaluated.

Keywords: convergent-divergent nozzle, deLaval, rocket-motor, CFD, OpenFOAM

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Turbina de Laval	12
FIGURA 2	– Formatos de Bocal	14
FIGURA 3	– Gráfico de Bocal Convergente-Divergente	20
FIGURA 4	– Relação de Pressões no Bocal	21
FIGURA 5	– Bocais Sob-Expandidos, Perfeitamente Expandidos e Super-Expandidos	23
FIGURA 6	– Estrutura OpenFoam	24
FIGURA 7	– Estrutura de Caso no OpenFOAM	25
FIGURA 8	– Geometria Bocal de Validação	26
FIGURA 9	– Exemplo de Wedge	26
FIGURA 10	– Geometria e Malha do Bocal	27
FIGURA 11	– Pressão Caso 0.89	29
FIGURA 12	– Número de Mach Caso 0.89	29
FIGURA 13	– Comparação Analítica da Pressão Caso 0.89	30
FIGURA 14	– Comparação Analítica do Número de Mach Caso 0.89	30
FIGURA 15	– Pressão Caso 0.75	31
FIGURA 16	– Número de Mach Caso 0.75	31
FIGURA 17	– Comparação Analítica da Pressão Caso 0.75	32
FIGURA 18	– Comparação Analítica do Número de Mach Caso 0.75	32
FIGURA 19	– Pressão Caso 0.16	33
FIGURA 20	– Número de Mach Caso 0.16	33
FIGURA 21	– Comparação Analítica da Pressão Caso 0.16	34
FIGURA 22	– Comparação Analítica do Número de Mach Caso 0.16	34
FIGURA 23	– Tabela de Calores Específicos	36
FIGURA 24	– Bocal Equipe Rocket	37
FIGURA 25	– Malha Bocal Equipe Rocket	37
FIGURA 26	– Pressão no Bocal	39
FIGURA 27	– Número de Mach no Bocal	39
FIGURA 28	– Pressão no Bocal sem Raio	40
FIGURA 29	– Número de Mach no Bocal sem Raio	41
FIGURA 30	– Pressão no Bocal de Raio 10mm	41
FIGURA 31	– Número de Mach no Bocal de Raio 10mm	42
FIGURA 32	– Pressão no Bocal de Divergência 10°	43
FIGURA 33	– Número de Mach no Bocal de Divergência 10°	43
FIGURA 34	– Pressão no Bocal de Divergência 20°	44
FIGURA 35	– Número de Mach no Bocal de Divergência 20°	44
FIGURA 36	– Pressão no Bocal de Convergência 25°	45
FIGURA 37	– Número de Mach no Bocal de Convergência 25°	46
FIGURA 38	– Pressão no Bocal de Convergência 35°	46
FIGURA 39	– Número de Mach no Bocal de Convergência 35°	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Condições de Escoamento	25
--	----

LISTA DE SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CAD	Computer Aided Design
NASA	National Aeronautics and Space Administration

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volume
p	Pressão
τ	Compressibilidade
v	Volume Específico
ρ	Densidade
m	Massa
R	Constante do Gás
T	Temperatura
R_u	Constante Universal dos Gases
M	Massa Molar
u	Velocidade
A	Área
F_B	Forças no Corpo
F_S	Forças na Superfície
R	Força de Pressão Distribuída
c	Velocidade do Som Local
Ma	Número de Mach
k	Calor Específico
C_p	Calor Específico sob Pressão Constante
C_v	Calor Específico sob Volume Constante
P_c	Pressão na Câmara de Combustão
P_b	Pressão Ambiente

SUMÁRIO

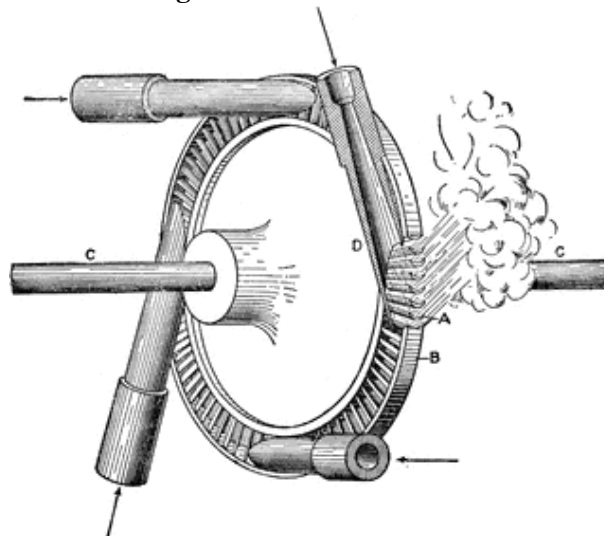
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS GERAIS	14
1.2.1 Objetivos Específicos	14
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.1 Considerações Iniciais	15
2.1.2 Equacionamento	17
2.1.3 RELAÇÕES DE PRESSÃO	21
2.2 OPENFOAM	23
2.3 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE CASO	25
2.3.1 Condições Iniciais e de Contorno	27
2.3.2 Propriedades Termofísicas	28
2.3.3 Simulação e Resultados	28
2.4 SIMULAÇÃO DE BOCAL DE PEQUENO PORTE	35
2.4.1 Gás do Escoamento	35
2.4.2 Geometria do Bocal	37
2.4.3 Condições de Contorno	38
2.5 RESULTADOS	38
2.5.1 Variações no Raio	40
2.5.2 Variação de Ângulo de Divergência	42
2.5.3 Variações no Ângulo de Convergência	45
3 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49
Anexo A – ALGORITMO PARA GEOMETRIA DO BOCAL DA NASA	50
Anexo B – BOUNDARY	51
Anexo C – THERMOPHYSICALPROPERTIES	52
Anexo D – P	53
Anexo E – T	54
Anexo F – U	55
Anexo G – MA	56
Anexo H – CONTROLDICT	57
Anexo I – FVSCHMES	58
Anexo J – FVSOLUTION	59

1 INTRODUÇÃO

Bocais são dispositivos importantes dentro da mecânica dos fluidos, caracterizados pela sua geometria, eles consistem em uma passagem de escoamento de área de seção transversal variável que causa um aumento da velocidade do fluido na direção do escoamento e conseqüentemente uma redução de sua pressão (MORAN, 2006). Isso é obtido com uma convergência do duto, onde a área da entrada é maior que a saída. Em contrapartida existem também os difusores, que causam uma redução da velocidade na direção do escoamento através de uma divergência do duto (MORAN, 2006).

Outro tipo de bocal foi desenvolvido pelo inventor Gustaf de Laval em 1889, em seu projeto de uma turbina a vapor de impulsão, turbina onde o acionamento ocorre através de um ou mais jatos livres de alta velocidade (FOX; MCDONALD, 1998). De Laval fez uso de bocais específicos com o intuito de aumentar a velocidade da corrente de vapor que movimentava o equipamento (STEVENS; HOBART, 1906). Com o uso desse bocal a roda da turbina alcançou 30000 rpm, rotações até então inalcançadas (ANDERSON, 1990).

Figura 1: Turbina de Laval



**Fonte: Derr, Louis Cyclopedia of Engineering (Chicago, IL: American Technical Society, 1911);
Copyright © 2004–2018 Florida Center for Instructional Technology.**

O bocal de Laval era um bocal Convergente-Divergente, como o próprio nome já diz,

ele possuía uma seção convergente (bocal subsônico) seguida por uma seção divergente (bocal supersônico) com uma garganta possuindo número de Mach igual a 1. Dessa maneira esse tipo de bocal, desde que exista uma diferença de pressão entre a entrada e a saída, é capaz de criar um escoamento supersônico a partir de um escoamento subsônico (FOX; MCDONALD, 1998).

Bocais desse tipo encontraram seu uso além de turbinas sendo utilizados em veículos de propulsão a jato, foguetes e túneis de vento supersônicos (FOX; MCDONALD, 1998). No caso de foguetes, o bocal C-D ou tubeira como é às vezes chamado, tem como objetivo a conversão da energia gerada com a combustão do propelente em energia cinética, gerando então empuxo para o veículo (ELLIS, 1975), podemos observar assim uma relação direta entre a velocidade de exaustão e vazão mássica do bocal e o empuxo então criado (SUTTON, 2001).

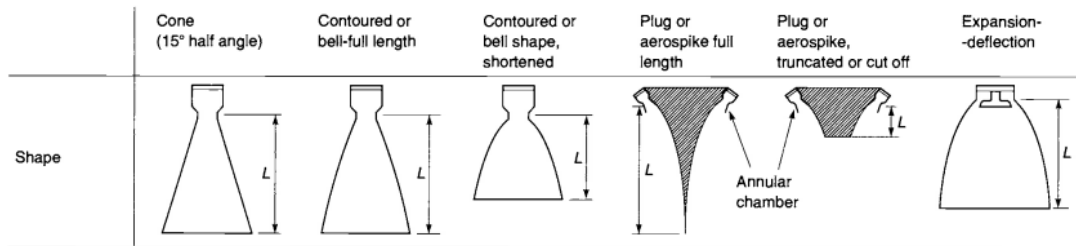
A análise de bocais em motores foguetes é de extrema importância para o projeto dos mesmos devido ao papel que cumpre no sistema de propulsão. No entanto, os testes de motores para a análise de escoamento em tubeiras e a fabricação das mesmas possui, muitas vezes, custos proibitivos ou então apresentam logísticas que dificultam o processo.

O desenvolvimento dos métodos numéricos em específico o CFD permite a análise e a solução de problemas em engenharia (MALISKA, 2010). Com isso, tem-se uma economia de tempo e de recursos na análise de um dispositivo como o bocal convergente-divergente, possibilitando assim um estudo mais aprofundado dos fenômenos que regem seu funcionamento, assim como dos parâmetros associados à sua otimização.

1.1 MOTIVAÇÃO

Diversos estudos numéricos foram realizados em bocais convergente-divergente quando aplicados à propulsão de motores foguetes (ALLMAN; HOFFMAN, 1981), (LAKSHMI K. S.; VENKATESH, 2016), com o objetivo de analisar e otimizar esses equipamentos. Tais trabalhos são normalmente focados em sistemas de propulsão de grande porte onde o bocal utilizado costuma ser o de forma de sino, bocal mais comum atualmente em uso (SUTTON, 2001).

No entanto, devido a simplicidade e facilidade de fabricação o formato usado em muitos bocais pequenos é o formato cônico (SUTTON, 2001). Esses diferentes formatos podem ser observados na Figura 2, o primeiro da esquerda para a direita é o cônico, o segundo o formato de sino.

Figura 2: Formatos de Bocal

Fonte: George P. Sutton e Oscar Biblarz

Uma consideração comum nos trabalhos é de que o escoamento no bocal de um gás puro, deve ser aplicada com ressalvas em sistemas de pequeno porte. Foi observado que, embora as perdas de eficiência pela presença de partículas sólidas ou líquidas (dependendo do sistema propulsivo) em motores com empuxos em ordens de magnitude maiores que 10^4 libras são baixas, no caso de motores com empuxo na ordem de magnitude de aproximadamente 10^2 libras, as perdas são significativas (NAKKA, 1984), assim, se faz necessário simulações e estudos próprios para bocais em sistemas de pequeno porte afim de obter resultados próximos a operação dos mesmos.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo a análise do escoamento supersônico em um bocal C-D de pequeno porte (conforme a geometria do foguete desenvolvido pela Equipe Rocket de foguetemodelismo da UTFPR - Campus Cornélio Procopio). Esse será realizado a partir da comparação entre os resultados determinados neste estudo com aqueles obtidos experimental e numericamente da literatura, a fim de buscar uma melhor compreensão do fenômeno físico e de uma otimização do bocal em foguetes deste porte.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um método de análise numérica de bocais convergente-divergente.
- Validar métodos com dados analíticos e experimentais.
- Avaliar efeitos da geometria no escoamento de um bocal de pequeno porte.
- Avaliar critérios de otimização de bocais de motor foguete.

2 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 2.1 consiste na fundamentação teórica sobre o funcionamento de um bocal convergente-divergente e as equações que descrevem seu escoamento. A Seção 2.2 introduz o OpenFOAM, aplicação utilizada para as simulações desenvolvidas nesse trabalho. Na Seção 2.3 é discutido a estrutura do caso do OpenFOAM para a simulação de bocais e a validação do mesmo. A Seção 2.4 consiste na apresentação do bocal de pequeno porte a ser analisado e as suas características. Por fim, a Seção 2.5 trata das simulações de variação da geometria do bocal do pequeno porte e os resultados obtidos das mesmas.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como já mencionado, o bocal convergente-divergente é um dispositivo que permite, através da variação da sua geometria, acelerar um fluido à velocidades supersônicas. Neste capítulo serão discutidos os fenômenos físicos presentes nesse escoamento, assim como as hipóteses e equações que os caracterizam e permitem a análise do problema proposto neste trabalho.

Deve ser observado que as hipóteses e equações apresentadas descrevem o funcionamento teórico de um bocal ideal, entretanto, mesmo sendo uma simplificação, essas equações se demonstram adequadas para a análise e projeto de bocais, é observado que a performance medida em sistemas de propulsão química em foguetes é entre 1 e 6 % menor que os valores ideais calculados (SUTTON, 2001). As hipóteses assumidas sobre esse escoamento ideal são:

- Quase-Unidimensional.
- Compressível.
- Gás Ideal.
- Isoentrópico.

- Regime Permanente.

O escoamento unidimensional é de fácil compreensão, é definido como o escoamento onde todas suas propriedades são definidas em função de apenas uma dimensão espacial (ANDERSON, 1990), assim o escoamento unidimensional em x irá assumir estritamente que a área do fluxo é constante. Para a análise de um bocal é assumido então um escoamento quase-unidimensional, ou seja, um escoamento unidimensional onde é possível a variação da área ao longo de x (ANDERSON, 1990). Nesse tipo de escoamento as propriedades do fluido serão dadas em função de x . É assumido assim que as propriedades do escoamento são uniformes em qualquer seção normal ao eixo do bocal.

O escoamento compressível costuma ser rotineiramente definido como um escoamento de densidade variável, em contraste ao escoamento incompressível onde a densidade é assumida constante (ANDERSON, 1990). Em um determinado volume de fluido pequeno V onde p é a pressão exercida sobre o elemento pelo fluido da vizinhança, a compressibilidade τ pode ser definida como:

$$\tau = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1)$$

Assim, fisicamente, a compressibilidade é a mudança fracionária do volume do elemento do fluido pela mudança de pressão. Se for assumido que o fluido possui massa unitária, v representa o volume por unidade de massa, ou seja, o volume específico, assim a compressibilidade pode ser expressa em função da densidade ρ .

$$\tau = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (2)$$

Pode-se observar então que mudanças de pressão serão acompanhadas de mudanças na densidade do fluido. Para velocidades de escoamento menores que 0.3 da velocidade do som as mudanças de pressão dp serão pequenas, resultando assim também em uma pequena variação de densidade, esses escoamentos de baixa velocidade são então assumidos incompressíveis. (ANDERSON, 1990). No entanto, devido a natureza do bocal Convergente-Divergente, as velocidades superam em muito essa faixa de velocidade em partes do bocal, dessa maneira o escoamento deve necessariamente ser considerado como compressível.

Em sistemas de propulsão real, devido a características do propelente e da combustão o produto não é completamente homogêneo, com partículas sólidas ou líquidas presentes no escoamento, para fim de análise é adotado que o produto é um gás homogêneo e que além disso

esse gás obedece a relação dos gases ideais.

$$pV = mRT \quad (3)$$

Onde m é a massa do sistema, R é a constante do gás e T é a temperatura absoluta. Essa constante é diferente para cada gás e seu valor é obtido através da seguinte equação, onde R_u é a constante universal dos gases com valor de $8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ e M é a massa molar do gás.

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (4)$$

Sob baixas pressões e altas temperaturas, o gás se comporta como um gás ideal devido a redução de sua densidade (CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, 2007). Dessa maneira, devido as altas temperaturas das câmaras de combustão de motores foguete, os gases se aproximam muito dos gases ideais (SUTTON, 2001).

O escoamento no bocal também será considerado isoentrópico, como o próprio nome sugere esse é um escoamento em que a entropia permanece constante, sendo resultado da simplificação de que não ocorre transferência de calor no escoamento (adiabático) e que os efeitos do atrito podem ser desprezados (FOX; MCDONALD, 1998). Outra consideração sobre o escoamento isoentrópico é que para isso ele também será considerado invíscido, ou seja, os efeitos da viscosidade, condução térmica e difusão de massa serão ignorados na análise e simulações (ANDERSON, 1990).

A hipótese final é de que o escoamento é permanente, ou seja, as variáveis do fluido são constantes em relação ao tempo em todos os pontos do escoamento (CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, 2007). Nesse regime as fases de ignição, onde o escoamento se inicia no bocal e a fase onde a combustão termina serão ignorados, o foco da análise será então nas propriedades do escoamento quando o motor estiver em plena operação.

2.1.2 EQUACIONAMENTO

A partir das hipóteses levantadas previamente é possível aplicar as equações para análise do escoamento. Adotando um volume de controle sobre o bocal, pode-se aplicar a equação da continuidade em sua forma integral, com u sendo a velocidade na direção x e A sua área.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{u} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (5)$$

Devido a hipótese de que o escoamento possui regime permanente o termo da derivada parcial em função do tempo é igual a zero, o resultado seria.

$$\rho u A = \text{constante} \quad (6)$$

Da mesma forma é aplicada a equação da quantidade de movimento ao volume de controle, com F_B representando as forças no corpo e F_S a força de superfície devido às forças de pressão na superfície e a força de pressão distribuída ao longo das paredes do bocal (FOX; MCDONALD, 1998).

$$F_S + F_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} u \rho dV + \int_{SC} u \rho \vec{u} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (7)$$

Com R representando essa força de pressão distribuída nas paredes e sendo as forças no corpo igual a zero, o resultado da aplicação da equação da quantidade de movimento para um regime estacionário será:

$$R + p_1 A_1 - p_2 A_2 = \dot{m} u_1 - \dot{m} u_2 \quad (8)$$

Com o intuito de melhor analisar a variação das propriedades em função da área é interessante trabalhar com a forma diferencial desses resultados, o resultado da análise da continuidade pode ser escrita em sua forma diferencial, dividindo por $\rho u A$, na seguinte forma.

$$\frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial u}{u} + \frac{\partial A}{A} = 0 \quad (9)$$

Enquanto que a forma diferencial do resultado da equação da quantidade de movimento é a equação conhecida como equação de Euler (ANDERSON, 1990), que possui a seguinte forma.

$$dp = -\rho u du \quad (10)$$

Como o escoamento é isoentrópico, quaisquer mudanças na pressão é acompanhada por uma mudança isoentrópica na densidade (ANDERSON, 1990), essa relação pode ser expressa com c , definido como a velocidade local do som.

$$\frac{dp}{d\rho} = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_s = c^2 \quad (11)$$

Combinando as equações (9), (10) e (11) é obtido a seguinte equação, que correlaciona a velocidade e número de Mach Ma do escoamento em termos da variação da área de seção do bocal.

$$\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{du}{u} \quad (12)$$

Essa equação permite explicar o funcionamento do bocal convergente-divergente, para regimes subsônicos ($Ma < 1$) $\frac{dA}{A}$ e $\frac{du}{u}$ terão sinais opostos, logo, um aumento da área causaria uma redução na velocidade do escoamento. No caso supersônico ($Ma > 1$), os sinais de $\frac{dA}{A}$ e $\frac{du}{u}$ seriam iguais, assim um aumento na área causaria também um aumento na velocidade do escoamento. Já para $Ma = 1$, $\frac{dA}{A}$ seria igual a zero, seria então necessário uma área mínima ou máxima para alcançar a condição, fisicamente a área mínima é a única possibilidade (ANDERSON, 1990).

Esses resultados demonstram que para aumentar a velocidade de um fluido em escoamento de um regime subsônico para um supersônico, é necessário primeiramente reduzir a área até uma área mínima, a garganta, onde $Ma = 1$, e então aumentar a área afim de acelerar o fluido agora supersônico. Esse processo descreve o funcionamento e geometria de um bocal de Laval.

No caso de escoamentos compressíveis é conveniente realizar análises a partir das propriedades de estagnação (CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, 2007) que representam as propriedades quando o fluido é levado ao repouso de forma adiabática. Para o escoamento isentrópico em um gás ideal essas propriedades, com subscrito 0, podem ser dadas em função da razão de calor específico k e o número de Mach.

$$\frac{T}{T_0} = 1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \quad (13)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (14)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) Ma^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (15)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (16)$$

Na equação (16) C_p é o calor específico sob pressão constante enquanto C_v é o calor

específico sob volume constante. As propriedades críticas, quando M é igual a 1 podem ser dadas pelas mesmas equações por substituição simples, a equação da continuidade para o bocal pode ser dada então da seguinte maneira (FOX; MCDONALD, 1998).

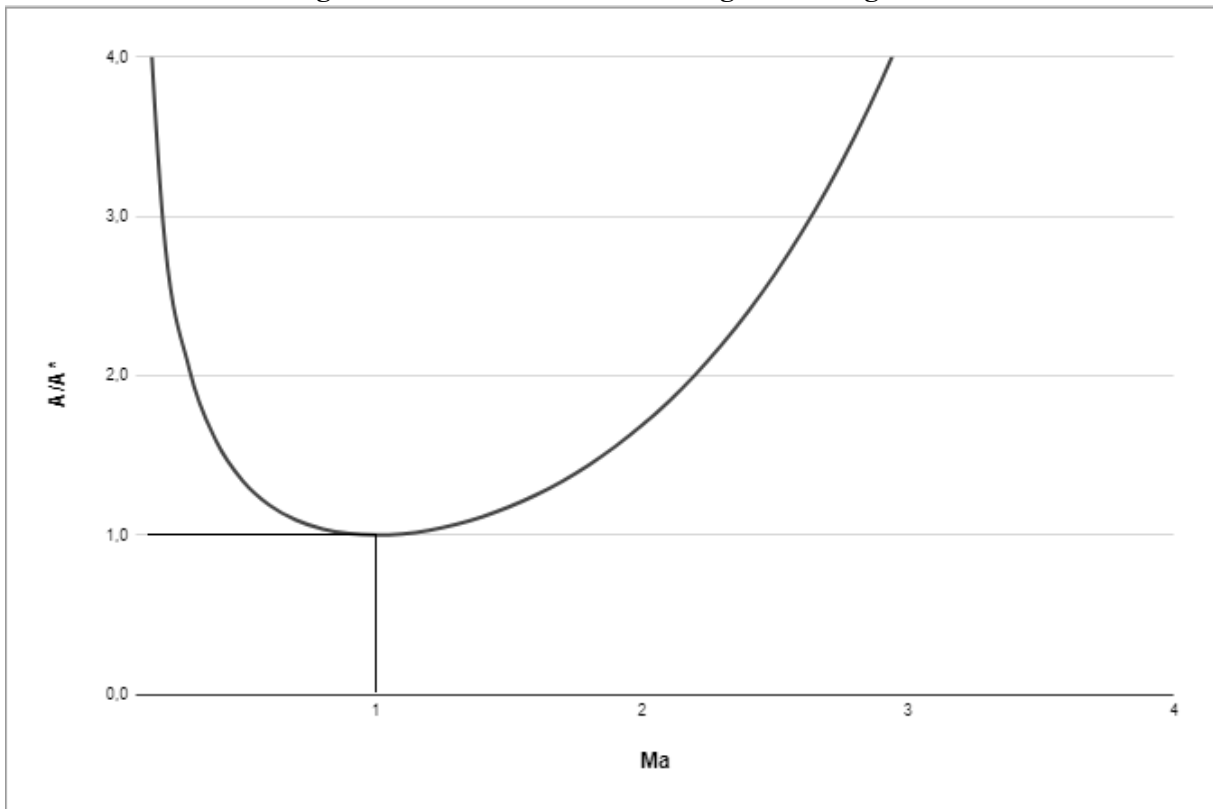
$$\rho Au = constante = \rho * A * u* \quad (17)$$

Onde os asteriscos (*) denotam as propriedades críticas. Essas equações são então utilizadas para criar uma que relaciona uma área qualquer no bocal e a sua área crítica.

$$\frac{A}{A*} = \frac{1}{Ma} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} Ma^2}{\frac{k-1}{2} Ma^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (18)$$

Resolvendo essa equação para o ar, $k = 1,4$, e criando um gráfico da relação de áreas com o número de Mach Ma , pode-se confirmar o fenômeno descrito onde a garganta alcança um Mach unitário, valor necessário para acelerar o escoamento para velocidades supersônicas. Essas relações podem ser observadas na Figura 3, com a razão entre a área e a área crítica no eixo y e o número de Mach no eixo x.

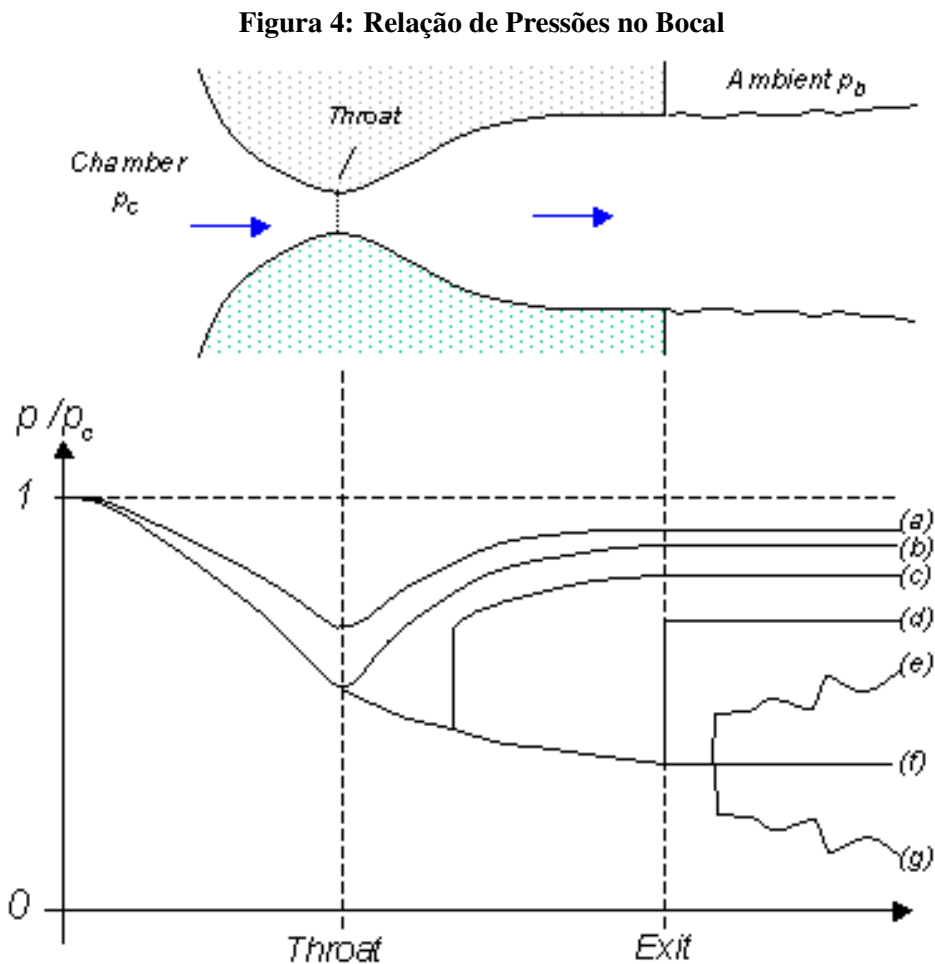
Figura 3: Gráfico de Bocal Convergente-Divergente



Fonte: Autoria própria

2.1.3 RELAÇÕES DE PRESSÃO

A relação entre as pressões na câmara de combustão e na saída do bocal vão ditar muito sobre seu desempenho ou sequer se o mesmo irá funcionar. Por exemplo se não houver uma pressão maior em sua entrada o escoamento simplesmente não ocorrerá.



Fonte: William J. Devenport

A Figura 4 mostra as relações de pressão possíveis em um bocal, p_c é a pressão na câmara de combustão, p_b é a pressão ambiente. A Figura 4 mostra então diferentes relações de pressão no decorrer do bocal, onde "Throat" é a garganta e "Exit" é a saída do bocal.

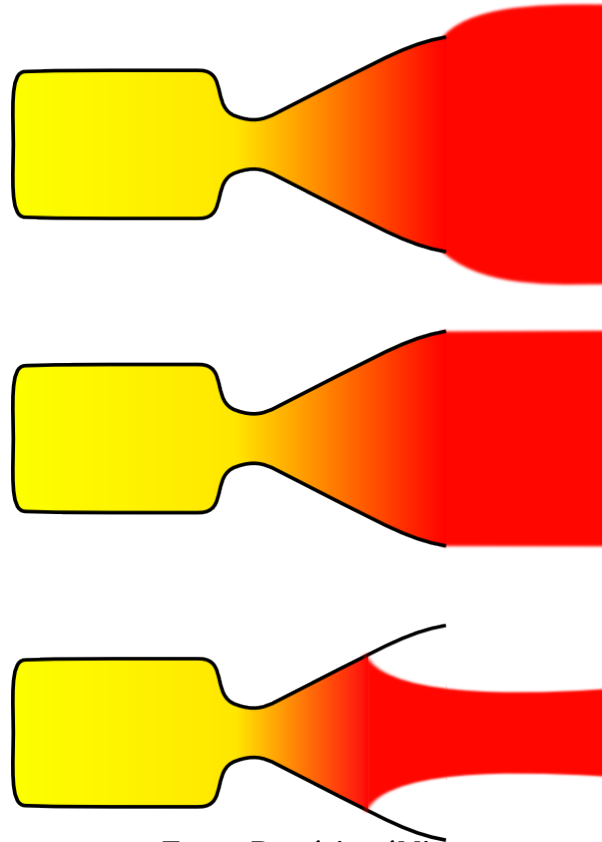
- (a). Escoamento Subsônico.
- (b). Escoamento pouco Estrangulado.
- (c). Choque no Bocal.
- (d). Choque na Saída.

- (e). Super-Expandido.
- (f). Expansão Ótima.
- (g). Sob-Expandido.

Ondas de choque são descontinuidades irreversíveis que podem ocorrer no escoamento supersônico real causando variações bruscas nas propriedades dos fluidos (FOX; MCDONALD, 1998). Quando essas ondas de choque ocorrem no plano normal em relação ao escoamento elas são chamadas de choques normais (CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, 2007). No caso de ondas de choques inclinadas as mesmas recebem o nome de choques oblíquos, podendo ser curvos e retos e assim como as ondas de choque normais causam a redução do número de Mach do escoamento. Outro tipo de onda que pode ser formada é a onda de expansão, oposto da onda de choque, com o escoamento supersônico se afastando de si mesmo (ANDERSON, 1990). A onda de expansão resulta em uma região de expansão contínua chamada leque de expansão composta por um número infinito de ondas de Mach chamadas ondas de expansão de Prandtl-Meyer (CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, 2007).

O bocal pode ser então classificado quanto a relação entre a pressão de exaustão e a pressão atmosférica do seu local de operação. Caso o bocal tiver uma pressão de saída maior que a pressão atmosférica ele é chamado de sob-expandido, o escoamento será normal, no entanto, serão formadas ondas de expansão na saída, com a expansão do gás dentro do bocal sendo incompleta, resultando em uma menor performance (SUTTON, 2001). Um bocal super-expandido é o oposto, com uma pressão menor de exaustão quando comparada com a pressão atmosférica, implicando em um diâmetro da saída do bocal maior que o diâmetro do escoamento fluido, essa separação causa uma descontinuidade reduzindo o empuxo obtido, neste tipo de condição de pressão são formadas ondas de choque fora do bocal (SUTTON, 2001). O terceiro caso é de expansão ótima onde as pressões são iguais, considerado como o ponto de projeto ideal (ALLMAN; HOFFMAN, 1981). Os três casos e seus escoamentos característicos podem ser observados na Figura 5 a seguir.

Figura 5: Bocais Sob-Expandidos, Perfeitamente Expandidos e Super-Expandidos



Fonte: Domínio público

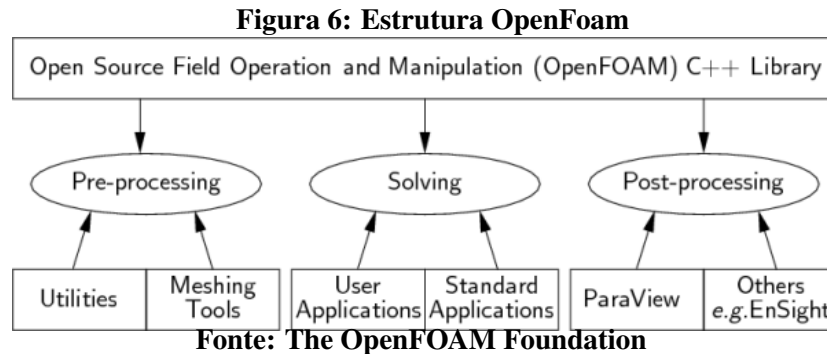
Os bocais são então projetados para expansão ótima ou um pouco sub-expandida, no entanto é encontrada certa complexidade devido a variação da pressão atmosférica com a altitude de voo do veículo. Pode-se observar então que o impacto da geometria do bocal, é extremamente significativo no desempenho de um motor foguete demonstrando assim a importância de seu projeto no desenvolvimento de sistemas de propulsão.

2.2 OPENFOAM

As simulações desenvolvidas nesse trabalho foram realizadas pelo software OpenFOAM uma aplicação de CFD de código aberto criada por Henry Weller em 1989 sobre o nome de FOAM e liberado como software livre em 2004 onde desde então vem sendo desenvolvida por um time de contribuintes.

O software OpenFOAM é na verdade um conjunto de duzentas e cinquenta aplicações e mais de cem bibliotecas, suas funcionalidades são divididas em pré-processamento, que envolve a geração de geometrias e malhas através de diversos aplicativos (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017). Na Figura 6 é possível observar a estrutura básica do OpenFOAM,

suas aplicações são divididas em três categorias distintas, pré-processamento, solução e pós-processamento, com cada categoria consistindo de certas aplicações e ferramentas.



O setup do caso é feito de acordo com a aplicação usada e envolve as condições de contorno, condições de tempo e os esquemas numéricos a serem utilizados. Embora o OpenFOAM apresente recursos para gerar geometrias e malhas foi utilizado uma outra ferramenta para essas operações nesse trabalho, o Gmsh, um gerador de malhas de elementos finitos que também possui recursos de CAD e processamento. A malha e geometrias geradas foram então importadas para o OpenFoam através da aplicação gmshToFoam do mesmo.

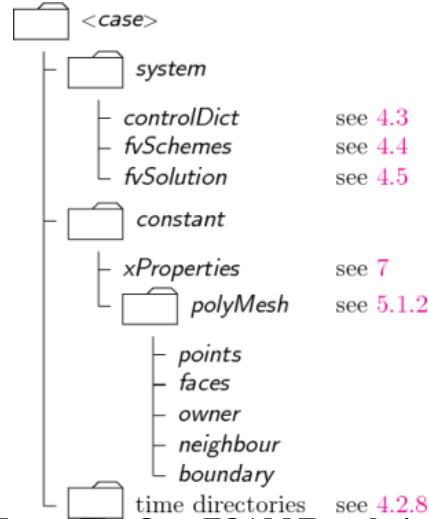
O OpenFOAM v. 5.0 usado no trabalho possui diversas aplicações para escoamentos compressíveis chamados de solvers, que como o próprio nome sugere, tem como objetivo a solução de algum problema de mecânica dos fluidos, são eles: rhoCentralFoam, rhoCentralDyM-Foam, rhoPimpleFoam, rhoSimpleFoam, rhoPorousSimpleFoam, sonicFoam, sonicDyMFoam e sonicLiquidFoam. Cada um desses solvers possui determinadas características e tem como foco diferentes tipos de escoamentos compressíveis, para a decisão de qual solver utilizar foram determinados alguns critérios de acordo com o problema proposto, ou seja, um escoamento laminar de um gás com regime subsônico, transônico e supersônico, representando respectivamente as regiões do bocal de convergência, estrangulamento e divergência.

Das aplicações disponíveis apenas duas se encaixam nesses critérios, são elas rhoCentralFoam e rhoCentralDyMFoam, ambos caracterizados por serem solvers baseados na densidade, com o DyM na segunda aplicação sendo uma sigla para Dynamic Mesh, a principal diferença entre esses dois solvers. Como não há necessidade real de uma malha dinâmica o solver usado nesse trabalho é o rhoCentralFoam.

O rhoCentralFoam resolve cada uma das equações do escoamento compressível separadamente, começando pela equação da continuidade, e em seguida pela equação da conservação do movimento sem a viscosidade, depois de calculado é então adicionado a parte viscosa do escoamento (WINTER, 2013).

Cada caso do OpenFOAM é estruturado de maneira similar, a pasta irá conter três sub-pastas, uma chamada 0, onde as propriedades do escoamento serão determinados, para o rhoCentralFoam os arquivos presentes na pasta 0 são de pressão, temperatura e velocidade, uma chamada constant, onde as propriedades termofísicas e geométricas estão localizadas e uma chamada system, onde os controles de tempo e convergência são determinados.

Figura 7: Estrutura de Caso no OpenFOAM



Fonte: The OpenFOAM Foundation

2.3 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE CASO

Para que os resultados a serem desenvolvidos nesse trabalho sejam aceitáveis é necessário validar a estrutura de caso montada no OpenFOAM. A NASA em seu site, dispõe de um caso geral de bocal convergente-divergente com resultados analíticos, com o propósito explícito de validar códigos de CFD através da comparação com os dados analíticos fornecidos.

Esse caso é composto de três escoamentos diferentes onde a pressão de entrada no bocal é fixa e a pressão de saída é variada, as outras condições propostas podem ser vistas na Tabela 1.

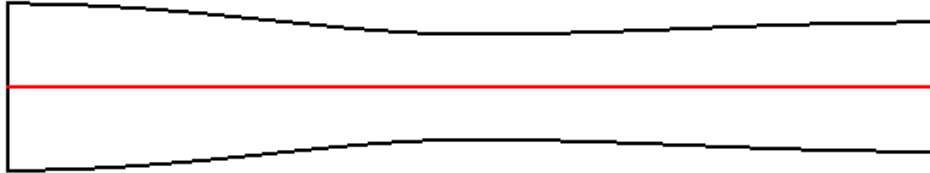
Tabela 1: Condições de Escoamento.

Pressão Total (psi)	1,0
Temperatura Total (R)	100
	0,89
Pressão Estática na Saída	0,75
	0,16

Fonte: NPARC Alliance CFD Verification and Validation Archive.

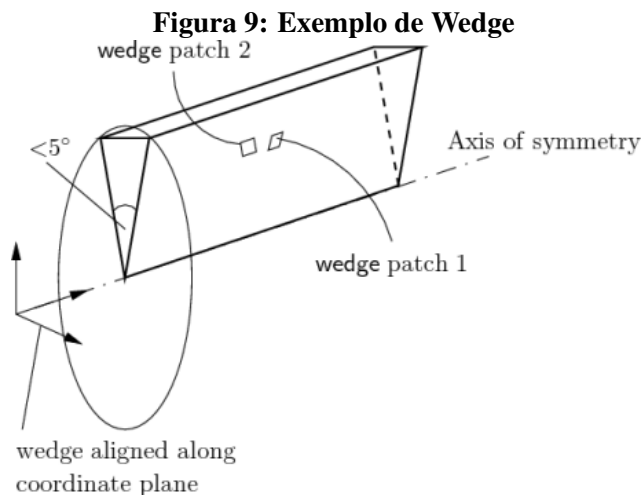
A geometria desse bocal é gerado com um pequeno algoritmo fornecido pela NASA, Anexo A, que cria valores para a área de acordo com a distância x no bocal. O bocal vai ter um comprimento total de 10 polegadas, com a área variando durante sua distância.

Figura 8: Geometria Bocal de Validação



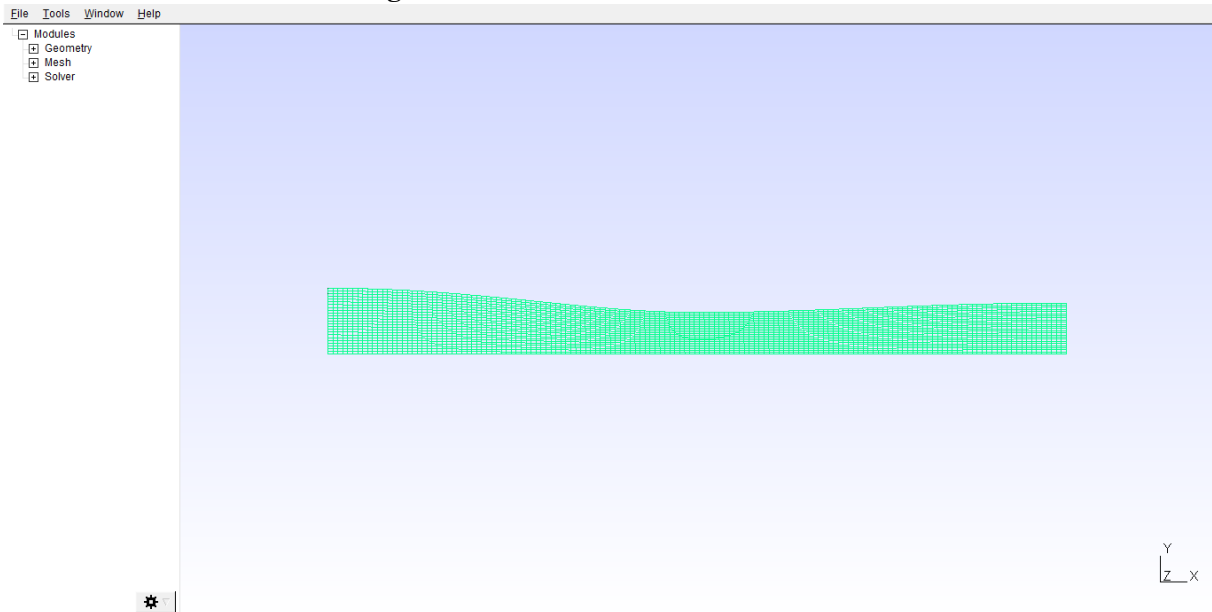
Fonte: NPARC Alliance CFD Verification and Validation Archive.

A geometria criada para esse caso foi de "wedge" ou cunha, uma seção de cilindro em vez do cilindro todo, afim de aliviar as exigências computacionais, a geometria também foi feita para que o escoamento seja realizado com uma simetria ao eixo.



Fonte: The OpenFOAM Foundation

Como já mencionado essa geometria foi feita no software gmsh assim como sua malha, a malha estrutura resultante possuem 3576 células no total. E a distância angular das duas faces desse cilindro possuem 1° . Essa distância angular possui uma única célula de largura, como requerido pela condição de fronteira do OpenFOAM. A geometria possui seis regiões que vão ser compreendidas como contorno pelo OpenFOAM, são elas as duas faces do wedge, a entrada do bocal, a saída, e a parede do bocal.

Figura 10: Geometria e Malha do Bocal

Fonte: Autoria própria

Na figura é possível observar a interface do programa e a geometria e malha do bocal. Mesmo buscando uma simulação unidimensional ou bidimensional o OpenFOAM trabalha exclusivamente com casos tridimensionais, assim a a distância de uma única célula faz com que o programa compreenda que aquela dimensão não deverá ser considerada para fins de simulação do escoamento.

2.3.1 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Na pasta constant, o OpenFOAM possui um arquivo chamado boundary, onde as condições de contorno básicas devem ser descritas, essas condições foram definidas a partir das regiões geradas pelo gmsh. Dessa maneira as duas faces do cilindro foram definidas com o tipo "wedge", a parede do bocal foi definida com o tipo "wall", em português, parede, enquanto a entrada e a saída do bocal ficaram com o tipo "patch", um tipo geral, indicado para regiões como essas.

Para as condições de pressão foi usada a função "TotalPressure" para a entrada do bocal, essa condição é ideal para locais onde se sabe a pressão mas não a velocidade, como no caso dos bocais convergente-divergente. Em todos os três escoamentos foi utilizado aqui um valor de 10000 Pa. Foi decidido também que o fluido de trabalho seria o ar, definindo assim então a razão de calor específicos k como 1,4.

Na parede do bocal a condição usada foi "ZeroGradient", essa condição extrapola um valor para o contorno a partir da célula mais próxima. Para a saída do bocal foi então aplicado a condição "waveTransmissive" essa condição garante que não serão refletidas ondas de volta para o bocal e determina a pressão externa do caso, para os escoamentos simulados essas pressões serão 8900 Pa, 7500 Pa e 1600 Pa, garantindo assim a razão de pressões propostas de 0,89, 0,75 e 0,16.

No caso da temperatura, a entrada do bocal possui a condição "fixedValue" estabelecendo um valor fixo de 298 Kelvin, representando assim a câmara de combustão do sistema. As condições da parede e da saída do bocal são "zeroGradient" permitindo assim que a própria simulação encontre os valores para essas regiões a partir dos valores determinados.

Já no caso da velocidade, o campo inserido foi de (0 0 0), não será inserida nenhuma velocidade no sistema, as condições aplicadas na entrada e saída foi a de "zeroGradient", na parede é usada a condição "Slip" já que a camada limite na parede não é de interesse nessa análise.

2.3.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Devem ser determinados valores também para o arquivo thermophysicalProperties, que como o próprio nome sugere, detalham as propriedades termofísicas do fluido. Nesse arquivo foi escolhido o determinado uma mistura pura com a condição "pureMixture" assim como foi determinado que o gás obedece a relação dos gases ideais com "perfectGas", os seguintes valores inseridos nesse arquivo se referem as propriedades do ar na temperatura estabelecida de 298 K, é utilizado um mol de gás com peso molar de 29 g/mol e um calor específico a pressão constante de 1005 J/kg·K. A viscosidade foi colocada como zero para simular um escoamento invíscido.

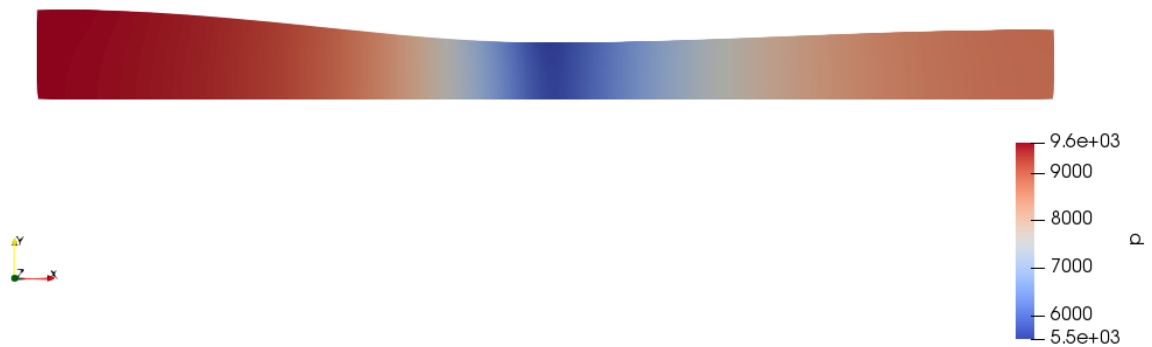
2.3.3 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

O tempo de simulação inserido foi de 1e-01 segundos, com passos de tempo de 1e-10 segundos, escrevendo um resultado a cada 1e-04 segundos, além disso o número de Courant máximo foi definido como 0.4. O número de Courant, ou condição de Courant-Friedrich-Lewy é uma restrição numérica que determina o passo de tempo permitido para um tamanho de malha específica (WINTER, 2013). Primeiro a malha é importada para o OpenFOAM com a aplicação gmshToFoam, em seguida o caso é simulado usando o solver rhoCentralFoam, ao final dela foi usado a aplicação MachNo do OpenFOAM, que realiza o cálculo do número de Mach para todo

o escoamento.

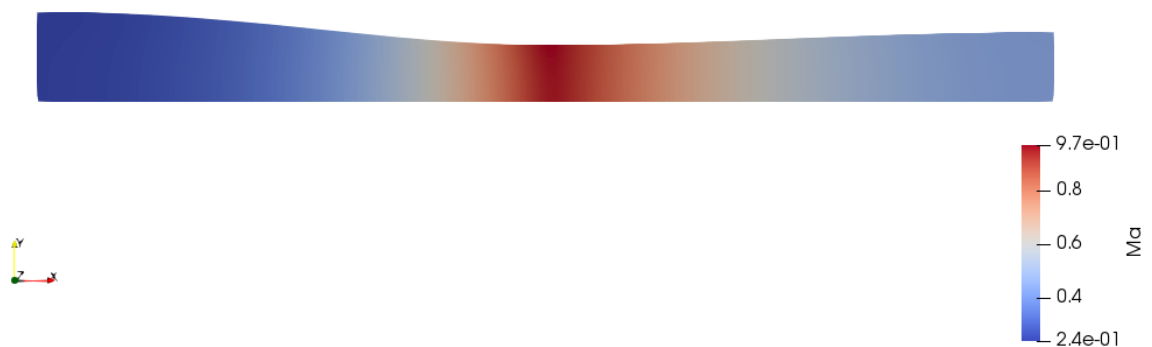
Nos anexos do presente trabalho estão contidos os arquivos das condições de contorno e controle discutidas até aqui. Os resultados das simulações são processados com o programa ParaView, uma aplicação open-source para análise e visualização de dados que já vem embutida no OpenFOAM e pode ser acessada ao final da simulação com o comando ParaFoam.

Figura 11: Pressão Caso 0.89



Fonte: Autoria própria

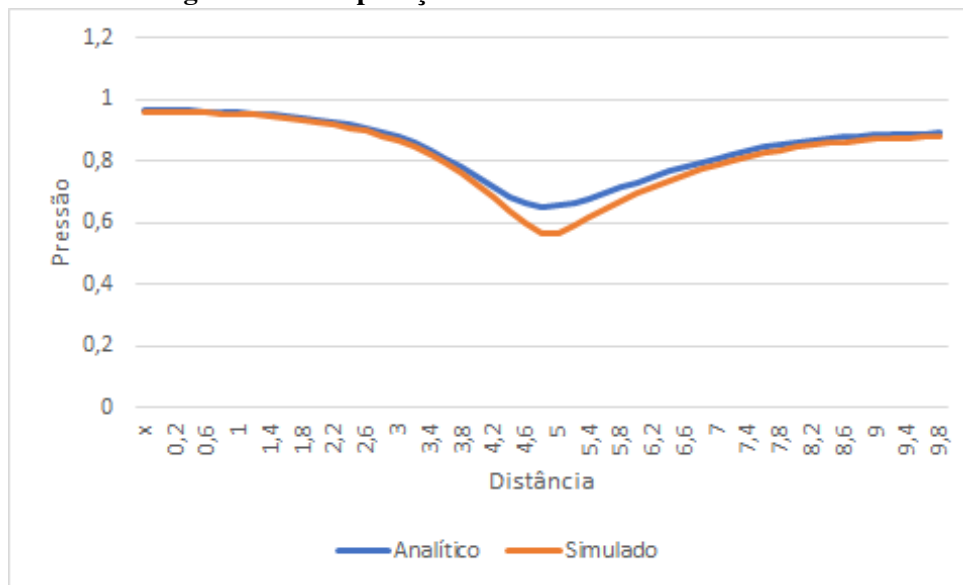
Figura 12: Número de Mach Caso 0.89



Fonte: Autoria própria

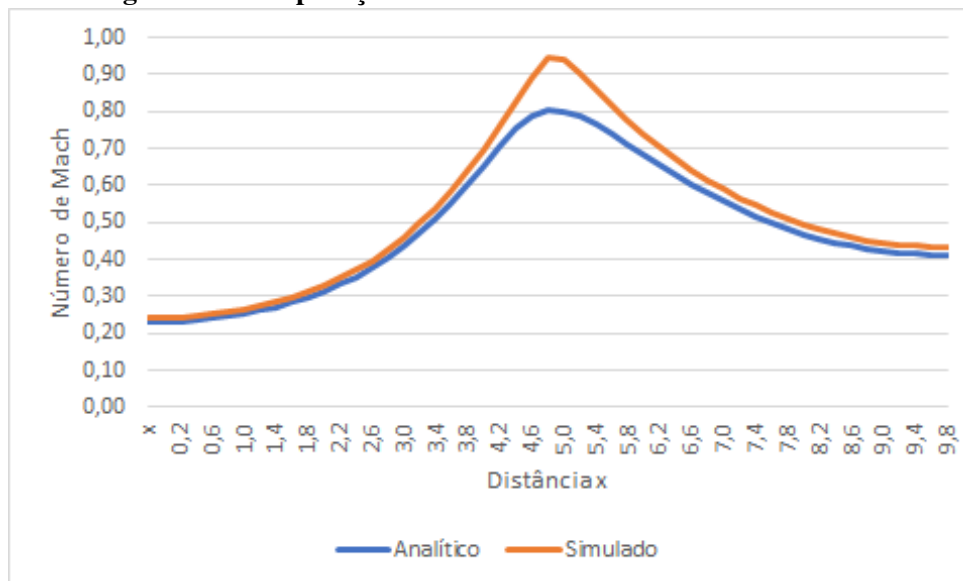
Essas duas figuras mostram o escoamento em termos de pressão e número de Mach, a baixa diferença de pressão faz com que a condição crítica na garganta não seja alcançada, dessa maneira o escoamento não alcança velocidades supersônicas. Em seguida foram gerados gráficos das propriedades analíticas e as obtidas pelo OpenFOAM, afim de comparar o resultado da simulação. O gráfico e o cálculo das diferenças percentuais foi realizado com o programa Microsoft Office Excel.

Figura 13: Comparação Analítica da Pressão Caso 0.89



Fonte: Autoria própria

Figura 14: Comparação Analítica do Número de Mach Caso 0.89

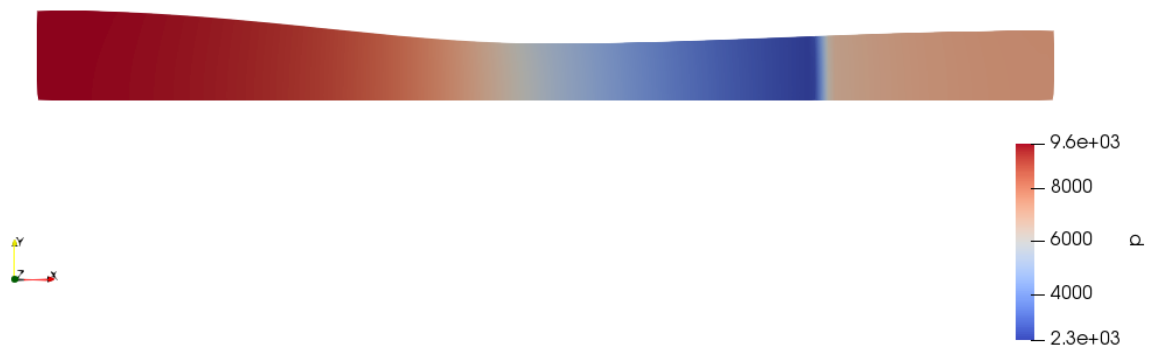


Fonte: Autoria própria

Para o gráfico da pressão, a maior diferença percentual entre os resultados analíticos e simulados é de 4,5% aproximadamente no meio do bocal, 5,2 polegadas. Já no no gráfico do

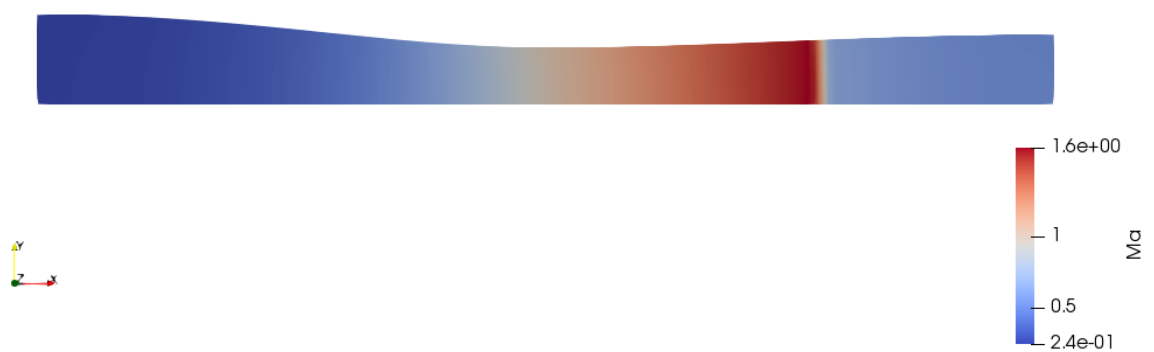
número de Mach a maior diferença percentual é de 7%, no mesmo lugar no bocal. As regiões onde o maior erro acontece é na garganta do bocal, possivelmente devido a mudança de regime, uma malha mais refinada nesse local poderia capturar os detalhes do escoamento nesse local com maior precisão.

Figura 15: Pressão Caso 0.75



Fonte: Autoria própria

Figura 16: Número de Mach Caso 0.75

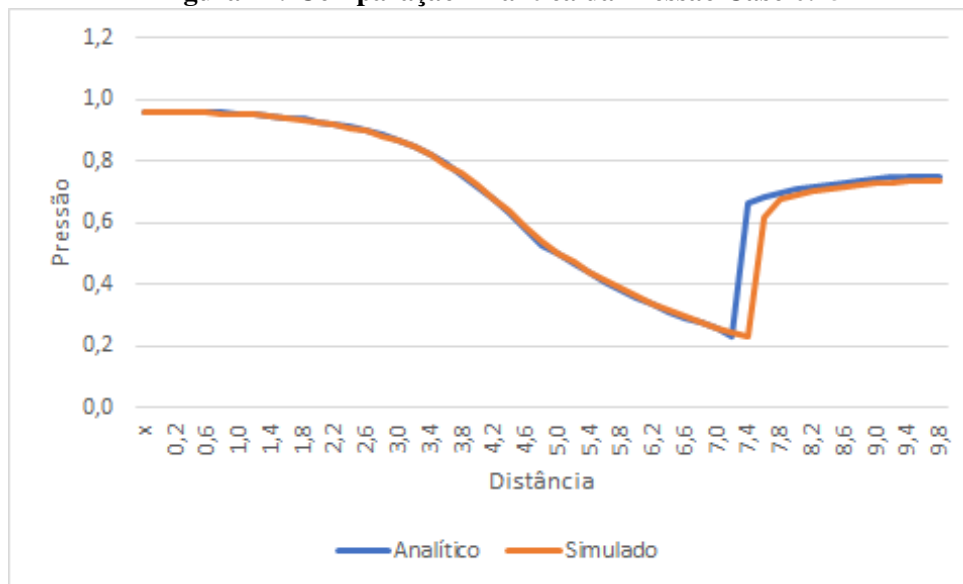


Fonte: Autoria própria

A relação de pressões desse escoamento se enquadra na letra (c) da relação de pressões,

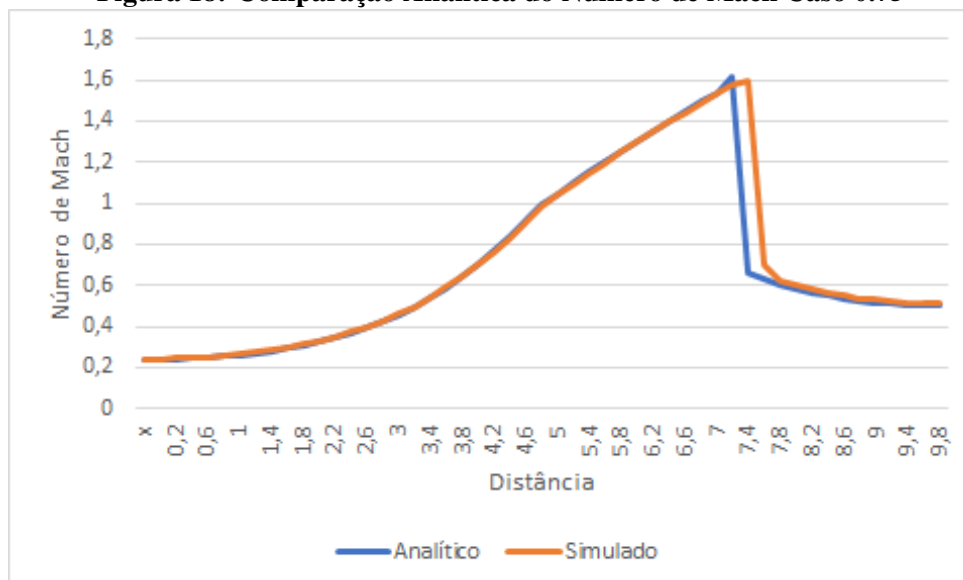
onde acontece uma onda de choque normal no bocal, a onda de choque causa uma desaceleração do escoamento até velocidades subsônicas abruptamente, e como já discutido, o escoamento subsônico perde velocidade com o aumento da área, assim o escoamento nesse caso é desacelerado ainda mais.

Figura 17: Comparação Analítica da Pressão Caso 0.75



Fonte: Autoria própria

Figura 18: Comparação Analítica do Número de Mach Caso 0.75

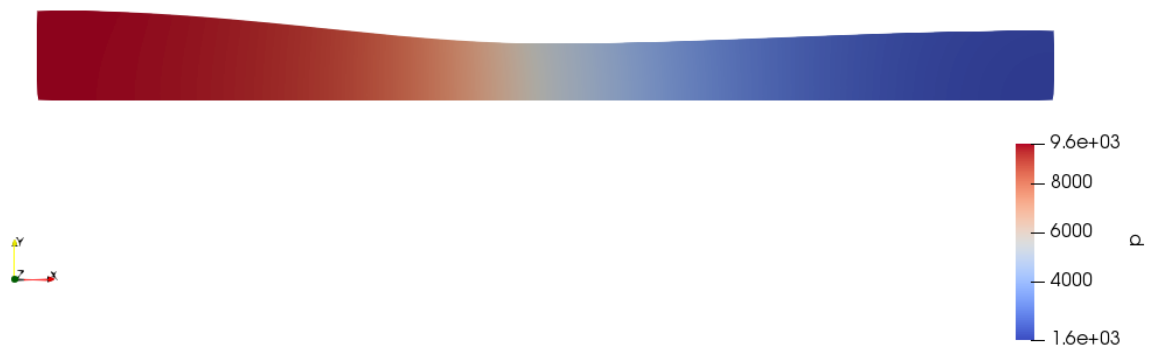


Fonte: Autoria própria

No gráfico da pressão, no decorrer de quase todo o escoamento a diferença entre os resultados analíticos e simulados a diferença se manteve a menos de 1%, até chegar na região da onda de choque onde a maior diferença alcançou uma diferença percentual de 21%. Pode se

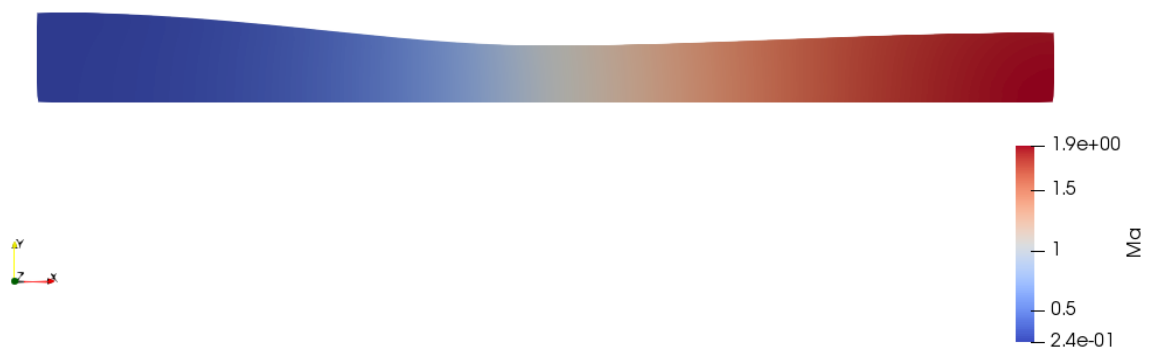
assumir que a descontinuidade da onda de choque é responsável por essa diferença, nos valores analíticos os valores da onda de choque ocorrem um pouco antes da simulação, como a mudança nas propriedades é abrupta, a diferença percentual também se torna grande. O mesmo acontece no gráfico do número de Mach, um possível meio de aproximar esses valores seria uma malha mais refinada, reduzindo erros e dando mais certeza aos resultados.

Figura 19: Pressão Caso 0.16



Fonte: Autoria própria

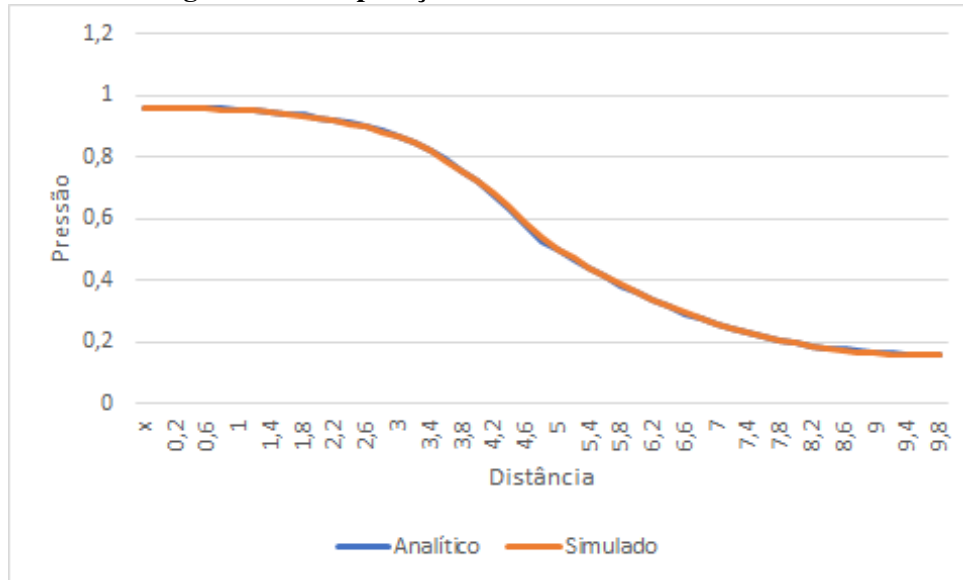
Figura 20: Número de Mach Caso 0.16



Fonte: Autoria própria

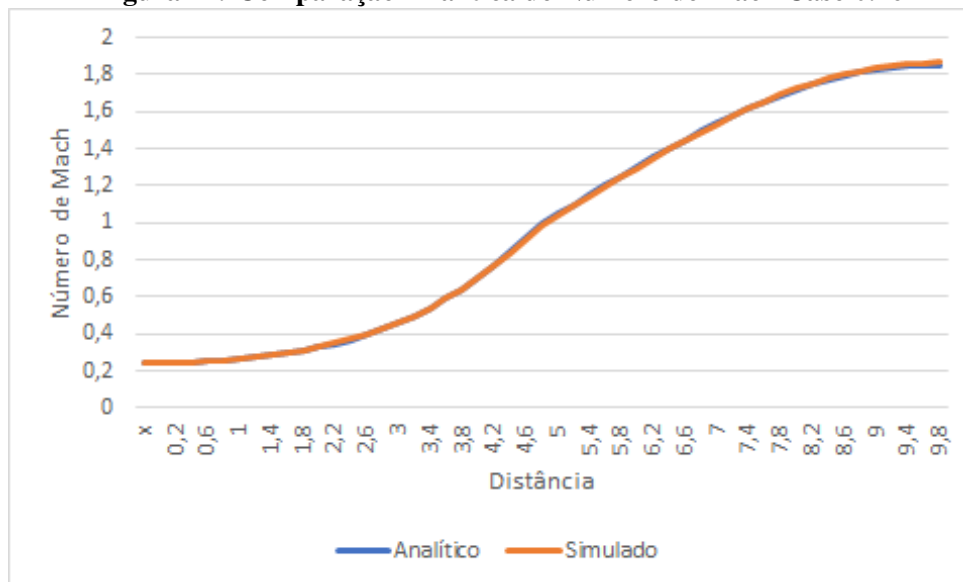
O escoamento com relação de pressão 0,16 é o caso do bocal supersônico clássico, o escoamento alcança $M = 1$ na seção de menor área e continua a ser acelerado a partir daí sem formação de ondas de choque quaisquer.

Figura 21: Comparação Analítica da Pressão Caso 0.16



Fonte: Autoria própria

Figura 22: Comparação Analítica do Número de Mach Caso 0.16



Fonte: Autoria própria

Tanto no gráfico como no gráfico do número de Mach, as curvas analíticas e simuladas se aproximam consideravelmente, a maior diferença percentual na pressão é 0,6% e no gráfico do número de Mach a maior diferença é de 0,9%.

Com exceção do caso com onda de choque as proximidades analíticas e obtidas por

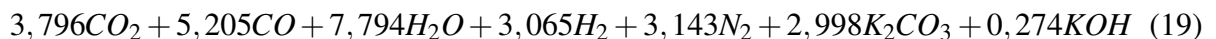
simulações foram grandes, validando assim o código para aplicações do tipo. Os casos em geral se beneficiariam de uma malha mais refinada, garantindo assim uma proximidade ainda maior. No entanto é possível observar como o código consegue acompanhar os efeitos e velocidades de escoamentos compressíveis em bocais convergente-divergente.

2.4 SIMULAÇÃO DE BOCAL DE PEQUENO PORTE

O bocal de pequeno porte a ser estudado foi projetado pela Equipe Rocket - UTFPR. Esse bocal faz parte de um motor com o objetivo de produzir 1000 Newtons de empuxo, propulsionando um foguete até a altitude de 1 km. Além das dimensões, a principal diferença das simulações apresentadas até aqui é o gás ejetado pelo bocal, resultado da combustão de seus propelentes, portanto é necessário uma análise preliminar para se obter suas propriedades termofísicas.

2.4.1 GÁS DO ESCOAMENTO

O propelente usado nesse motor é uma mistura de sacarose (Combustível) e nitrato de potássio (Comburente) em uma razão de 65/35 de comburente para combustível. O produto da combustão de $C_{12}H_{22}O_{11} + 6,288KNO_3$ é:



Onde $C_{12}H_{22}O_{11}$ é a sacarose, KNO_3 é o nitrato de potássio, CO_2 é o dióxido de carbono, CO é monóxido de carbono, H_2O é a água H_2 é hidrogênio, N_2 é nitrogênio, K_2CO_3 é o carbonato de potássio e KOH é hidróxido de potássio.

Para facilitar a obtenção das propriedades da combustão é feito uso de um software chamado PROPEP3, esse programa permite a avaliação de propelentes sólidos de motores foguetes e a obtenção das propriedades termofísicas dos mesmos. Fazendo uso é obtido a temperatura de chama adiabática 1722 K, a razão de calores específicos k , 1,133 e o número de mols, 17,321. O peso molecular efetivo pode então ser calculado dividindo a massa do propelente, para esse motor essa massa será 727 g, pelo número de mols, o peso molecular será então 41,97 g/mol.

O valor do calor específico a pressão também é necessário para montar o caso no Open-FOAM, esse valor pode ser obtido através de tabelas termoquímicas dos produtos da combustão (RICHARD NAKKA'S EXPERIMENTAL ROCKETRY WEB SITE,).

Figura 23: Tabela de Calores Específicos

Specific Heat of solid (Cs) and gas (Cp) at constant pressure														
Temp	Cs		Cp							Gas only	Mixture	k mixture	k' gas	k 2-phase
	K ₂ CO ₃	KOH	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂	Ref. JANAF						
K	Ref. JANAF	Ref. NIST	Ref. JANAF											
300	114.70		29.14	37.221	28.849	33.60	29.125	31.57	46.34	1.2187	1.3576	1.0770		
400	128.14		29.34	41.325	29.181	34.26	29.249	32.56	49.07	1.2040	1.3429	1.0699		
500	140.05		29.75	44.627	29.26	35.23	29.58	33.57	51.61	1.1920	1.3292	1.0646		
600	150.67		30.44	47.321	29.327	36.33	30.11	34.62	54.02	1.1819	1.3161	1.0604		
700	160.48		31.17	49.564	29.441	37.50	30.754	35.64	56.31	1.1732	1.3043	1.0570		
800	170.04		31.90	51.434	29.624	38.72	31.433	36.63	58.53	1.1656	1.2936	1.0540		
900	179.52		32.58	52.999	29.881	39.99	32.09	37.58	60.71	1.1587	1.2841	1.0513		
1000	188.95		33.18	54.308	30.205	41.27	32.697	38.49	62.82	1.1525	1.2756	1.0490		
1100	198.32		33.71	55.409	30.581	42.54	33.241	39.33	64.87	1.1470	1.2681	1.0468		
1200	205.26		34.18	56.342	30.992	43.77	33.723	40.12	66.56	1.1428	1.2614	1.0453		
1300	209.20		34.57	57.137	31.423	44.95	34.147	40.85	67.79	1.1398	1.2556	1.0444		
1400	209.20		34.92	57.802	31.861	46.05	34.518	41.51	68.46	1.1382	1.2505	1.0443		
1500	209.20		35.22	58.379	32.298	47.09	34.843	42.12	69.06	1.1369	1.2459	1.0441		
1600	209.20	57.5	35.48	58.886	32.725	48.05	35.128	43.35	70.30	1.1341	1.2373	1.0438		
1700	209.20	57.8	35.71	59.317	32.139	48.94	35.378	43.73	70.68	1.1333	1.2348	1.0437		
1800	209.20	58.1	35.91	59.701	33.537	49.75	35.6	44.33	71.27	1.1321	1.2309	1.0436		
1900	209.20	58.4	36.09	60.049	33.917	50.50	35.796	44.76	71.70	1.1312	1.2281	1.0435		
2000	209.20	58.7	36.25	60.35	34.28	51.18	35.971	45.15	72.09	1.1304	1.2257	1.0434		
2100	209.20	58.9	36.39	60.622	34.624	51.82	36.126	45.51	72.45	1.1296	1.2236	1.0433		
2200	209.20	59.1	36.52	60.865	34.952	52.41	36.268	45.83	72.78	1.1290	1.2216	1.0433		
2300	209.20		36.64	61.086	35.263	52.95	36.395	45.44	72.38	1.1298	1.2239	1.0434		
2400	209.20		36.32	61.287	35.559	53.44	36.511	45.62	72.57	1.1294	1.2228	1.0433		
2500	209.20		36.84	61.471	35.842	53.90	36.616	45.97	72.92	1.1287	1.2208	1.0432		

Note: Units of Cp and Cs are J/mol-K

Fonte: Richard Nakka

Interpolando nessa tabela para valores de temperatura de 1722 K, encontra-se um valor de calor específico a pressão constante de $1840,5 \frac{J}{kgK}$. Esses valores serão então utilizados nas próximas simulações.

2.4.2 GEOMETRIA DO BOCAL

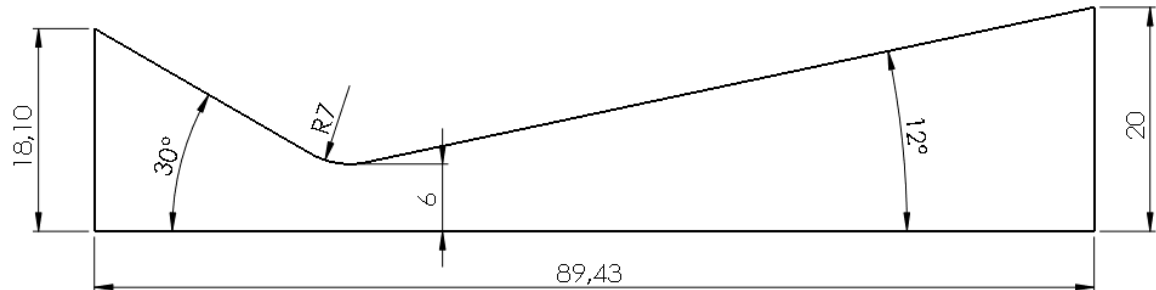
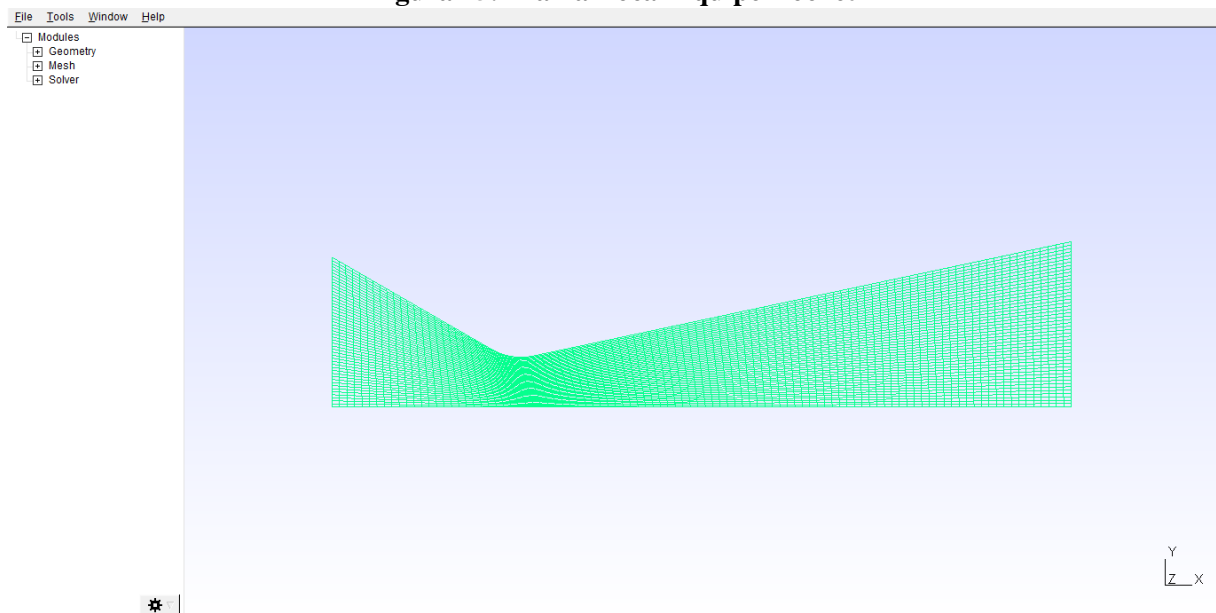


Figura 24: Bocal Equipe Rocket

A geometria básica do bocal a ser usada, está representada na figura a seguir, o mesmo processo do bocal da NASA foi utilizado também aqui, o bocal foi desenvolvido como "wedge" com 1° de distância entre suas faces, da mesma maneira foi gerado a malha usando o gmsh.

Figura 25: Malha Bocal Equipe Rocket



Fonte: Autoria própria

2.4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

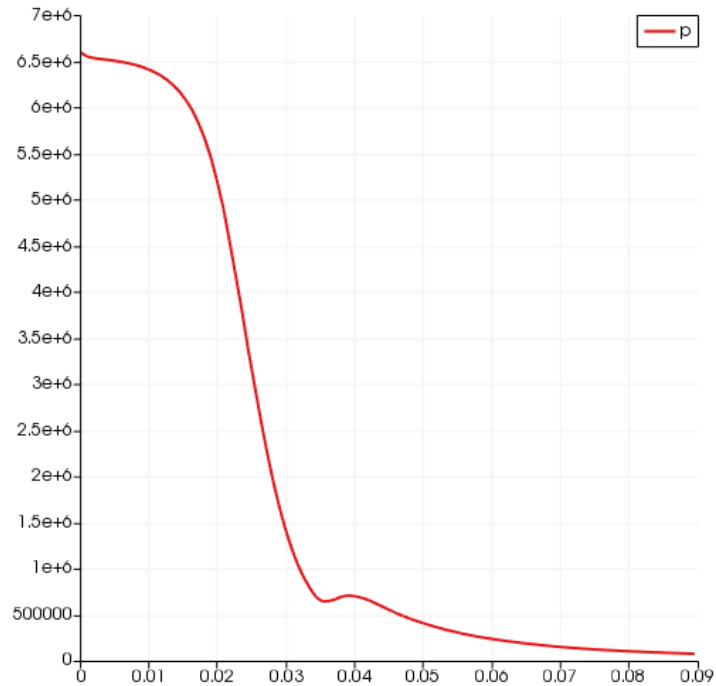
Foram utilizadas as mesmas condições de contorno das simulações dos bocais anteriores, no entanto, os valores a serem aplicados foram modificados. A pressão da entrada do bocal é de 6894757,29 Pa, essa pressão equivale a 1000 Psi e é a pressão máxima do projeto da câmara de combustão durante sua operação, já na saída será utilizado a pressão atmosférica de 101325 Pa, dessa maneira o bocal estará funcionando com a diferença de pressões encontradas durante a operação real do motor.

Como já mencionado, a temperatura adotada será a temperatura de chama adiabática da combustão do propelente, com um valor de 1722 K. Os campos de velocidade permanecerão os mesmos já que ainda não haverá adição de velocidade no escoamento, os mesmos tipos de contorno aplicados serão utilizados novamente aqui.

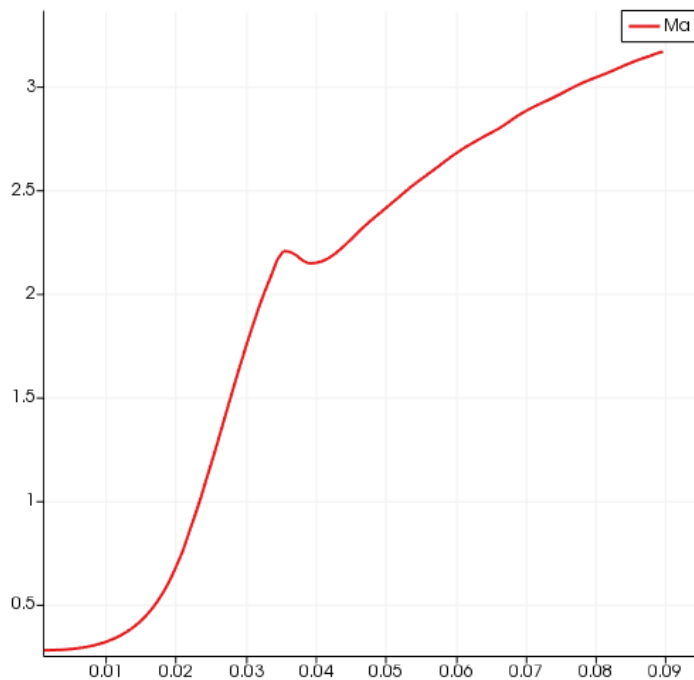
Serão utilizados também os mesmos parâmetros de simulação de tempo de simulação de 1e-01 segundos, com passos de tempo de 1e-10 segundos, escrevendo um resultado a cada 1e-04 segundos, e número de Courant máximo de 0,4. Nessas simulações foi feito uso do recurso de paralelismo do OpenFOAM onde é possível dividir a análise nos cores do processador, reduzindo assim o tempo de simulação. Nesses casos é necessário um outro arquivo na pasta system, o decomposeParDict, nesse arquivo é determinado o número de subdomínios de processamento, após ser utilizado é necessário recombinar os resultados para o processamento dos mesmos.

2.5 RESULTADOS

As simulações foram realizadas variando os ângulos da seção de convergência (original 12°), divergência (original 30°) e raio (original 7mm), com o intuito de observar os efeitos no escoamento para um bocal desse porte.

Figura 26: Pressão no Bocal

Fonte: Autoria própria

Figura 27: Número de Mach no Bocal

Fonte: Autoria própria

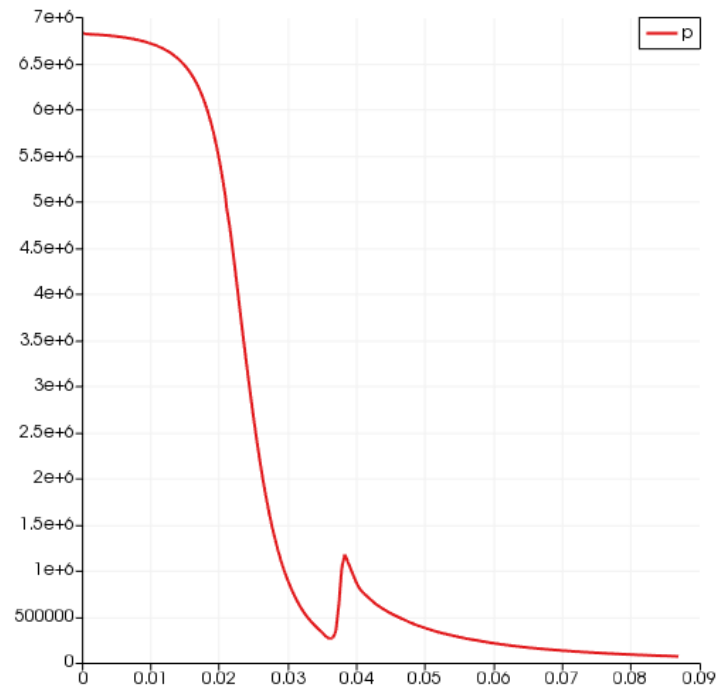
A Figura 26 mostra os valores de pressão para a distância em x do bocal, enquanto a Figura 27 mostra os valores para o número de Mach. Pode se observar a operação normal desse bocal, onde a condição de estrangulamento é alcançada na garganta produzindo então um

escoamento supersônico, como esperado uma queda de pressão acompanha o aumento da velocidade.

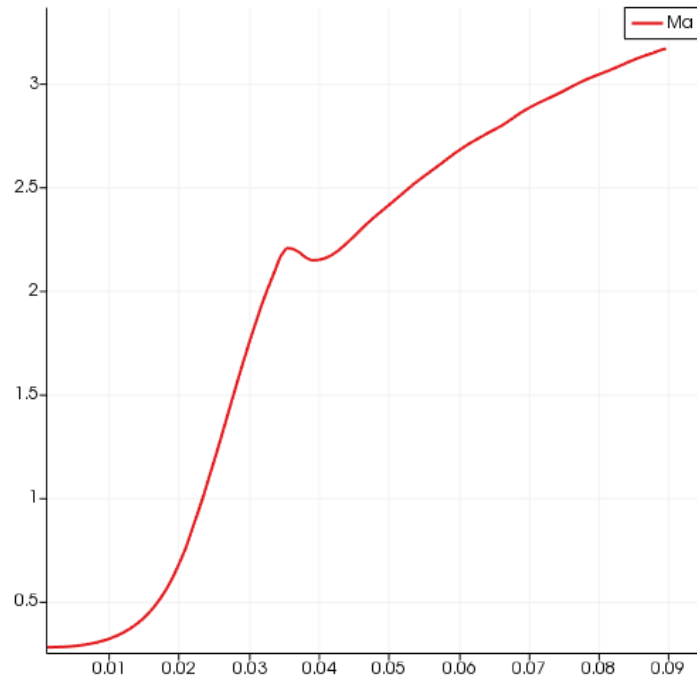
2.5.1 VARIAÇÕES NO RAIO

O raio tem como objetivo suavizar o contorno de bocais e assim evitar possíveis perdas de desempenho. Foram realizadas duas simulações onde o raio foi alterado do original de 7mm, na primeira simulação o raio foi completamente removido com o intuito de se observar a real necessidade do mesmo no projeto do bocal, no segundo caso o raio foi aumentado para 10mm.

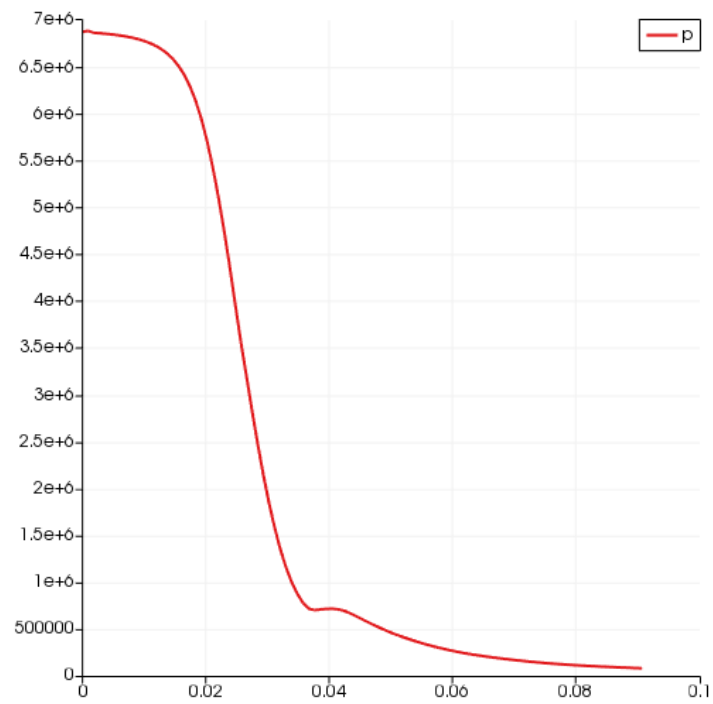
Figura 28: Pressão no Bocal sem Raio



Fonte: Autoria própria

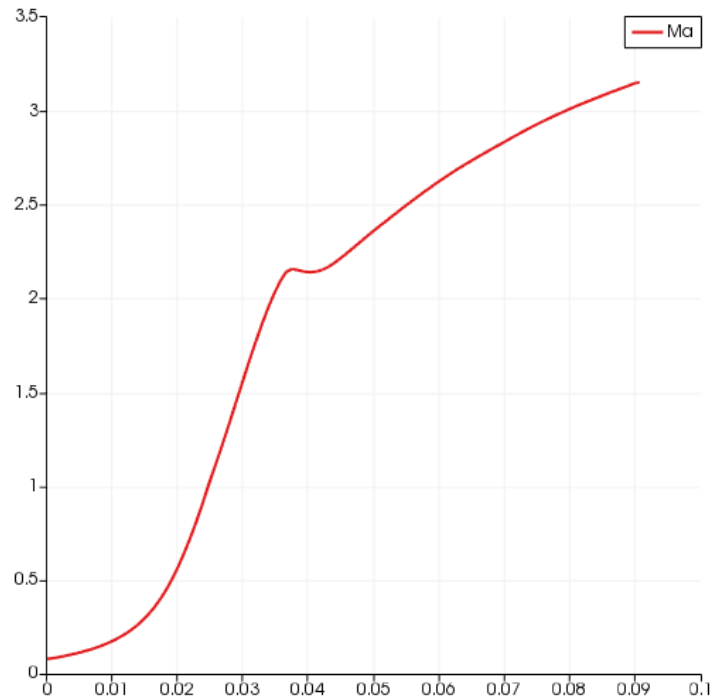
Figura 29: Número de Mach no Bocal sem Raio

Fonte: Autoria própria

Figura 30: Pressão no Bocal de Raio 10mm

Fonte: Autoria própria

Figura 31: Número de Mach no Bocal de Raio 10mm



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que ao remover o raio, Figuras 28 e 29, há um pico significativo na pressão, resultado de ondas de choque oblíquas se formando no escoamento a partir da garganta do bocal, demonstrando que o raio não pode ser ignorado dentro do projeto do bocal. Para o caso do raio de 10 mm demonstrado nas Figuras 30 e 31 não fica evidente qualquer alteração no desempenho do dispositivo, quando comparado com a configuração original de raio de 7 mm.

2.5.2 VARIAÇÃO DE ÂNGULO DE DIVERGÊNCIA

O ângulo de divergência recebe maior atenção na literatura quando se é discutido performance de bocais, um ângulo de divergência pequeno é desejável afim de manter o escoamento no eixo x. Duas simulações de divergência foram realizadas, uma com um valor de 10° , menor que o original de 12° e outra com um ângulo maior de 20° .

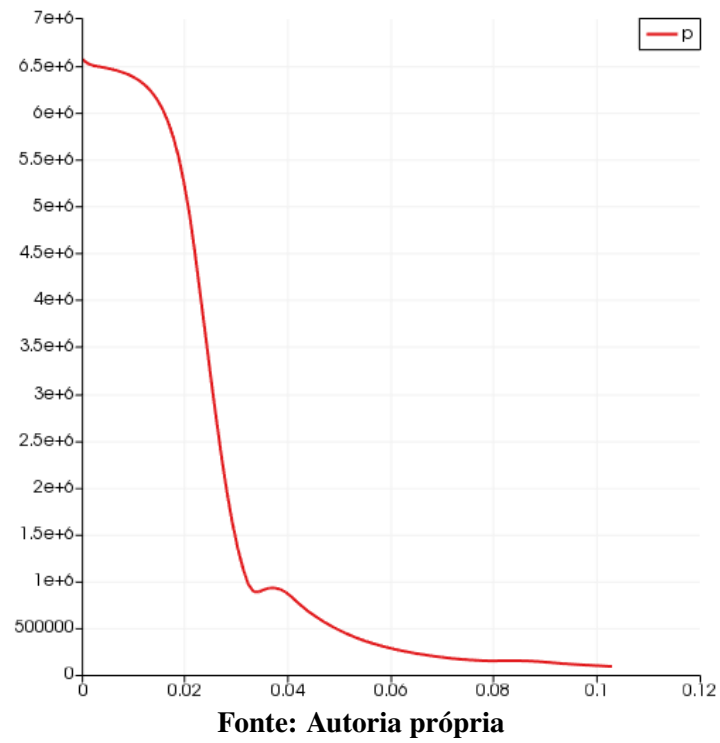
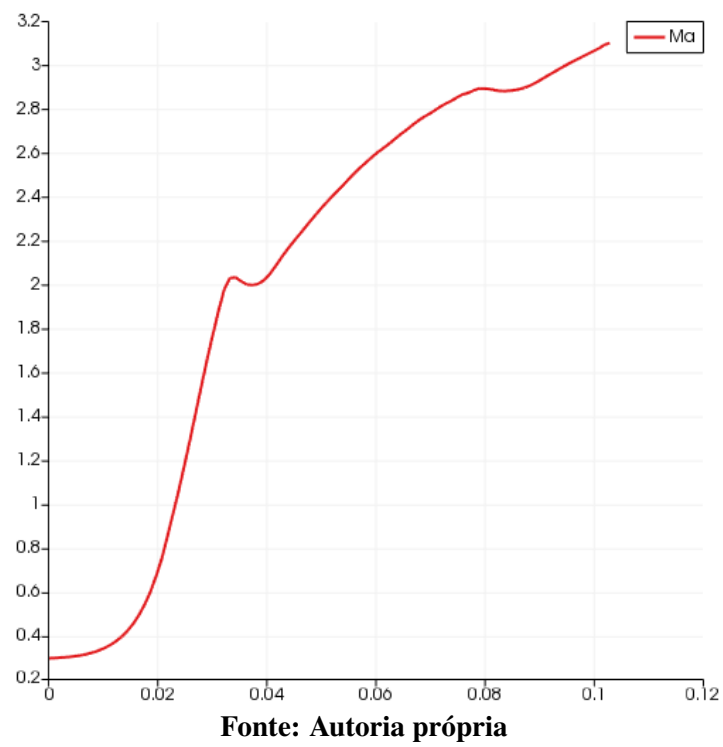
Figura 32: Pressão no Bocal de Divergência 10°**Figura 33: Número de Mach no Bocal de Divergência 10°**

Figura 34: Pressão no Bocal de Divergência 20°

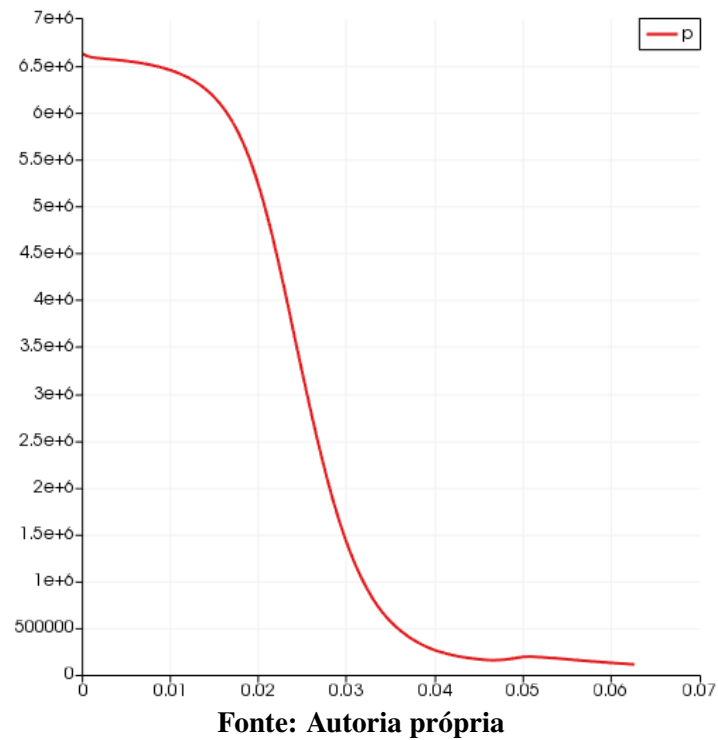
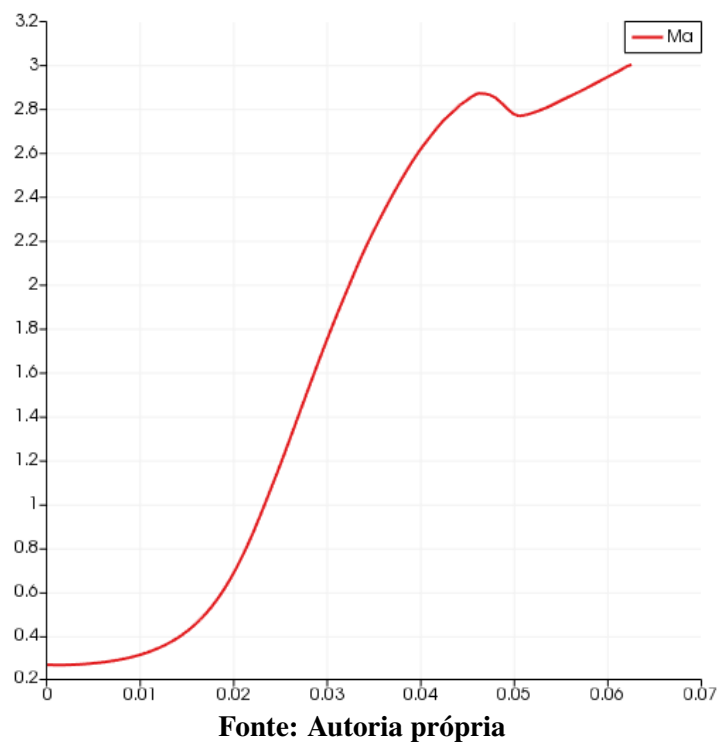


Figura 35: Número de Mach no Bocal de Divergência 20°



Como esperado a simulação com um ângulo de divergência menor, Figuras 32 e 33 obteve-se uma velocidade de Mach maior, no entanto a diferença não foi extremamente signifi-

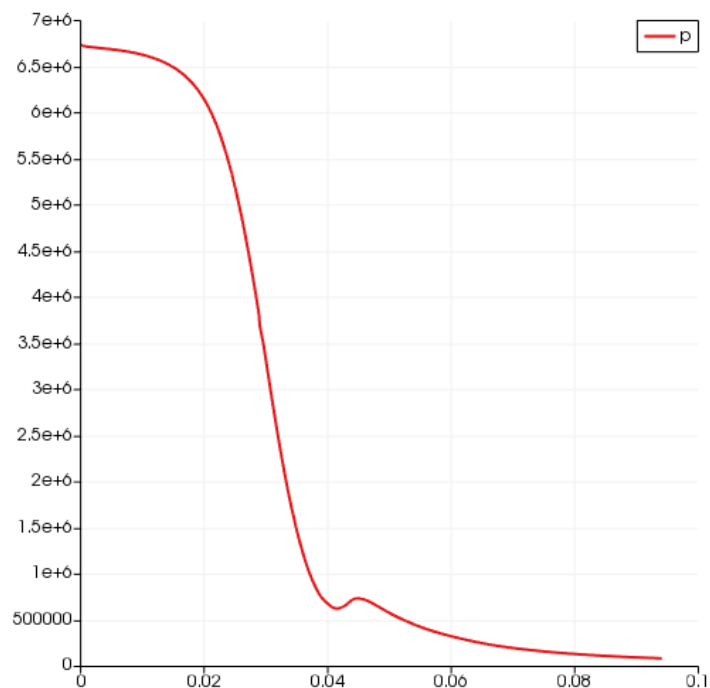
cativa. O que pode-se observar nas Figuras 34 e 35 é que o bocal com o ângulo de 20° parece apresentar sinais de ondas de choque oblíquas, o que não seria desejável.

Outro ponto que fica evidente ao se observar as simulações divergência é a alteração significativa do comprimento do bocal, em casos de bocais reais, o aumento do comprimento deve ser levado em consideração na troca por desempenho, já que um bocal maior pode apresentar maiores dificuldades quanto a custos, fabricação ou efeito no voo do veículo.

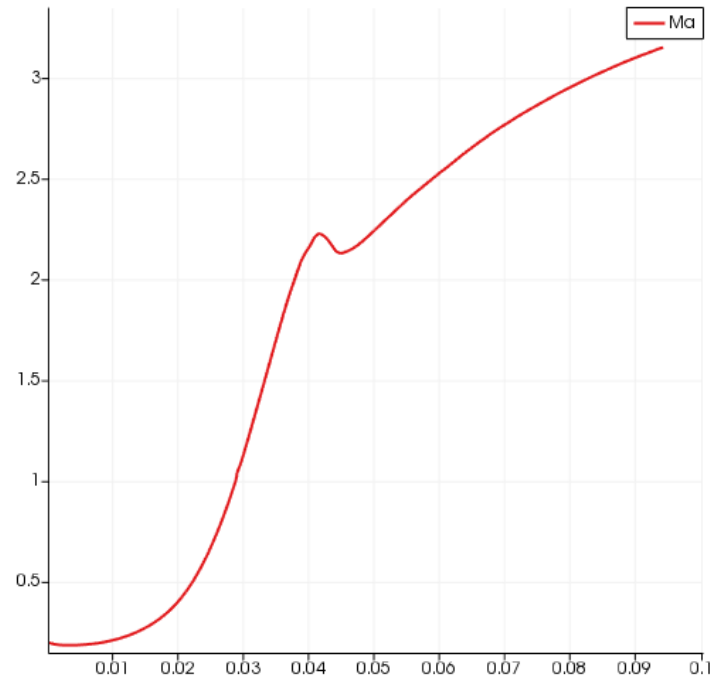
2.5.3 VARIAÇÕES NO ÂNGULO DE CONVERGÊNCIA

O ângulo de convergência costuma ser negligenciado na literatura, em alguns casos sequer é mencionado quando se é discutido a geometria de um bocal convergente-divergente. Assim como nos outros casos, outras duas outras simulações foram realizadas, uma com um ângulo de 25° , menor do que o ângulo original de 30° e outra com um ângulo de 35° .

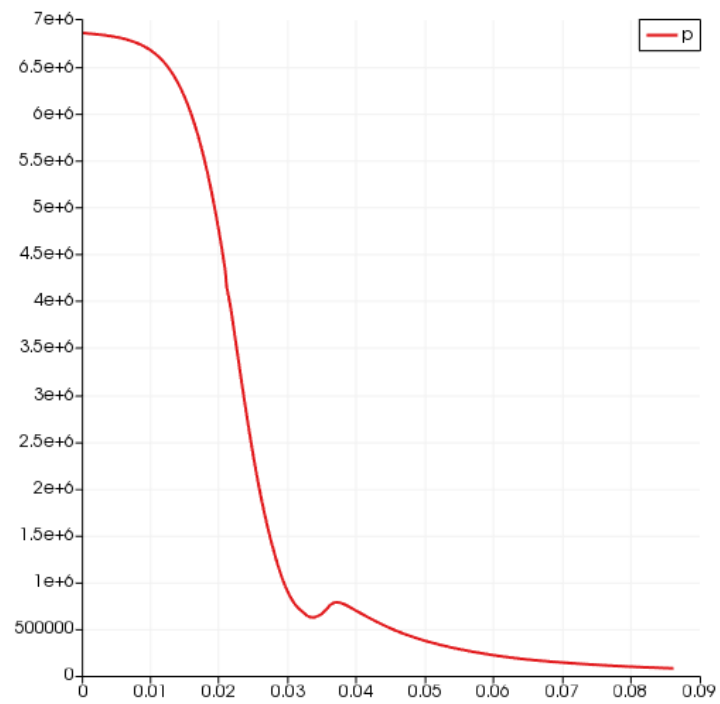
Figura 36: Pressão no Bocal de Convergência 25°



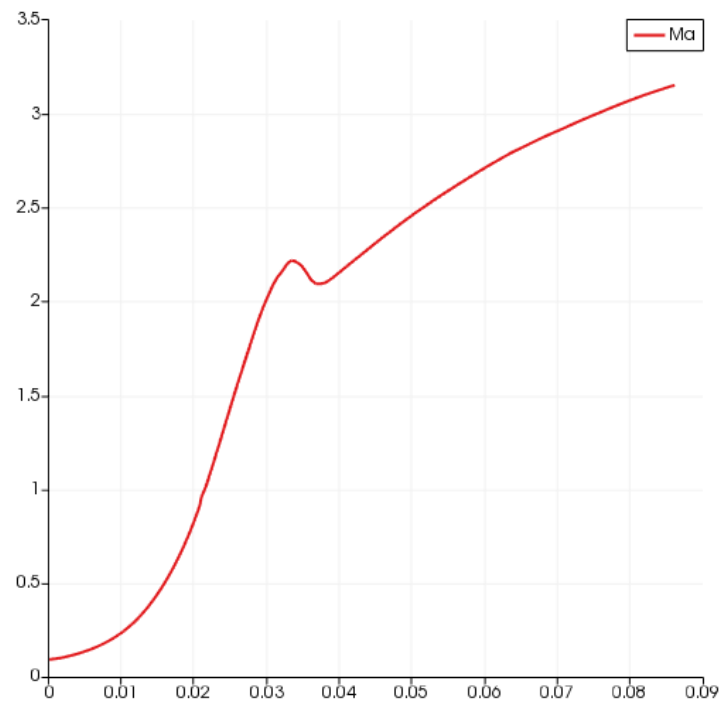
Fonte: Autoria própria

Figura 37: Número de Mach no Bocal de Convergência 25°

Fonte: Autoria própria

Figura 38: Pressão no Bocal de Convergência 35°

Fonte: Autoria própria

Figura 39: Número de Mach no Bocal de Convergência 35°

Fonte: Autoria própria

Além da variação no comprimento do bocal, variações no desempenho dos bocais não são aparentes, confirmando assim a baixa importância da seção convergente para a otimização de bocais convergente-divergente.

3 CONCLUSÃO

Bocais convergente-divergente são dispositivos relativamente simples, um duto de área variável, no entanto diversos fatores são responsáveis pelo seu desempenho, a pressão de entrada e saída, a pressão atmosférica local e claro, as várias possibilidades de geometria que acabam influenciando de um modo ou outro no desempenho do dispositivo.

Através da dinâmica dos fluidos computacional é possível analisar o escoamento desses bocais, prever ondas de choque, avaliar suas propriedades durante o escoamento e buscar maneiras de otimizar o projeto. Sem a necessidade de realizar testes estáticos com o sistema de propulsão, que traz consigo custos e riscos.

Através dos resultados obtidos nesse trabalho é possível concluir que certas decisões irão contribuir para positivamente para o desempenho do sistema, a redução do ângulo de convergência carrega uma melhora na velocidade do escoamento, para compensar o aumento do comprimento do bocal é razoável aumentar o ângulo da seção de convergência, seu comprimento pode ser reduzido sem visíveis perdas de velocidade.

O raio do bocal não pode ser negligenciado, embora variações pequenas na sua dimensão não aparentam grande influência, a falta do raio ou possivelmente um raio pequeno demais poderá levar a formação de ondas de choque oblíquas no bocal, tais discontinuidades são indesejáveis do ponto de vista do escoamento.

O programa OpenFOAM se provou mais do que suficiente para as necessidades apresentadas e o código desenvolvido no mesmo e apresentado nesse trabalho pode ser usado com confiança para a simulação de escoamentos supersônicos em bocais de pequeno porte.

REFERÊNCIAS

- ALLMAN, J. G.; HOFFMAN, J. D. Design of maximum thrust nozzle contours by direct optimization methods. **AIAA journal**, v. 19, n. 6, p. 750–751, 1981.
- ANDERSON, J. D. **Modern compressible flow: with historical perspective**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1990.
- CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: São Paulo, SP: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2007.
- ELLIS, R. A. Solid rocket motor nozzles. NASA Lewis Research Center, 1975.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4. ed. [S.l.]: John Wiley Sons Inc, 1998.
- LAKSHMI K. S.; VENKATESH, K. Modeling and simulation of supersonic nozzle using computational fluid dynamics. **International Journal Magazine of Engineering, Technology, Management and Research**, v. 3, n. 9, p. 188–195, 2016.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- MORAN, H. N. S. M. J. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 5. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro, RJ : LTC, 2006.
- NAKKA, A. R. **Solid propellant rocket motor design and testing**. 133–145 p., 1984.
- RICHARD NAKKA'S EXPERIMENTAL ROCKETRY WEB SITE. **Technical Notepad 1 – KNSU Ideal Performance Calculations**. Disponível em: <<http://www.nakka-rocketry.net/techs.htmlnote1>>. Acesso em: 24 mai. 2018.
- STEVENS, T.; HOBART, H. M. **Steam turbine engineering**. [S.l.]: London ; New York : Whittaker and Co, 1906.
- SUTTON, O. B. G. P. **Rocket Propulsion Elements**. 7. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2001.
- THE OPENFOAM FOUNDATION. **User Guide version 5.0**. [S.l.], 2017.
- WINTER, M. Benchmark and validation of open source cfd codes, with focus on compressible and rotating capabilities, for integration on the simscale platform. 2013.

ANEXO A – ALGORITMO PARA GEOMETRIA DO BOCAL DA NASA

```
if ( x < 5.0 ) then
```

```
    area = 1.75 - 0.75 * cos( ( 0.2 * x - 1.0 ) * pi )
```

```
else
```

```
    area = 1.25 - 0.25 * cos( ( 0.2 * x - 1.0 ) * pi )
```

```
endif
```

ANEXO B – BOUNDARY

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 5.x |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation | |
/*-----*/
/* Windows 32 and 64 bit porting by blueCAPE: http://www.bluecape.com.pt */
| Based on Windows porting (2.0.x v4) by Symscape: http://www.symscape.com |
/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        polyBoundaryMesh;
    location     "constant/polyMesh";
    object       boundary;
}
// ***** //

5
(
    inlet
    {
        type            patch;
        physicalType    patch;
        nFaces          24;
        startFace       6979;
    }
    outlet
    {
        type            patch;
        physicalType    patch;
        nFaces          24;
        startFace       7003;
    }
    wedge1
    {
        type            wedge;
        physicalType    wedge;
        nFaces          3576;
        startFace       7027;
    }
    nozzle
    {
        type            wall;
        physicalType    wall;
        nFaces          149;
        startFace       10603;
    }
    wedge0
    {
        type            wedge;
        physicalType    wedge;
        nFaces          3576;
        startFace       10752;
    }
)

```

ANEXO C – THERMOPHYSICAL PROPERTIES

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.1.1 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
/*-----*- C++ -*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "constant";
    object thermophysicalProperties;
}
// ***** //

thermoType
{
    type hePsiThermo;
    mixture pureMixture;
    transport const;
    thermo hConst;
    equationOfState perfectGas;
    specie specie;
    energy sensibleInternalEnergy;
}

mixture
{
    specie
    {
        nMoles 1;
        molWeight 29;
    }
    thermodynamics
    {
        Cp 1005;
        Hf 0;
    }
    transport
    {
        mu 0;
        Pr 1;
    }
}
}

```

ANEXO D – P

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 5.x |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
|-----*/
/* Windows 32 and 64 bit porting by blueCAPE: http://www.bluecape.com.pt */
| Based on Windows porting (2.0.x v4) by Symscape: http://www.symscape.com |
|-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       p;
}
// *****

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0];

internalField   uniform 10000;

boundaryField
{
    wedge0
    {
        type      wedge;
    }
    wedge1
    {
        type      wedge;
    }
    inlet
    {
        type      totalPressure;
        phi       phi;
        rho       none;
        psi       thermo:psi;
        gamma     1.4;
        p0        uniform 10000;
        value     uniform 10000;
    }
    nozzle
    {
        type      zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type      waveTransmissive;
        field     p;
        psi       thermo:psi;
        gamma     1.4;
        fieldInf  8900;
        lInf      0.025;
        value     uniform 8900;
    }
}

```

ANEXO E - T

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 5.x |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
|-----*\
/* Windows 32 and 64 bit porting by blueCAPE: http://www.bluecape.com.pt */
| Based on Windows porting (2.0.x v4) by Symscape: http://www.symscape.com |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       T;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];

internalField   uniform 298;

boundaryField
{
    wedge0
    {
        type      wedge;
    }
    wedge1
    {
        type      wedge;
    }
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 298;
    }
    nozzle
    {
        type      zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

```

ANEXO F – U

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 5.x |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
|-----*\
/* Windows 32 and 64 bit porting by blueCAPE: http://www.bluecape.com.pt */
| Based on Windows porting (2.0.x v4) by Symscape: http://www.symscape.com |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    location     "0";
    object       U;
}
// ***** //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    wedge0
    {
        type      wedge;
    }
    wedge1
    {
        type      wedge;
    }
    inlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
    nozzle
    {
        type      slip;
    }
    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

```


ANEXO G – MA

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 5.x |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
|-----*\
/* Windows 32 and 64 bit porting by blueCAPE: http://www.bluecape.com.pt */
| Based on Windows porting (2.0.x v4) by Symscape: http://www.symscape.com |
/*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       Ma;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    outlet
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    wedge1
    {
        type      wedge;
    }
    nozzle
    {
        type      calculated;
        value     uniform 0;
    }
    wedge0
    {
        type      wedge;
    }
}

```

ANEXO H – CONTROLDICT

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.1.1 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
/*-----*/
FoamFile
{
  version 2.0;
  format ascii;
  class dictionary;
  location "system";
  object controlDict;
}
// ***** //

application rhoCentralFoam;

startFrom latestTime;

startTime 0;

stopAt endTime;

endTime 1e-01;

deltaT 1e-10;

writeControl adjustableRunTime;

writeInterval 1e-04;

cicleWrite 0;

writeFormat ascii;

writePrecision 12;

writeCompression off;

timeFormat general;

timePrecision 6;

runTimeModifiable true;

adjustTimeStep yes;

maxCo 0.4;

maxDeltaT 1;

```

ANEXO I – FVSCHEMES

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.1.1 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
/*-----*- C++ -*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSchemes;
}
// *****

fluxScheme      Kurganov;

ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;
    div(tauMC)   Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
    reconstruct(rho)  vanAlbada;
    reconstruct(U)   vanAlbadaV;
    reconstruct(T)   vanAlbada;
}

snGradSchemes
{
    default      corrected;
}

```

ANEXO J - FVSOLUTION

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.1.1 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
/*-----*- C++ -*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "system";
    object fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
    "(rho|rhoU|rhoE)"
    {
        solver diagonal;
    }

    U
    {
        solver smoothSolver;
        smoother GaussSeidel;
        nSweeps 2;
        tolerance 1e-10;
        relTol 0;
    }

    e
    {
        $U;
        tolerance 1e-10;
        relTol 0;
    }
}

```