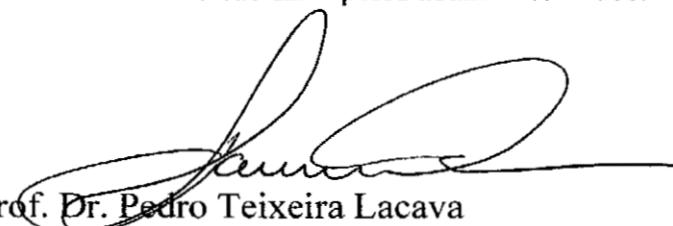


Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeroespacial no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica.

Alexandre Alves

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
INJEÇÃO CENTRÍFUGO BIPROPELENTE UTILIZADO
EM MOTOR FOGUETE A PROPELENTE LÍQUIDO**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava
Orientador

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

Alves, Alexandre

Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Injeção Centrífugo Bipropelente Utilizado em Motor Foguete a Propelente Líquido / Alexandre Alves.

São José dos Campos, 2008.

Número de folhas no formato 154f.

Dissertação de mestrado – Curso de Engenharia Aeroespacial. Área de Propulsão – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2008. Orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava.

1. Injetor Bipropelente Líquido-Líquido. 2. Sistema de Injeção para Motor Foguete. 3. Motor Foguete a Propelente Líquido. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, Alexandre. **Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Injeção Centrífugo Bipropelente Utilizado em Motor Foguete a Propelente Líquido**. 2008. 154f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Alexandre Alves

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Injeção Centrífugo Bipropelente Utilizado em Motor Foguete a Propelente Líquido

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2008

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Alexandre Alves

Avenida Ouro Fino, 593 – Bosque dos Eucaliptos

12233-400 – São José dos Campos - SP

Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Injeção Centrífugo Bipropelente Utilizado em Motor Foguete a Propelente Líquido

Alexandre Alves

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava – ITA, Presidente

Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava – ITA, Orientador

Prof. Dr. Amílcar Porto Pimenta – ITA, Membro

Prof. Dr. Demétrio Bastos Netto - INPE, Membro Externo

ITA

Aos meus pais, Gilson e Maria José,
que sempre me apoiaram.

Agradecimentos

A Deus por ter mostrado sua presença nos momentos mais difíceis.

Ao professor Pedro Teixeira Lacava, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), por sua orientação e contribuição para melhoria deste trabalho.

Aos professores do MAI, Moscow State Aviation Institute, especialmente ao professor Kessaev pelos conhecimentos passados.

Ao Eng. André Motta e aos profissionais da ASE, do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), pela ajuda na fabricação dos injetores.

Ao Dr. Nivaldo Hinckel, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por sua colaboração para realização dos experimentos.

À minha família sem a qual esta conquista não seria possível.

*“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total,
buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.”*

(Ayrton Senna)

Resumo

O sistema de injeção de um motor foguete a propelente líquido (MFPL) é considerado uma das partes mais importantes para o perfeito funcionamento do motor. Seus parâmetros fluidos mecânicos influenciam diretamente no comportamento térmico da câmara, por consequência na eficiência de combustão, refrigeração do motor e também na estabilidade dinâmica de todo o motor. Esta dissertação propõe uma metodologia de cálculo para dimensionamento de injetores centrífugos líquido-líquido para motor foguete a propelente líquido, validada através da obtenção da geometria de um injetor já conhecido, o injetor do motor russo RD-109. Este trabalho também estuda aspectos experimentais de influência dos canais tangenciais de admissão de fluido no ângulo de cone, distribuição da vazão mássica e razão de mistura, que são os principais parâmetros de desempenho do injetor. O conhecimento prévio desses parâmetros é útil antes da montagem dos injetores no cabeçote, pois conhecendo seu comportamento é possível distribuí-los de maneira a melhorar a resposta dinâmica do sistema e a eficiência de combustão, otimizando os custos de ajustes do motor na fase de testes a quente.

Abstract

The injector head of a Liquid Propellant Rocket Engine is one of the most important items for perfect engine operation. Its mechanical fluid parameters influence directly the thermal behavior of the chamber and consequently the combustion efficiency, the refrigeration and also the dynamic stability of the whole engine. This dissertation presents a calculation methodology for designing liquid-liquid swirl injectors used in a Liquid Propellant Rocket Engine validated through the geometry obtained of a known injector, the injector of the Russian engine RD-109. Further, this work also studies the experimental aspects of influence of the tangential canals of fluid admission in the cone angle, the distribution of mass flow rate and the mixture ratio, which are the main parameters of the injector performance. The previous knowledge of these parameters is useful before the assembly of the injection head, once knowing its behavior it is possible to distribute the injectors in a way to improve the system dynamic response and the combustion efficiency, optimizing the costs of engine adjustments in the hot tests phase.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Desintegração de um filme líquido.....	25
FIGURA 2.2 – Estágios da atomização.....	26
FIGURA 2.3 – Combustão em um motor foguete a propelente líquido.....	28
FIGURA 2.4 – Injetor do tipo jato monopropelente	30
FIGURA 2.5 – Injetor do tipo jatos colidentes bipropelente.....	31
FIGURA 2.6 – Injetor centrífugo	32
FIGURA 2.7 – Corte da disposição dos injetores no cabeçote de injeção	33
FIGURA 2.8 – Injetor centrífugo bipropelente	38
FIGURA 2.9 – Injetor centrífugo bipropelente de mistura externa	39
FIGURA 2.10 - Injetor tipo centrífugo bipropelente com mistura interna.....	40
FIGURA 2.11 – Formação do spray em injetores centrífugos bipropelentes	41
FIGURA 2.12 – Amplitude da onda de impacto em injetores de mistura interna	42
FIGURA 2.13 – Injetor jato-centrífugo.....	43
FIGURA 3.1 – Estágio de oxidante do injetor	46
FIGURA 3.2 – Perda por atrito na entrada do canal tangencial (Bazarov, 2004).....	52
FIGURA 3.3 - Estágio de combustível do injetor	55
FIGURA 3.4 – Comprimento de mistura do injetor centrífugo bipropelente	62
FIGURA 3.5 – Comprimento dos estágios de oxidante e combustível.....	64
FIGURA 3.6 – Injetor com seis canais tangenciais.....	76
FIGURA 3.7 – Injetor dimensionado com quatro canais tangenciais	80
FIGURA 3.8 – Injetor dimensionado com dois canais tangenciais.....	83
FIGURA 4.1 – Painel do equipamento de testes de injetores	85
FIGURA 4.2 – Colméia coletora de líquido.....	86

FIGURA 4.3 – Suporte de colméia e mangueiras condutoras de líquido.....	87
FIGURA 4.4 – Tubos de ensaio posicionados em seu suporte	87
FIGURA 4.5 – Equipamento de testes de injetores montado.....	88
FIGURA 4.6 – Balança digital e suporte para tubo de ensaio.....	89
FIGURA 4.7 – Espectro eletromagnético	90
FIGURA 4.8 – Intensidade de luz que atravessa a amostra	91
FIGURA 4.9 – Funcionamento do espectrofotômetro	94
FIGURA 4.10 – Espectrofotômetro modelo B442.....	95
FIGURA 4.11- Comportamento linear do espectrofotômetro.....	95
FIGURA 4.12 – Partes do injetor centrífugo bipropelente.....	96
FIGURA 4.13 – Vista em corte do injetor.....	97
FIGURA 4.14 – Dispositivo de acoplamento.....	97
FIGURA 4.15 – Injetor fabricado com seis canais tangenciais.....	99
FIGURA 4.16 – Injetor fabricado com quatro canais tangenciais	100
FIGURA 4.17 – Injetor fabricado com dois canais tangenciais	102
FIGURA 4.18 - Procedimento para medição do ângulo de cone (Garcia, 2005).....	106
FIGURA 5.1 – Superfície da distribuição mássica do injetor com seis canais	114
FIGURA 5.2 – Distribuição mássica do injetor com seis canais.....	114
FIGURA 5.3 – Superfície da distribuição mássica do injetor com quatro canais	115
FIGURA 5.4 – Distribuição mássica do injetor com quatro canais	115
FIGURA 5.5 – Superfície da distribuição mássica do injetor com dois canais.....	116
FIGURA 5.6 – Distribuição mássica do injetor com dois canais.....	116
FIGURA 5.7 - Razão de mistura experimental do injetor com seis canais	118
FIGURA 5.8 - Razão de mistura experimental do injetor com quatro canais.....	118
FIGURA 5.9 - Razão de mistura do injetor com quatro canais tangenciais.....	119

FIGURA 5.10 – Ângulo de cone do injetor com seis canais.....	121
FIGURA 5.11 – Ângulo de cone do injetor com quatro canais	122
FIGURA 5.12 – Ângulo de cone do injetor com dois canais.....	122

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Condições de projeto do estágio de oxidante do injetor do RD-109	65
TABELA 3.3 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor do RD-109	67
TABELA 3.3 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor do RD-109	68
TABELA 3.4 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor do RD-109	69
TABELA 3.5 – Comparação do estágio de oxidante	70
TABELA 3.6 – Comparação do estágio de combustível.....	70
TABELA 3.7 – Novas condições de projeto do estágio de oxidante do injetor.....	72
TABELA 3.8 – Novas condições de projeto do estágio de combustível do injetor	72
TABELA 3.9 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com seis canais	74
TABELA 3.10 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com seis canais	75
TABELA 3.10 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com seis canais	76
TABELA 3.11 – Comprimento de mistura do injetor com seis canais tangenciais	76
TABELA 3.12 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com quatro canais.....	77
TABELA 3.13 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com quatro canais	78
TABELA 3.13 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com quatro canais	79
TABELA 3.14 – Comprimento de mistura do injetor com quatro canais.....	79
TABELA 3.15 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com dois canais.....	80
TABELA 3.15 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com dois canais.....	81
TABELA 3.16 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com dois canais.....	82
TABELA 3.17 – Comprimento de mistura do injetor dimensionado com dois canais	83
TABELA 4.1 – Metrologia do injetor fabricado com seis canais tangenciais	99
TABELA 4.2 – Metrologia do injetor fabricado com quatro canais tangenciais	101
TABELA 4.3 – Metrologia do injetor fabricado com dois canais tangenciais.....	102

TABELA 4.4 – Vazão mássica nominal de água destilada.....	105
TABELA 4.5 – Incerteza dos experimentos.....	111
TABELA 5.1 – Vazões mássicas nominais, experimentais e incertezas nas medições ...	112
TABELA 5.2 – Ângulo de cone calculado para oxigênio líquido e querosene.....	120
TABELA 5.3 – Ângulo de cone calculado para água destilada	120
TABELA 5.4 – Comparação entre 2α estimado e obtido experimentalmente.....	123

Lista de Símbolos

Letras Latinas

A	Parâmetro geométrico do injetor
B	Absorvância
C	Coefficiente de redução de área
c	Concentração
d	Diâmetro
f	Área
I	Intensidade de radiação
K	Coefficiente de perda de quantidade de movimento angular
km	Razão de mistura entre oxidante e combustível
l	Comprimento
\dot{m}	Vazão mássica
MFPL	Motor foguete a propelente líquido
n	Número de canais tangenciais
P	Pressão
R	Raio do centro do injetor até a linha de centro do canal tangencial
Re	Número de Reynolds
r	Raio
T	Transmitância
t	Distância
W	Velocidade do escoamento

Letras Gregas

τ	Tempo
φ	Coeficiente de área livre do injetor
ξ	Perda hidráulica
ε	Coeficiente de absorção
ρ	Densidade do fluido
ν	Viscosidade cinemática
λ	Coeficiente de resistência de superfície
ϑ	Viscosidade dinâmica
μ	Coeficiente de descarga
ψ	Distância do encontro dos componentes
α	Razão de equivalência
2α	Ângulo de cone de saída

Subscritos

a	Axial
am	Ambiente
as	Área seca
b	Saída da tubeira
bx	Canal tangencial
c	Estágio de combustível do injetor
est	Estequiométrico
exp	Experimento
i	Ideal
in	Entrada

<i>inj</i>	Mistura total dos componentes no injetor
<i>k</i>	Câmara do injetor
<i>ks</i>	Saída da câmara do injetor
<i>mist</i>	Mistura dos componentes
<i>o</i>	Estágio de oxidante do injetor
<i>r</i>	Real
<i>rd</i>	Radial
<i>s</i>	Saída
<i>t</i>	Total
<i>u</i>	Circunferencial
<i>v</i>	Incidente
<i>x</i>	Transmitida
<i>w</i>	Equivalente
<i>y</i>	Função da geometria

Sumário

1 Introdução	20
1.1 Motivação do Trabalho	21
1.2 Objetivo	22
1.3 Estruturação da dissertação	22
2 Injetores.....	25
2.1 Atomização.....	25
2.2 Influência das propriedades do líquido na atomização.....	27
2.3 Atomização e combustão em um motor foguete a propelente líquido	27
2.4 Requisitos dos injetores.....	29
2.5 Injetores tipo jato	29
2.6 Injetores centrífugos.....	31
2.7 Injetores Jato-Centrífugo	42
3 Metodologia de cálculo.....	44
3.1 Metodologia de cálculo dos principais parâmetros do injetor centrífugo.....	44
3.1.1 Cálculo do estágio de oxidante	45
3.1.2 Cálculo do estágio de combustível.....	54
3.1.3 Cálculo do comprimento de mistura interna do injetor	62
3.1.4 Comprimento do injetor	63
3.2 Avaliação da metodologia de cálculo	65
3.2.1 Condições de projeto do motor RD-109	65
3.2.2 Parâmetros do injetor dimensionado nas condições de projeto do RD-109.....	66
3.2.3 Injetor dimensionado x Injetor utilizado no motor RD-109.....	70
3.3 Aplicação da metodologia de cálculo no dimensionamento de injetores.....	71
3.3.1 Novas condições de projeto.....	72

3.3.2 Parâmetros geométricos do injetor com seis canais tangenciais	73
3.3.3 Parâmetros geométricos do injetor com quatro canais tangenciais.....	77
3.3.4 Parâmetros geométricos do injetor com dois canais tangenciais	80
4 Descrição dos experimentos	84
4.1 Instrumentação laboratorial.....	84
4.1.1 Equipamento de testes de injetores.....	85
4.1.2 Balança de precisão	89
4.1.3 Espectrofotômetro	89
4.2 Injetores e dispositivo de acoplamento	96
4.3 Metrologia dos injetores.....	98
4.4 Preparação para realização dos experimentos	103
4.5 Realização dos experimentos	103
4.5.1 Vazão mássica	104
4.5.2 Ângulo de cone.....	106
4.5.3 Distribuição mássica.....	107
4.5.4 Razão de mistura	108
4.6 Avaliação da incerteza dos experimentos.....	109
5 Resultados	112
5.1 Vazão mássica	112
5.2 Distribuição da vazão mássica.....	113
5.3 Distribuição de razão de mistura	117
5.4 Ângulo de cone de saída	120
6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	124
6.1 Conclusões	124
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	125

Referências.....	127
Apêndice A – Projeto do injetor com 06 canais tangenciais	130
Apêndice B – Projeto do injetor com 04 canais tangenciais.....	135
Apêndice C – Projeto do injetor com 02 canais tangenciais	140
Apêndice D – Projeto do dispositivo de acoplamento	144

1 Introdução

No final do século XIX e início do século XX, apareceram os primeiros estudos sobre propulsão de veículos espaciais. O cientista russo Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky publicou em 1903 o primeiro estudo acadêmico sobre sistemas propulsivos aeroespaciais, foi o primeiro a calcular que a velocidade de escape da Terra para a órbita era de 8 km/s e que para atingi-la era necessário um veículo de múltiplos estágios. Porém, foi o engenheiro e físico experimental Robert Hutchings Goddard o primeiro a desenvolver um veículo que utilizava motor foguete a propelente líquido. O primeiro voo ocorreu em 16 de março de 1926 em Auburn, Massachusetts, EUA, onde o veículo atingiu uma altura de 12,5 metros em um voo com duração de 2,5 segundos percorrendo 56 metros. Paralelamente na Alemanha, o cientista e pesquisador Wernher Von Braun desenvolvia seus estudos que iria possibilitar mais tarde a construção de um motor foguete a propelente líquido capaz de impulsionar a bomba V2.

Ao final da guerra essa tecnologia passou a ser conhecida pelos aliados e pelos Russos, iniciando então a chamada corrida espacial, onde o domínio da tecnologia de propulsão líquida era de vital importância.

Os russos enviaram à Alemanha em 08 de agosto de 1945 o engenheiro Serguei Pavlovich Korolev para avaliação e restauração dos mísseis V2. Korolev conduziu o desenvolvimento de um motor como base a tecnologia utilizada na bomba V2, surgindo então o motor foguete a propulsão líquida RD-100, que foi o precursor do motor RD-109 e de outros motores de alto desempenho.

O motor RD-109 foi desenvolvido sob o comando do pesquisador russo Glushko entre 1957 e 1960, para ser o motor de terceiro estágio da família veículos lançadores Vostok. O veículo lançador Vostok I levou o primeiro ser humano ao espaço, em 12 de

outubro de 1961 transportou o cosmonauta russo Yuri Gagarin a uma órbita a 315 km de altitude da superfície da terra. Outro importante feito desta família de veículos foi em 16 de julho de 1963 quando o veículo Vostok VI lançou em órbita Valentina Tereshkova, a primeira mulher levada ao espaço.

O motor RD-109 serviu como base para o motor RD-119, utilizado no veículo lançador Kosmos. O veículo Soyuz, que é utilizado até os dias atuais, utiliza no terceiro estágio o motor RD-110 que surgiu através de evoluções do motor RD-109. Foi o veículo Soyuz que levou ao espaço Marcos Pontes, o primeiro cosmonauta brasileiro.

Com o desenvolvimento destes motores, observou-se experimentalmente que o sistema de injeção tem grande influência na eficiência e estabilidade dinâmica do motor foguete a propelente líquido, o que motivou anos de pesquisa e desenvolvimento, resultando em dados estatísticos e conhecimentos empíricos sobre o sistema de injeção.

1.1 Motivação do Trabalho

O Brasil busca o domínio de tecnologias na área aeroespacial através do Programa Nacional de Atividades Espaciais, que dentre outras diretrizes, prevê o desenvolvimento de tecnologia de propulsão líquida para incorporação em futuros lançadores. Inicialmente para integrar os propulsores superiores e, subsequentemente, para integrar os grandes propulsores de estágios intermediários e inferiores, o que possibilita maior precisão de satelização e crescimento de carga útil dos lançadores. Uma possível aplicação da tecnologia de propulsão líquida poderá resultar, em breve, na substituição do terceiro e quarto estágios do veículo lançador de satélites VLS-1, constituindo-se num novo veículo lançador planejado para ser o primeiro da futura geração de lançadores como prevê o

Projeto Cruzeiro do Sul, que é composto pela família de veículos lançadores Alfa, Beta, Gama, Delta e Epsilon.

Nesse contexto, o domínio da tecnologia associada a motor foguete a propelente líquido tem grande importância para o Programa Espacial Brasileiro, para isso se faz necessário, entre outros, o conhecimento detalhado do sistema de injeção de propelentes e, mais especificamente, dos injetores devido suas influências na combustão que podem possibilitar alta confiabilidade e desempenho do motor.

1.2 Objetivo

Propor uma metodologia de cálculo para dimensionamento de injetores bipropelentes do tipo líquido-líquido utilizado em MFPL, validada através do dimensionamento de um injetor para o motor RD-109, que possui geometria conhecida, e obter experimentalmente seus principais parâmetros de desempenho.

Estudar a influência dos canais tangenciais de admissão de fluido do injetor na mistura dos propelentes, ângulo do cone de pulverização e distribuição da vazão mássica, que são os principais parâmetros de desempenho do injetor.

1.3 Estruturação da dissertação

Este trabalho é dividido em seis capítulos da seguinte forma:

- 1 Introdução;
- 2 Injetores;
- 3 Metodologia de cálculo;

4 Descrição dos experimentos;

5 Resultados;

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Na introdução é apresentada uma visão geral da dissertação, a motivação do trabalho, objetivo e estruturação da dissertação.

Para propiciar ao leitor maior compreensão sobre a utilização de injetores em um motor foguete a propelente líquido e apresentar importantes definições que serão utilizadas nos capítulos subseqüentes, o capítulo 2 apresenta o processo de atomização, a influência das propriedades do líquido nesse processo, a atomização e a combustão em um motor foguete a propelente líquido e os requisitos dos injetores. A injeção em um motor foguete pode ocorrer com diversos sistemas de injeção compostos por diferentes tipos de injetores, para melhor compreensão dos injetores esse capítulo apresenta os principais injetores utilizados.

No capítulo 3 propõe-se uma metodologia de cálculo dos principais parâmetros geométricos e de desempenho de um injetor centrífugo bipropelente líquido-líquido baseada na literatura russa, principalmente em Kessaev (2006) e Bazarov (2004). Em seguida a metodologia é avaliada e três injetores com diferentes números de canais tangenciais são dimensionados.

O capítulo 4 apresenta a estrutura utilizada para os experimentos para obtenção dos parâmetros de desempenho dos injetores dimensionados no capítulo 3 e descreve os procedimentos experimentais. O projeto dos injetores encontra-se nos Apêndices A,B e C.

Os resultados obtidos de parâmetros de desempenho através dos experimentos são descritos no capítulo 5 em forma de gráficos e tabelas, juntamente com análises e comentários. Os resultados obtidos para os três injetores permitem analisar a influência do

número de canais tangenciais nos parâmetros de desempenho de um injetor centrífugo bipropelente líquido-líquido.

As conclusões da dissertação e as propostas para trabalhos futuros são feitas no capítulo 6.

2 Injetores

Neste capítulo são discutidos o processo de atomização e os principais injetores utilizados em motor foguete a propelente líquido.

2.1 Atomização

O processo de atomização consiste basicamente em aumentar a área superficial do líquido. A atomização é normalmente acompanhada pela formação de um filme líquido. Forças aerodinâmicas atuam na superfície do líquido promovendo perturbações que se propagam em forma de onda e induzem instabilidade ao filme líquido. O rompimento do filme e a formação dos ligamentos ocorrem quando a magnitude da força de perturbação exceder a força de tensão superficial. No processo de desintegração, onde os ligamentos são fragmentados em gotas, são produzidas muitas gotas de maior dimensão que são instáveis e posteriormente são rompidas em pequenas gotas ou gotículas. A FIG. 2.1 ilustra o processo de atomização.

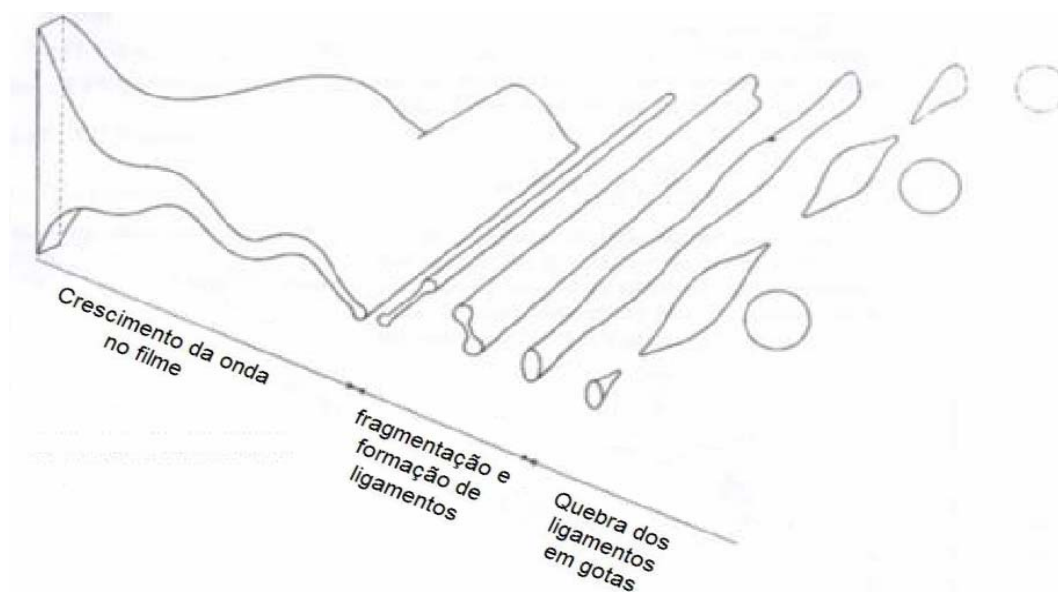


FIGURA 2.1 – Desintegração de um filme líquido (Lefebvre, 1989)

Segundo Lefebvre (1989) o processo de atomização, ilustrado na FIG. 2.2, apresenta os vários estágios de spray com o aumento da pressão de injeção, conforme segue:

1. O líquido goteja pelo orifício (estágio gotas);
2. O líquido deixa o injetor como um filme distorcido (lápiz distorcido);
3. Ao sair do injetor o líquido forma um cone, mas é contraído pelas forças de tensão superficial formando uma bolha fechada (estágio cebola);
4. A bolha se abre e assume o formato oco de uma tulipa que termina de forma desigual, onde o líquido é desintegrado em gotas de maior diâmetro (estágio tulipa);
5. A superfície curva se desfaz formando um filme cônico. Como o filme expande a espessura diminui, tornando-se instável rompendo os ligamentos e desintegrando o filme em gotas (spray totalmente desenvolvido).

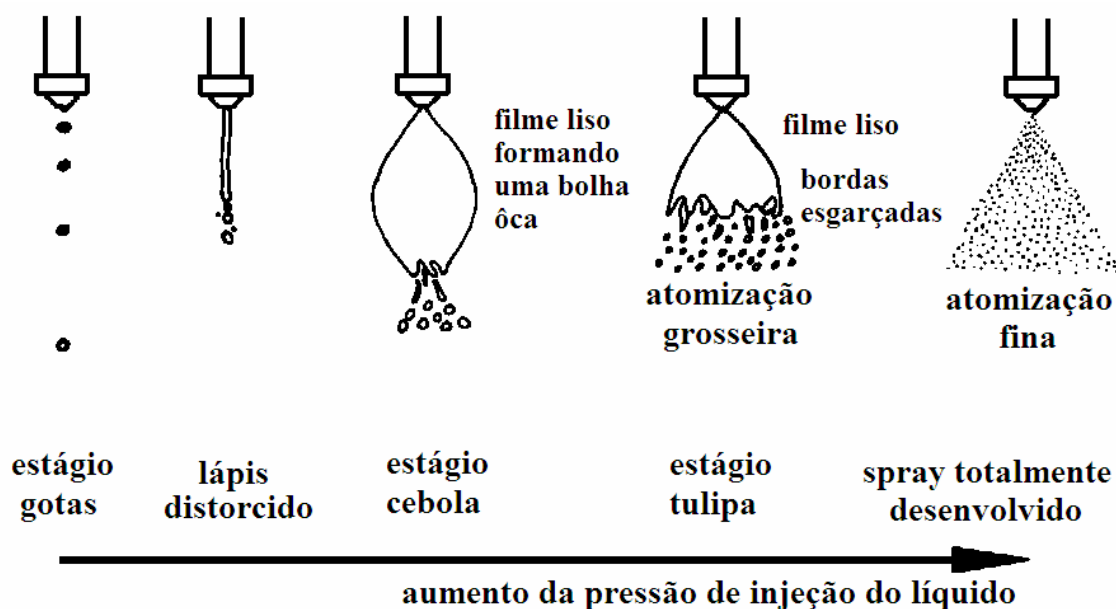


FIGURA 2.2 – Estágios da atomização (Lefebvre, 1989)

2.2 Influência das propriedades do líquido na atomização

As características de atomização são fortemente influenciadas pelas seguintes propriedades do líquido: densidade, viscosidade e tensão superficial. Teoricamente a vazão em um injetor varia com a raiz quadrada da densidade do líquido.

A tensão superficial é importante na atomização porque representa a força que resiste a formação de uma nova área superficial. A força mínima requerida para atomização é igual a tensão superficial multiplicada pelo aumento na área superficial do líquido. Geralmente a tensão superficial é encontrada na faixa entre $0,073 \text{ kg} / \text{s}^2$ para água e $0,027 \text{ kg} / \text{s}^2$ para produtos derivados de petróleo (Lefebvre, 1989).

A viscosidade afeta a distribuição do tamanho de gotas no spray, a vazão e o formato do spray. O aumento da viscosidade reduz o número de Reynolds e retarda alguma instabilidade natural do jato, o que atrasa a desintegração e aumenta o tamanho das gotas no spray.

2.3 Atomização e combustão em um motor foguete a propelente líquido

A combustão em motores foguete a propelentes líquidos ocorre em geradores de gás e em câmaras de combustão, e sua eficiência depende de uma atomização adequada para aumentar a área superficial dos propelentes e assim alcançar altas taxas de evaporação.

A câmara de combustão é um reator desenvolvido para transformar a energia química dos propelentes em energia térmica de combustão. Segundo Kessaev (2006) essa transformação é feita em 3 fases distintas a saber.

Na primeira fase, chamada de zona de vaporização, os propelentes são injetados na câmara através do cabeçote de injeção. Para que ocorram as reações químicas os propelentes injetados são atomizados, aquecidos e evaporados e os produtos dessa vaporização devem ser misturados em níveis moleculares. O aquecimento e evaporação dos componentes injetados dependem da relação entre a massa e a troca de calor que por sua vez depende da superfície das gotas. Nas gotas pequenas o tempo de vaporização é menor.

Na segunda fase, chamada de zona de queima, ocorre a conclusão da queima da mistura dos reagentes. O aumento de temperatura no interior da câmara aumenta a velocidade de reação o que diminui o tempo de conclusão da queima.

A terceira fase é chamada de zona de mistura dos produtos de combustão e ocorre após a zona de queima. A mistura dos produtos de combustão ocorre devido à turbulência no interior da câmara. A FIG. 2.3 ilustra o processo de combustão em um motor foguete a propelente líquido.

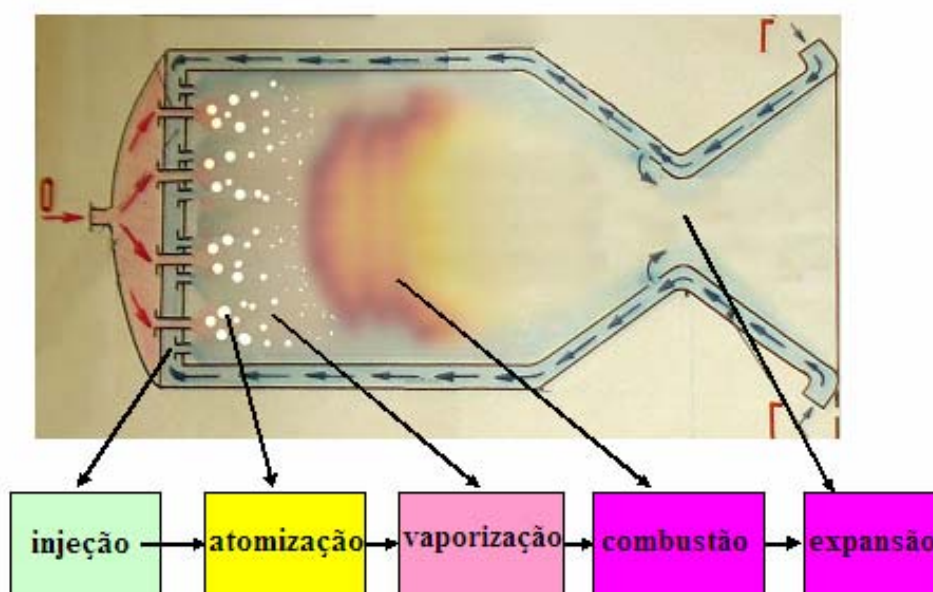


FIGURA 2.3 – Combustão em um motor foguete a propelente líquido (Gregoryev, 2007)

2.4 Requisitos dos injetores

Um injetor ideal deve possuir as seguintes características (Lefebvre, 1989):

1. Prover boa atomização em uma larga faixa de vazões mássicas;
2. Resposta rápida para variações na vazão mássica;
3. Livre de instabilidades no escoamento;
4. Baixo custo;
5. Leve;
6. Boa repetibilidade;
7. Fácil manutenção;
8. Baixa suscetibilidade de avaria durante a fabricação e instalação;
9. Baixa suscetibilidade a bloqueio por contaminantes.

Os principais tipos de injetores utilizados em motor foguete a propelente líquido são: jato, centrífugos e jato-centrífugo. Estes injetores podem ser monopropelentes ou bipropelentes.

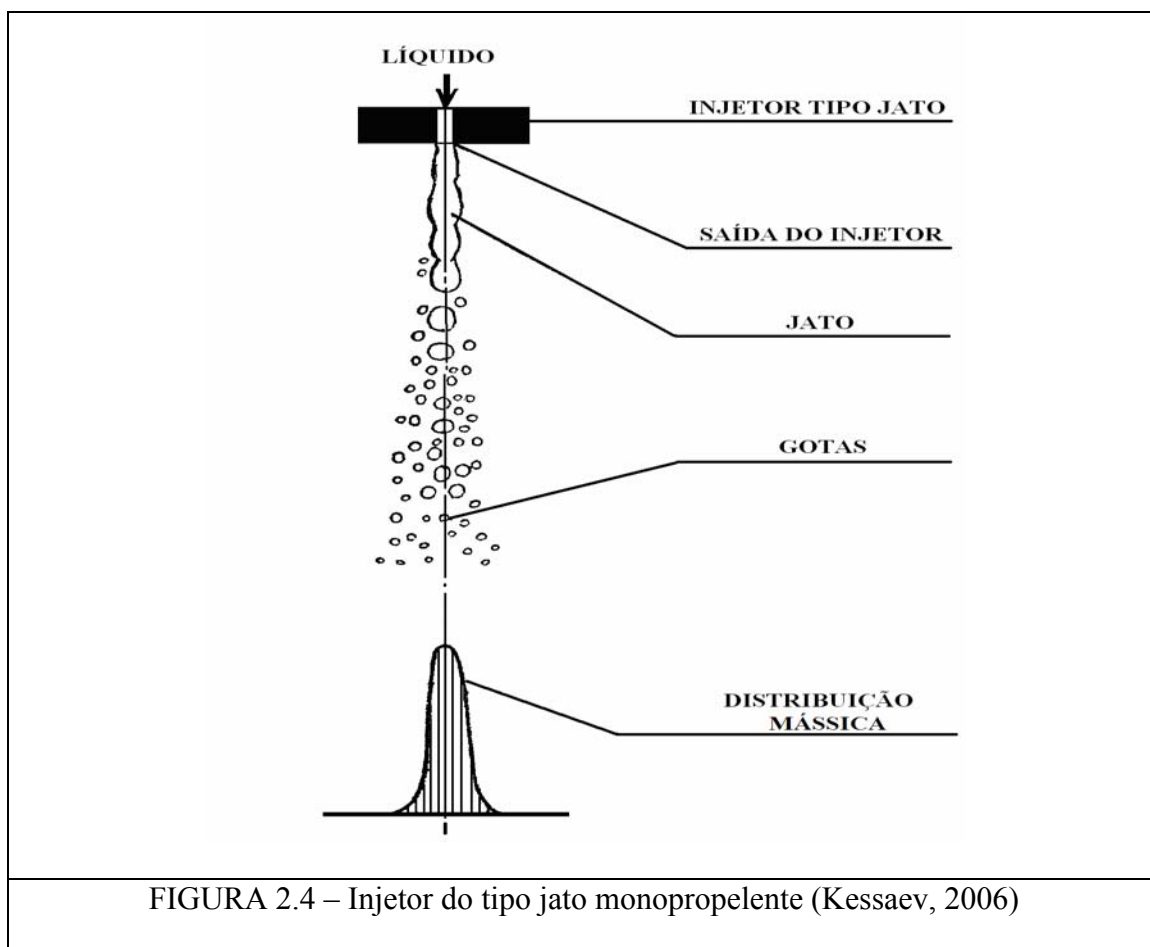
2.5 Injetores tipo jato

Injetor tipo jato é um dispositivo que converte a energia potencial do líquido em energia cinética do jato. Consiste em um orifício por onde o líquido é injetado sob pressão. O líquido sai do orifício em forma de jato e é desintegrado em gotas. Esse tipo de injetor pode ser monopropelente ou bipropelente.

Injetores monopropelentes podem ser utilizados em motores de pequeno empuxo e em geradores de gás para motores que utilizam turbobomba. Os monopropelentes líquidos

são substâncias que se decompõem quando aquecidas, pressurizadas ou bombeadas através de um catalisador, gerando grande quantidade de gases em alta temperatura.

Entre as principais vantagens desse tipo de sistema de injeção destaca-se a simplicidade de desenvolvimento e de alimentação do propelente, além do baixo custo em relação ao bipropelente. A FIG. 2.4 ilustra a atomização em um injetor do tipo jato monopropelente e sua distribuição mássica típica.



O injetor do tipo jatos colidentes bipropelente tem a função de injetar na câmara de combustão dois componentes, o oxidante e o combustível. Esse tipo de injetor pode ser construído fazendo-se dois orifícios com ângulos determinados na placa de injeção com o objetivo de os jatos de oxidante e combustível colidirem em um ponto determinado. Nesse ponto se garante a correta mistura dos componentes.

Neste tipo de injetor pode-se destacar como desvantagem sua sensibilidade às variações de pressão, já que se houver variação de pressão na alimentação de um dos jatos ou variações diferentes em ambos, os jatos não irão se encontrar no ponto determinado gerando uma mistura incorreta dos componentes o que o torna muito sensível dinamicamente. A FIG. 2.5 exemplifica um injetor tipo jatos colidentes bipropelente.

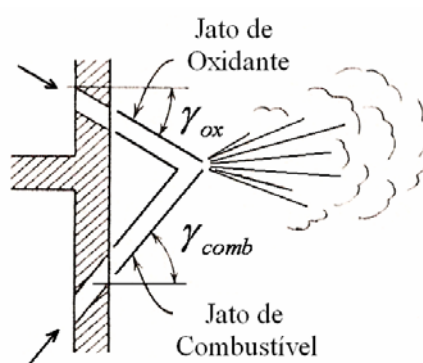


FIGURA 2.5 – Injetor do tipo jatos colidentes bipropelente (Gregoryev, 2007)

2.6 Injetores centrífugos

A necessidade de minimizar o volume da câmara de combustão pode ser obtida através da redução do comprimento da zona de queima e para isso é necessário o aumento do ângulo de abertura do spray. Por exemplo, em câmaras de combustão para turbinas a gás esta necessidade é satisfeita através de um ângulo de abertura próximo a 90° (Lacava *et al*, 2004). A simples passagem sob pressão do líquido por um orifício (injetor tipo jato) não é suficiente para que essa condição seja atingida. Desta forma, dispositivos mais elaborados são desenvolvidos e entre eles o injetor centrífugo.

Em injetores centrífugos o líquido é alimentado através dos canais tangenciais na câmara do injetor adquirindo movimento rotativo com elevada velocidade angular. A medida que se caminha para o orifício de saída, a área da seção transversal da câmara vai

reduzindo, acelerando o movimento rotativo. Conduzido pela ação da força centrífuga o escoamento de líquido se desenvolve próximo a parede da câmara, surge uma região de baixa pressão no centro da câmara do injetor e, como consequência, o gás externo acaba penetrando e formando um núcleo de gás (“*gas core*”) conforme ilustra a FIG.2.6. Desta forma, o líquido deixa o orifício de saída com um escoamento semelhante a uma folha cônica oca, resultado de uma combinação entre o escoamento axial e tangencial. Rapidamente essa folha cônica oca se rompe em finas gotículas.

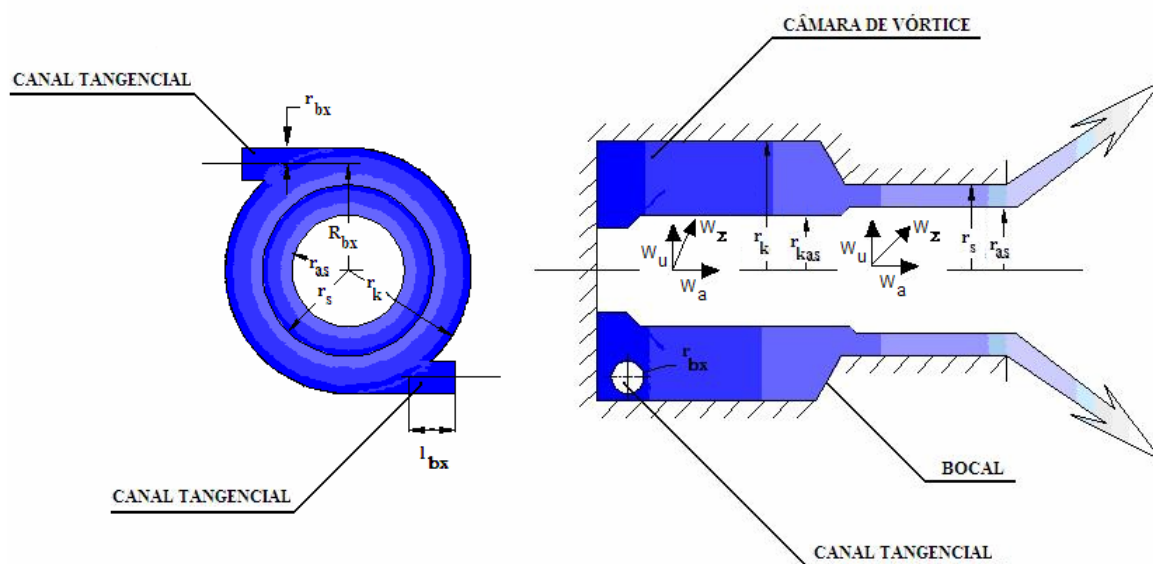


FIGURA 2.6 – Injetor centrífugo

Este tipo de injetor é utilizado em turbina a gás e motor foguete a propelente líquido e tem como principais vantagens:

- A possibilidade de obter maior vazão mássica por injetor, quando comparado com o injetor tipo jato, promovendo a mesma eficiência de combustão e diminuindo assim o número de injetores;
- Preservar o cabeçote de injeção contra sua exposição a alta temperatura através do filme cônico formado na saída do injetor;

- Melhor estabilização de chama devido à recirculação no escoamento dos produtos quentes de combustão das zonas de evaporação e de ignição;
- Câmaras de combustão com injetores centrífugos apresentam alta eficiência e melhor estabilidade de combustão quando comparadas com câmaras que utilizam injetores tipo jato.

Em MFPL, os injetores centrífugos após fabricados são ensaiados individualmente. Nestes ensaios são verificados a vazão mássica de oxidante e combustível, a razão de mistura, o ângulo de cone do spray e a distribuição da mistura para posteriormente serem montados e brasados ao cabeçote de injeção. A FIG. 2.7 apresenta os injetores centrífugos bipropelente dispostos no cabeçote de injeção.

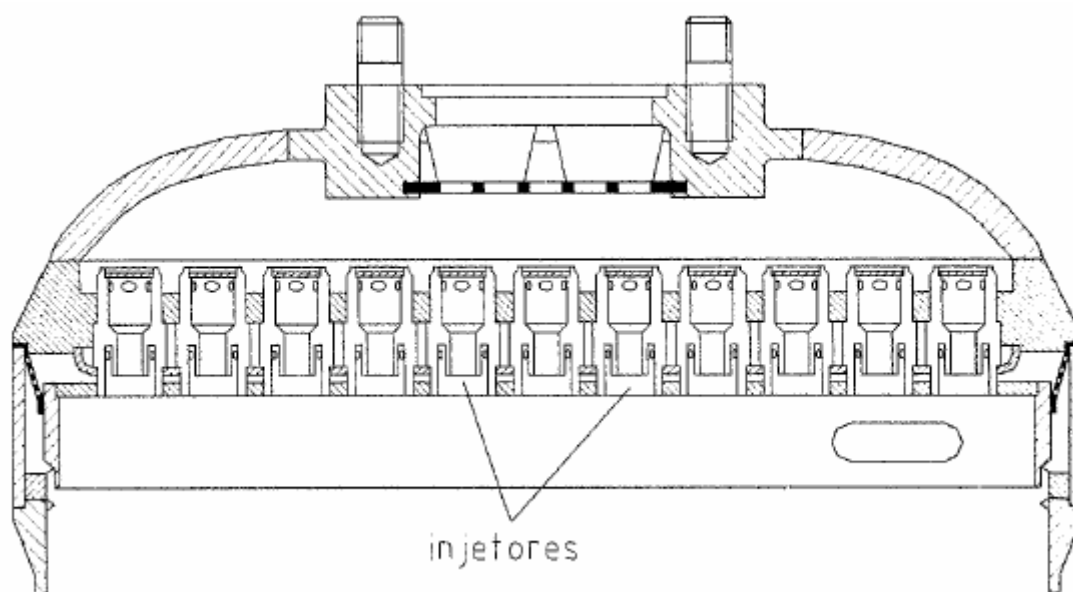


FIGURA 2.7 – Corte da disposição dos injetores no cabeçote de injeção

O cabeçote de injeção é projetado para injetar na câmara de combustão uma mistura de combustível-oxidante na proporção correta pré-definida, para promover rapidamente a mistura entre os propelentes em proporção desejada.

Em geral, o cabeçote de injeção é feito como uma unidade individual, pois requer condições tecnológicas de brasagem e de tratamento térmico diferentes daquelas usadas para a fabricação da câmara de combustão e tubeira. Os injetores além de fornecerem a mistura à câmara de combustão também são importantes elementos estruturais para o cabeçote de injeção.

Os injetores centrífugos são mais complicados dinamicamente que os injetores jato, que em muitos casos são considerados como um simples canal. O injetor centrífugo inclui uma combinação de canal (tangencial), elemento de volume e energia cinética (câmara de vórtice), elemento de transporte (Bocal).

Os canais tangenciais e os elementos de volume e de transporte interagem entre si e mudanças em um deles leva, freqüentemente, a mudanças indesejáveis de escoamento dos demais. O comportamento do escoamento na câmara de vórtice, por exemplo, pode influenciar no escoamento através do bocal e prejudicar o desempenho do injetor.

Em injetores centrífugos, o comprimento do filme cônico oco diminui com o aumento do seu diâmetro, de acordo com a conservação de massa. Este filme é destruído em ligamentos e gotas devido a instabilidade hidráulica ou devido à forças aerodinâmicas do escoamento do gás que flui com velocidade através do filme líquido. Ao longo da superfície livre de rotação do líquido toda energia potencial, em forma de pressão, é transformada em energia cinética de movimento do líquido de acordo com a equação:

$$W_t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_t}{\rho}} \quad (2.1)$$

Onde:

W_t = velocidade total do líquido

ΔP_t = queda de pressão total no injetor

ρ = densidade do líquido

A pressão nas paredes da câmara de vórtice depende da aceleração centrífuga de rotação do líquido, que pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$P_k = \rho \int_{r_k}^{r_{kas}} \frac{W_u^2}{r} . dr \quad (2.2)$$

Onde:

P_k = pressão nas paredes da câmara de vórtice

W_u = velocidade circunferencial

r_k = raio da câmara de vórtice

r_{kas} = raio de área seca na câmara de vórtice

A queda de pressão total aplicada no injetor centrífugo é a soma da queda de pressão nos canais tangenciais com a queda de pressão na câmara de vórtice. Na extremidade fechada da câmara de vórtice, onde os canais tangenciais são usualmente posicionados, as velocidades axial (W_a) e radial (W_{rd}) são nulas, e a velocidade circunferencial W_u é igual a velocidade total do líquido W_t :

$$W_t = \sqrt{W_a^2 + W_u^2 + W_{rd}^2} \quad (2.3)$$

A medida que o escoamento se desenvolve no interior da câmara de vórtice a velocidade axial não é nula e a velocidade circumferencial diminui em relação ao seu valor na entrada da câmara. Assumindo que há conservação de quantidade de movimento na direção circumferencial, $W_u \cdot r = \text{cte}$, onde r é o raio do “*gas core*” e definido como raio de área seca do injetor.

Ao sair dos canais tangenciais e entrar na câmara o fluido começa a se deslocar em movimento centrífugo, concentrando o escoamento nas periferias da câmara do estágio de oxidante o que faz surgir na região central da câmara uma área conhecida como área seca do estágio de oxidante do injetor (r_{aso}), mostrado a FIG. 3.1. Considera-se como hipótese que na área seca do estágio de oxidante do injetor não ocorre passagem de fluido.

A diminuição da velocidade circumferencial aumenta o raio de área seca e por consequência a espessura do filme líquido diminui. O mesmo processo ocorre quando o escoamento passa através do bocal, onde ocorre uma redução da seção transversal, o que acelera o escoamento e para manter $W_u \cdot r = \text{cte}$ o raio de área seca aumenta, reduzindo a espessura do filme líquido, conforme ilustra a FIG.2.6. A velocidade radial do escoamento ao longo do interior do injetor pode ser desprezada.

O coeficiente de área molhada (φ) que é um importante parâmetro para determinar o coeficiente de descarga (μ) pode ser obtido pela seguinte relação geométrica:

$$\varphi = 1 - \frac{r_{as}^2}{r_s^2} \quad (2.4)$$

Segundo Kessaev (2006), experimentalmente obteve-se que o coeficiente de descarga μ se relaciona com o coeficiente de área molhada φ pela seguinte equação:

$$\mu = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\varphi}{2 - \varphi}} \quad (2.5)$$

Alguns parâmetros são expressos de forma adimensional, entre eles o principal é o parâmetro geométrico característico (A) que relaciona os principais raios e número de canais tangenciais de um injetor centrífugo:

$$A = \frac{R_{bx} \cdot r_s}{n \cdot r_{bx}^2} \quad (2.6)$$

Os injetores centrífugos podem ser monopropelentes ou bipropelentes. Os injetores centrífugos monopropelentes são amplamente usados em geradores de gás de motores que utilizam turbobomba. Esses injetores também podem ser utilizados em cabeçotes de injeção como injetores periféricos, com o objetivo de se injetar apenas um componente, normalmente o combustível, formando um filme de combustível na parede interna da câmara de combustão, conhecido como “film cooling layer”, para ajudar na refrigeração da câmara de combustão.

Os injetores centrífugos bipropelentes são muito utilizados em motores russos onde a injeção dos componentes, oxidante e combustível, ocorre simultaneamente no injetor. Esse tipo de injetor possui duas câmaras de vórtices com canais tangenciais distintos para

cada uma delas por onde cada componente é admitido. Em cada câmara é admitido apenas um componente. Segundo Gregoryev (2007), baseado em dados experimentais, para obter mistura rápida, atomização mais eficiente e melhor resposta dinâmica do injetor, o componente com maior vazão mássica deve ser injetado na câmara interna do injetor e o componente com menor vazão mássica injetado na câmara externa.

A FIG. 2.8 ilustra um injetor centrífugo bipropelente, o corte A-A mostra os canais tangenciais de entrada da câmara interna e o corte B-B os canais da câmara externa.

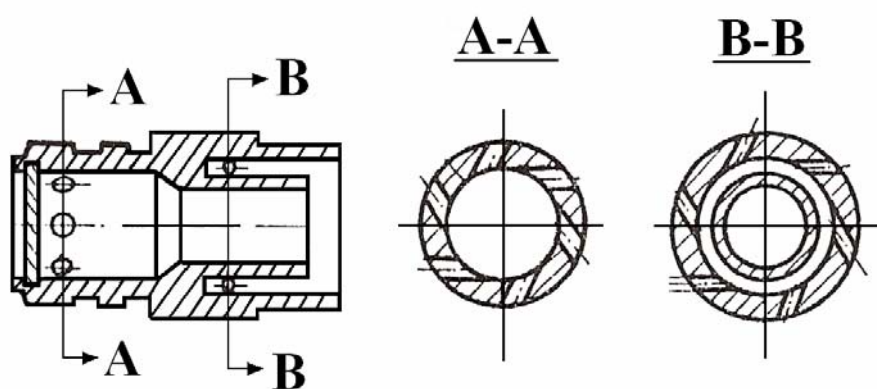


FIGURA 2.8 – Injetor centrífugo bipropelente

Neste tipo de injetor os componentes, que são admitidos separadamente em cada câmara do injetor, são misturados para sua posterior atomização e essa mistura pode ocorrer dentro do próprio injetor ou fora dele.

Se a mistura ocorrer fora do injetor ele é denominado injetor centrífugo bipropelente de mistura externa, e nessa configuração os dois filmes cônicos formados pelo líquido ao sair das câmaras interna e externa encontram-se fora do injetor onde os filmes se fundem e formam um único filme.

Sivakumar e Raghunandan (1998) estudaram experimentalmente a interação entre os dois filmes líquidos em um injetor centrífugo bipropelente líquido-líquido e sua

influência nas características do spray. Eles observaram que o processo de fusão dos filmes líquidos é determinado pela diferença de pressão entre os filmes, essa diferença de pressão se origina pela diferença na quantidade de movimento entre os escoamentos dos filmes. Observaram também que o filme líquido resultante do processo de fusão apresenta histerese o que altera alguns parâmetros do spray: ângulo de cone e comprimento do spray, desintegração do filme e comportamento da atomização. Essas alterações podem influenciar fortemente a eficiência de combustão. A FIG. 2.9 ilustra um injetor centrífugo bipropelente de mistura externa.

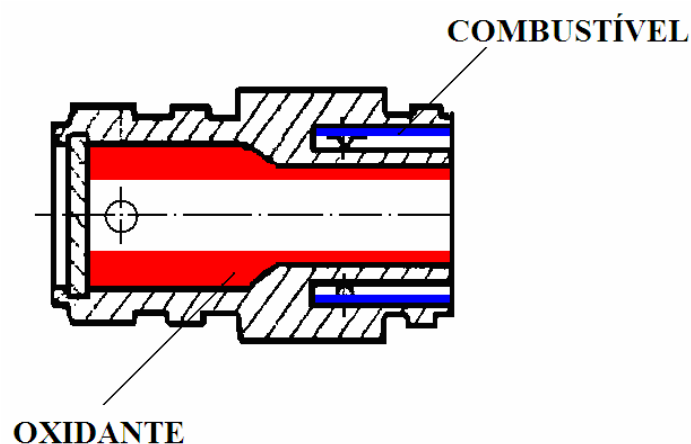


FIGURA 2.9 – Injetor centrífugo bipropelente de mistura externa

Quando a mistura ocorre dentro do injetor ele é chamado de injetor centrífugo bipropelente de mistura interna, essa configuração não é recomendada para motores que utilizam propelentes hipergólicos, pois esses propelentes podem entrar em combustão espontânea no interior do injetor. Na configuração mistura interna o filme cônico que sai da câmara interior encontra com o filme cônico que sai da câmara exterior dentro do injetor. Esse encontro ocorre a uma distância ψ da saída da câmara interior e desse ponto de encontro até o final do injetor é o comprimento l_{mist} onde ocorre a mistura dos

componentes. A distância entre o final da câmara interior e o final da câmara exterior é chamada de comprimento total de mistura (l_{inj}), como representado na FIG. 2.10.

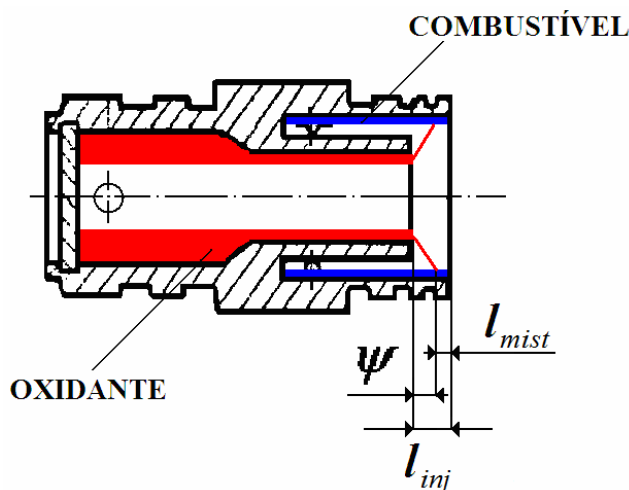


FIGURA 2.10 - Injetor tipo centrífugo bipropelente com mistura interna

O tempo de permanência da mistura dentro do injetor é importante para determinar a qualidade da mistura. Se o tempo de permanência for muito longo pode ocorrer combustão dentro do injetor e se for muito curto pode ocorrer uma mistura deficiente diminuindo a eficiência de combustão.

Kim *et al* (2007) estudaram experimentalmente os efeitos do comprimento de mistura nas características do spray. Observou-se que o injetor de mistura interna apresenta diminuição considerável no ângulo de cone e aumento no comprimento filme cônico oco antes de seu rompimento, quando comparado com o injetor de mistura externa, devido a diminuição na velocidade circunferencial ocasionada pela colisão do escoamento interno com o escoamento externo, conforme pode ser observado na FIG. 2.11.

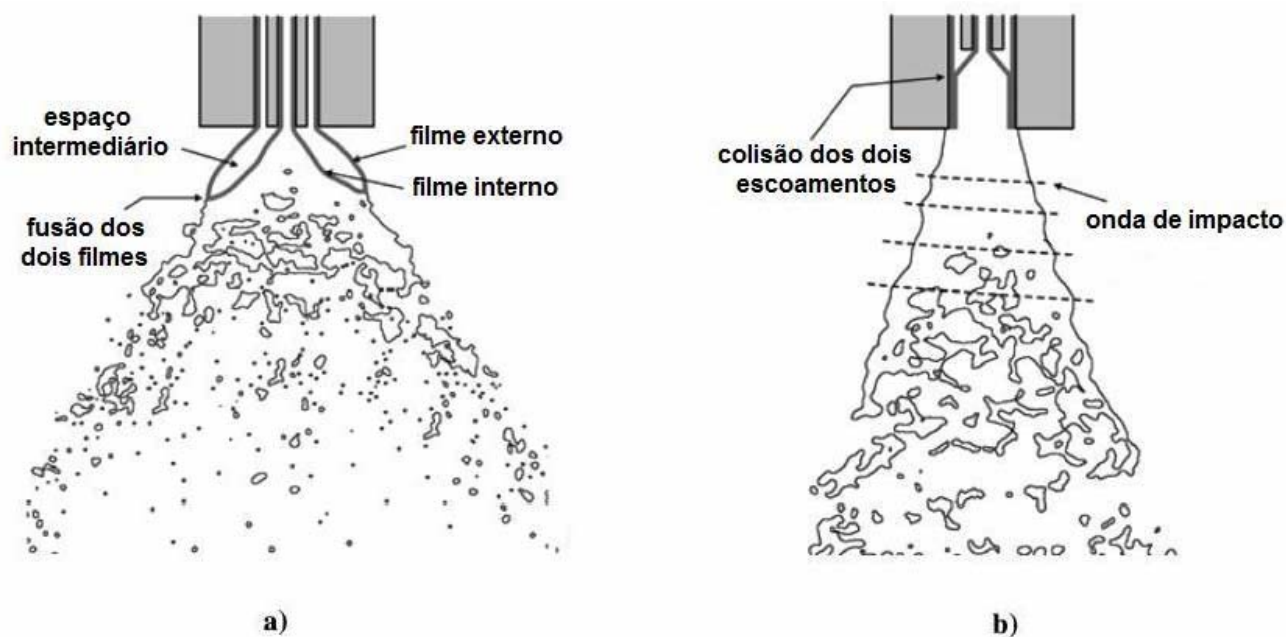


FIGURA 2.11 – Formação do spray em injetores centrífugos bipropelentes (Kim, 2007)

a) mistura externa

b) mistura interna

A colisão entre os escoamentos ocorre no comprimento total de mistura (l_m) e devido ao choque dos escoamentos com a parede uma onda de impacto se forma. A amplitude dessa onda de impacto diminui gradualmente enquanto o escoamento resultante da colisão flui ao longo do comprimento de mistura (l_{mist}), devido à ação da viscosidade dos fluidos que atenuam a amplitude da perturbação gerada entre os escoamentos, conforme ilustra a FIG. 2.12. A diminuição da amplitude dessa perturbação aumenta o comprimento do filme líquido.

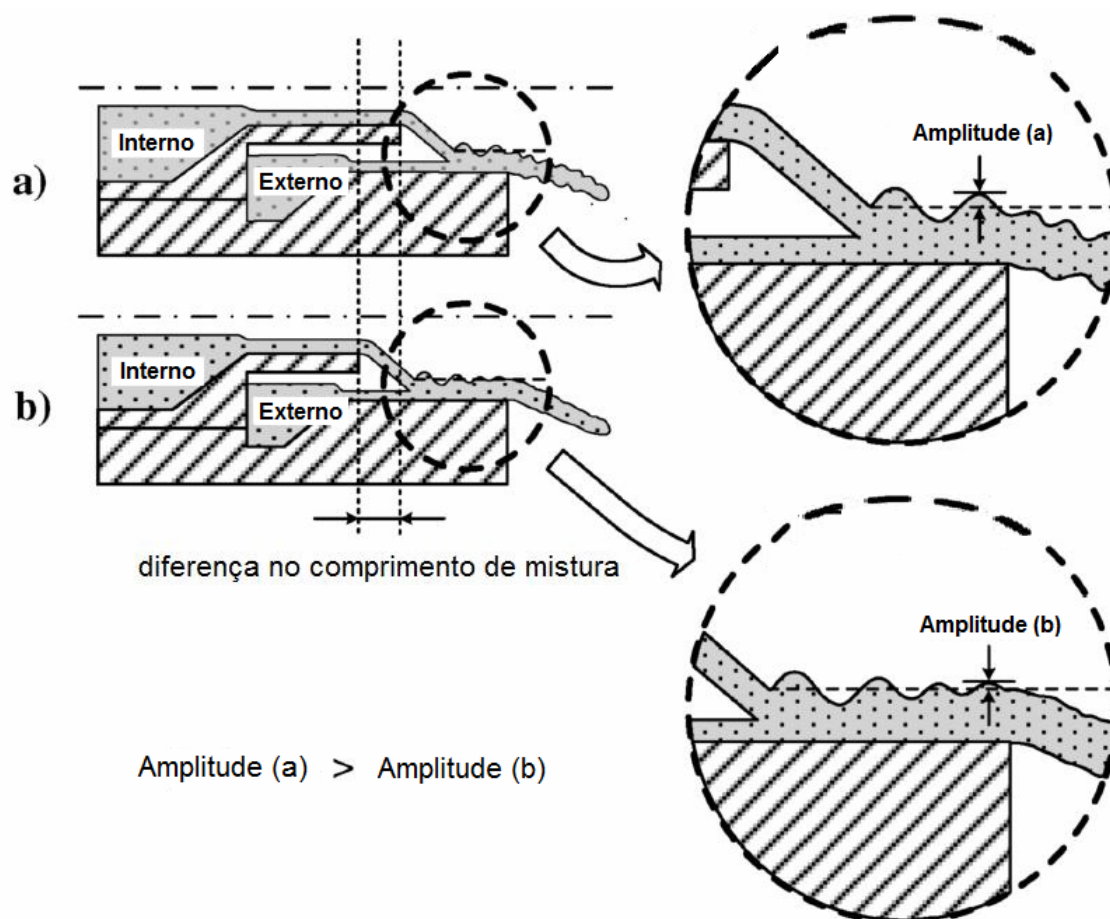


FIGURA 2.12 – Amplitude da onda de impacto em injetores de mistura interna

a) comprimento de mistura menor b) comprimento de mistura maior

2.7 Injetores Jato-Centrífugo

Esse injetor, como o próprio nome diz, é uma combinação do injetor tipo jato com o injetor centrífugo pode ser utilizado na configuração gás-líquido. A mistura dos componentes ocorre na parte jato do injetor que utiliza a energia cinética do gás juntamente com a energia cinética do líquido para formar a mistura. O líquido que é injetado na parte jato desse tipo de injetor representa de 85 a 90% da vazão mássica de líquido a ser injetado na câmara através do injetor. O líquido é injetado com ângulo que pode variar de 30 a 90° e esse ângulo influencia na relação cinética de velocidades entre o

líquido e o gás e é através dessa relação que se determina se ocorrerá uma boa mistura (Elliot, 2007).

Os 10 a 15% restantes da vazão mássica de líquido, utilizados para refrigerar o injetor, são injetados através dos canais tangenciais da parte centrífuga do injetor, que na saída de sua câmara irão se encontrar com a mistura já formada dentro da parte jato do injetor em uma configuração de mistura interna.

A principal vantagem deste tipo de injetor é possibilitar a injeção de altas vazões de propelentes nas fases líquida e gasosa ou em motores que operam em ciclo fechado. Um exemplo desse tipo de injetor, que é utilizado no motor russo RD-170, que pode ser visualizado na FIG. 2.13.

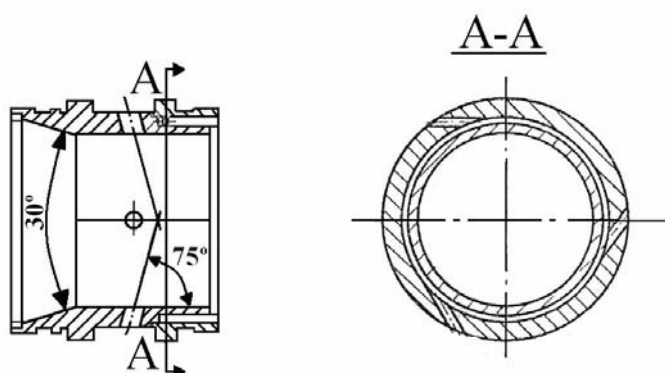


FIGURA 2.13 – Injetor jato-centrífugo

3 Metodologia de cálculo

Neste capítulo é proposta uma metodologia de cálculo para os principais parâmetros geométricos e de desempenho de um injetor centrífugo bipropelente baseada na literatura russa, principalmente em Kessaev (2006) e Bazarov (2004). Em seguida, aplica-se a metodologia de cálculo no dimensionamento de um injetor com seis canais tangenciais para as condições de projeto do motor RD-109. Compara-se o resultado obtido através dos cálculos com os parâmetros geométricos do injetor real para se obter a validação da metodologia. Após a validação dos cálculos são dimensionados três injetores para novas condições de projeto (com seis, quatro e dois canais tangenciais), para posterior análise experimental da influência do número de canais nos parâmetros desempenho.

3.1 Metodologia de cálculo dos principais parâmetros do injetor centrífugo

Para o cálculo dos principais parâmetros geométricos de um injetor centrífugo bipropelente líquido-líquido, deve-se considerá-lo como se fossem dois injetores monopropelentes distintos, um de combustível e outro de oxidante. Cada injetor monopropelente é considerado como um estágio do injetor bipropelente. Inicialmente, calcula-se cada estágio como se trabalhasse com fluido ideal, desconsiderando os efeitos da viscosidade do fluido e as perdas por ela geradas. Posteriormente, os resultados são corrigidos considerando os efeitos viscosos.

As perdas em um injetor centrífugo são devidas ao atrito nos canais tangenciais de entrada de fluido e também devido à influência da viscosidade do líquido no escoamento em vórtice no interior das câmaras do injetor.

As condições de projeto do motor que devem ser conhecidas pelo projetista para aplicação da metodologia de cálculo são: as variações de pressão entre a entrada e a saída

de cada estágio do injetor, vazão mássica requerida em cada estágio, densidade, tensão superficial, viscosidade cinemática, viscosidade dinâmica do fluido e número de canais tangenciais de entrada de cada estágio.

Com base nas condições acima, o projetista deverá aplicar uma seqüência de equações e arbitrar o raio dos canais tangenciais e os raios de entrada e de saída da câmara do injetor, até que ocorra convergência dos valores arbitrados. A convergência ocorre quando os valores de vazão mássica em cada estágio, requeridos no projeto do motor, são alcançados e, por consequência, os parâmetros geométricos são obtidos.

Após a obtenção dos parâmetros geométricos, torna-se possível determinar o comprimento de mistura do injetor e o ângulo de cone de saída.

3.1.1 Cálculo do estágio de oxidante

No estágio de oxidante, que pode ser visualizado na FIG. 3.1, o raio da câmara onde o oxidante é injetado (r_{ko}) é reduzido até o raio de saída da câmara, onde ocorre à saída do oxidante (r_{kso}). O oxidante é alimentado na câmara através dos canais tangenciais de raio r_{bxo} .

Para se determinar os principais parâmetros geométricos do injetor deve-se arbitrar valores para os raios r_{ko} , r_{kso} e r_{bxo} . Segundo Bazarov *et al* (2004), o canal tangencial (r_{bxo}) deve possuir diâmetro entre 0,5 a 2,5 mm. Nos diâmetros superiores a 2,5 mm o canal tangencial começa a apresentar alta perda por atrito, além de aumentar o peso do conjunto, uma vez que existe uma relação entre diâmetro e comprimento do canal como será discutido mais adiante. Diâmetros inferiores a 0,5 mm são mais propícios a bloqueio por contaminantes.

Inicialmente, deve-se arbitrar aos raios de câmara r_{ko} e r_{kso} valores não inferiores a r_{bxo} . O raio de saída da câmara r_{kso} pode ser arbitrado inicialmente como metade do raio r_{ko} .

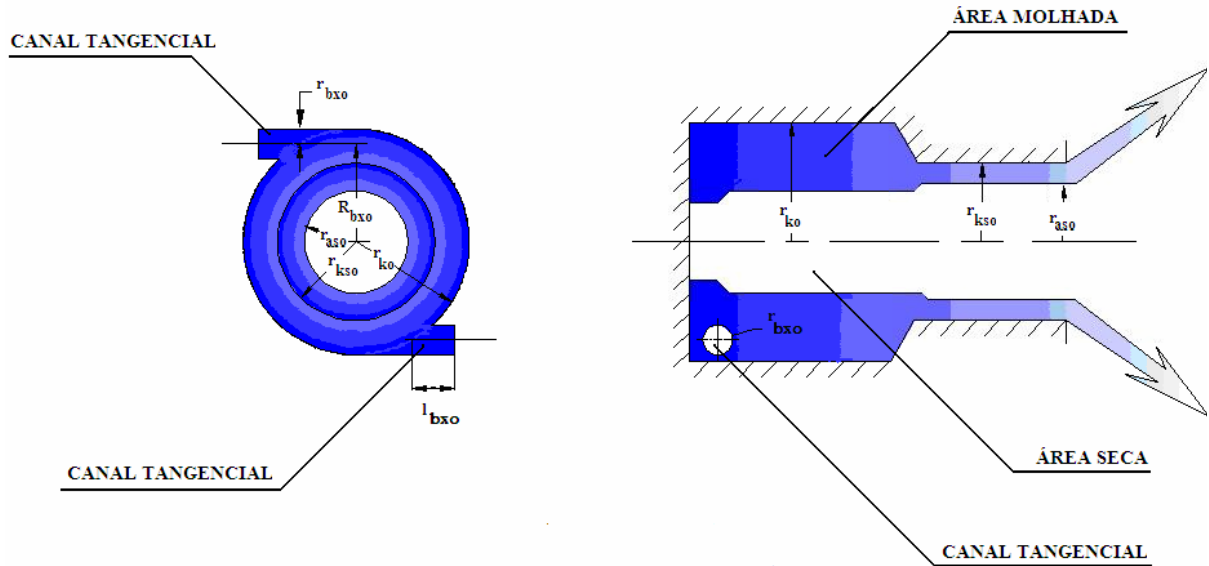


FIGURA 3.1 – Estágio de oxidante do injetor

Com os valores r_{ko} , r_{kso} e r_{bxo} arbitrados é possível determinar o raio R_{bxo} , que é o raio do centro do estágio de oxidante até a linha de centro do canal tangencial, com a aplicação da seguinte relação geométrica:

$$R_{bxo} = r_{ko} - r_{bxo} \quad (3.1)$$

O raio R_{bxo} é utilizado no cálculo do parâmetro geométrico ideal do estágio de oxidante (A_{io}). Esse parâmetro é adimensional e relaciona os raios geométricos do estágio de oxidante do injetor através da equação:

$$A_{io} = \frac{R_{bxo} \cdot r_{kso}^2}{n_o \cdot r_{bxo}} \quad (3.2)$$

Onde:

n_o = número de canais tangenciais de entrada de oxidante do injetor, que deve ser escolhido pelo projetista.

O estágio de oxidante do injetor possui uma região chamada de área livre, que é constituída pela área molhada somada a área seca (FIG. 3.1). A área livre do estágio de oxidante relaciona-se com o parâmetro geométrico através do coeficiente de área livre do estágio de oxidante, equação 3.3.

$$A_{io} = \frac{(1 - \varphi_{io}) \cdot \sqrt{2}}{\varphi_{io} \cdot \sqrt{\varphi_{io}}} \quad (3.3)$$

O coeficiente de área livre ideal do estágio de oxidante (φ_{io}) pode ser calculado igualando a equação 3.2 com a 3.3.

O valor de φ_{io} é aplicado na equação abaixo para obtenção do coeficiente de descarga ideal de oxidante μ_{io} .

$$\mu_{io} = \varphi_{io} \sqrt{\frac{\varphi_{io}}{2 - \varphi_{io}}} \quad (3.4)$$

Ao sair dos canais tangenciais e entrar na câmara o fluido começa a se deslocar em movimento centrífugo, concentrando o escoamento nas periferias da câmara do estágio de

oxidante o que faz surgir na região central da câmara uma área conhecida como área seca do estágio de oxidante do injetor (r_{aso}), mostrado a FIG. 3.1. Considera-se como hipótese que na área seca do estágio de oxidante do injetor não ocorre passagem de fluido.

Com o valor de φ_{io} torna-se possível calcular o raio r_{aso} , através da equação:

$$r_{aso} = \sqrt{(1 - \varphi_{io}) \cdot r_{kso}^2} \quad (3.5)$$

Utiliza-se o valor do coeficiente de descarga ideal de oxidante μ_{io} , calculado através da equação 3.4, na determinação da vazão mássica ideal de oxidante do injetor (\dot{m}_{io}), que pode ser obtida com a equação:

$$\dot{m}_{io} = \mu_{io} \cdot f_{kso} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_o \cdot \Delta p_o} \quad (3.6)$$

Onde:

Δp_o = variação de pressão entre a entrada e a saída do estágio de oxidante, que deve ser escolhida pelo projetista;

ρ_o = densidade do oxidante;

f_{kso} = área de saída da câmara do estágio de oxidante que é dado por:

$$f_{kso} = \pi \cdot r_{kso}^2 \quad (3.7)$$

Uma vez encontrada a vazão mássica ideal de oxidante (\dot{m}_{io}), deve-se considerar os efeitos da viscosidade e as perdas no estágio de oxidante, e assim obter a vazão mássica

real de oxidante (\dot{m}_{ro}). Caso o valor calculado \dot{m}_{ro} seja diferente da vazão mássica requerida para o injetor do motor projetado, deve-se então reiniciar os cálculos arbitrando novos valores aos raios r_{ko} , r_{kso} e r_{bxo} .

Utiliza-se a vazão mássica ideal de oxidante para determinar a velocidade de escoamento do fluido no interior de um canal tangencial de admissão de oxidante (W_o) através da equação abaixo (Kessaev, 2006):

$$W_o = \frac{\dot{m}_{io}}{n_o \cdot \pi \cdot r_{bxo}^2 \cdot \rho_o} \quad (3.8)$$

Com a velocidade de escoamento do fluido (W_o) torna-se possível estimar o número de Reynolds do escoamento de oxidante no canal tangencial (Re_o), utilizando a equação 3.9. Segundo Kessaev (2006), deve-se garantir que o escoamento do fluido no interior do canal possua um nível mínimo de turbulência e para que essa condição seja satisfeita Re_o deve ser maior que 4×10^3 .

$$Re_o = W_o \cdot 2 \cdot r_{bxo} \cdot \nu_o^{-1} \quad (3.9)$$

Onde:

ν_o = viscosidade cinemática do oxidante.

Com número de Reynolds calculado (Re_o), pode-se determinar o coeficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_o). Esse coeficiente representa a resistência que a superfície do canal oferece a passagem do oxidante. Segundo Fox (1998), pode-se obter o coeficiente de resistência de um canal através da equação abaixo:

$$\lambda_o = 0,3164.Re_o^{-0,25} \quad (3.10)$$

O coeficiente λ_o é utilizado na determinação do parâmetro geométrico equivalente do estágio de oxidante do injetor ($A_{\omega o}$), onde, além dos raios geométricos considera-se também a resistência superficial do canal tangencial.

O parâmetro geométrico equivalente ($A_{\omega o}$) é uma correção do parâmetro geométrico ideal ($A_{i o}$) considerando a resistência superficial dos canais tangenciais, essa correção é importante porque grande parte das perdas no injetor ocorre nos canais tangenciais.

Através da equação 3.11 pode-se determinar $A_{\omega o}$.

$$A_{\omega o} = \frac{R_{b x o} \cdot r_{k s o}}{n_o \cdot r_{b x o}^2 + \frac{\lambda_o}{2} \cdot R_{b x o} \cdot (R_{b x o} - r_{k s o})} \quad (3.11)$$

Uma vez determinado $A_{\omega o}$ pode-se obter o coeficiente de área livre equivalente ($\varphi_{\omega o}$), resolvendo a equação 3.12 para $\varphi_{\omega o}$.

$$A_{\omega o} = \frac{(1 - \varphi_{\omega o}) \cdot \sqrt{2}}{\varphi_{\omega o} \sqrt{\varphi_{\omega o}}} \quad (3.12)$$

O parâmetro geométrico equivalente ($A_{\omega o}$) se relaciona com o parâmetro geométrico ideal ($A_{i o}$) através do coeficiente de perda de movimento angular (K_o), que representa as perdas ocasionadas pelos efeitos da viscosidade no interior da câmara do

estágio de oxidante do injetor. Com isso pode-se obter a influência das perdas devido à viscosidade do fluido na vazão mássica de oxidante do injetor.

O coeficiente de perda de quantidade de movimento angular (K_o) pode ser determinado através da equação:

$$K_o = \frac{A_{\omega o}}{A_{i o}} \quad (3.13)$$

Com valor encontrado de $\varphi_{\omega o}$ é possível calcular a vazão mássica real de oxidante (\dot{m}_{ro}), através da equação:

$$\dot{m}_{ro} = \frac{\pi \cdot r_{kso}^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{io} \cdot \Delta p_o}}{\sqrt{\frac{I}{\varphi_{\omega o}^2} + \frac{A_{io}^2 \cdot K_o^2}{1 - \varphi_{\omega o}} + (\xi_o \cdot n_o) \cdot \frac{A_{io}^2}{C_o^2}}} \quad (3.14)$$

Onde:

C_o = coeficiente de redução de área interna do estágio de oxidante, dado por:

$$C_o = \frac{R_{bxo}}{r_{kso}} \quad (3.15)$$

ξ_o = Representa as perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial de entrada de oxidante do injetor e pode ser calculado com a seguinte equação (Bazarov, 2004):

$$\xi_o = \xi_{yo} + \lambda_o \cdot \frac{l_{bxo}}{2 \cdot r_{bxo}} \quad (3.16)$$

Sendo:

l_{bxo} = comprimento do canal tangencial de entrada de oxidante do injetor. Segundo Bazarov *et al* (2004), baseado em resultados experimentais, esse comprimento deve estar no intervalo: $2 \leq \frac{l_{bxo}}{2 \cdot r_{bxo}} \leq 3$.

ξ_{yo} = representa as perdas hidráulicas geradas em função da geometria de entrada do canal tangencial do injetor e podem ser obtidas a partir do gráfico apresentado na FIG. 3.2.

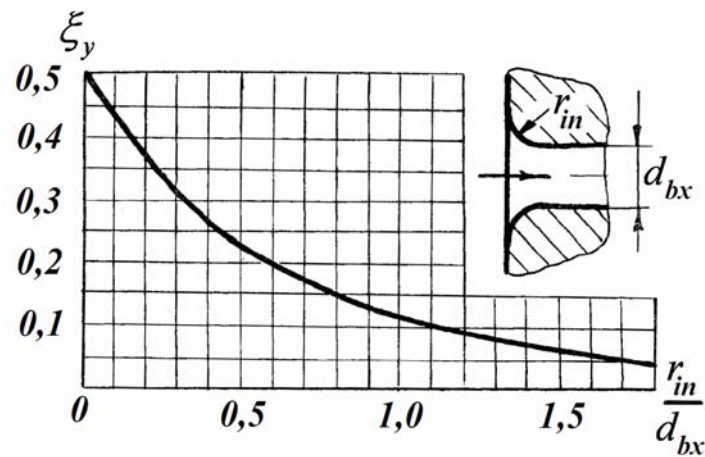


FIGURA 3.2 – Perda por atrito na entrada do canal tangencial (Bazarov, 2004)

O valor de \dot{m}_{ro} calculado deve convergir para a vazão mássica de oxidante do injetor nas condições de projeto. Caso não ocorra convergência deve-se variar o valor de ξ_y arbitrando nova razão entre o raio de entrada (r_{in}) e o diâmetro (d_{bx}) do canal

tangencial, com base no gráfico visualizado na FIG. 3.2, até que o valor de \dot{m}_{ro} convirja para a vazão requerida pelo projeto. Para o estágio de oxidante $\xi_y = \xi_{yo}$, $d_{bx} = d_{bxo}$ e $r_{in} = r_{ino}$.

Se com a variação de ξ_{yo} não ocorrer a convergência de \dot{m}_{ro} , deve-se então reiniciar os cálculos do estágio de oxidante arbitrando novos valores para os raios r_{ko} , r_{kso} e r_{bxo} até o valor da vazão mássica \dot{m}_{ro} convergir para o valor de vazão de oxidante necessária ao injetor do motor projetado.

Após a convergência da vazão mássica real de oxidante torna-se possível determinar o ângulo de cone de saída do estágio de oxidante ($2\alpha_o$), que é o ângulo formado pelo fluido ao sair do injetor. Segundo Kessaev (2006), baseado em resultados experimentais, é possível através da equação abaixo determinar o ângulo de cone $2\alpha_o$.

$$\text{sen}\alpha_o = \frac{2 \cdot \mu_{io} \cdot A_{io} \cdot K_o}{1 + \sqrt{1 - \varphi_o} \cdot \sqrt{1 - \xi_o \cdot \mu_{io}^2 \cdot \frac{A_{io}^2}{C_o^2}}} \quad (3.17)$$

Onde:

μ_{io} = coeficiente de descarga total do estágio de oxidante, dado por:

$$\mu_{io} = \frac{\mu_o}{\sqrt{1 + \mu_o^2 \cdot \xi_o \cdot \frac{A_{io}^2}{C_o^2}}} \quad (3.18)$$

Sendo:

μ_o = coeficiente de descarga real, que pode ser calculado seguinte equação:

$$\mu_{\omega} = \frac{\varphi_{\omega} \sqrt{\varphi_{\omega}}}{\sqrt{2 - \varphi_{\omega}}} \quad (3.19)$$

3.1.2 Cálculo do estágio de combustível

Para o cálculo do estágio de combustível, de maneira análoga ao cálculo estágio de oxidante, considera-se inicialmente o fluido de trabalho como ideal, ou seja, desconsidera-se a viscosidade e consequentemente as perdas por ela geradas.

O estágio de combustível será fabricado externo ao estágio de oxidante, o estágio de combustível é apresentado na FIG. 3.3. Neste estágio o raio da câmara onde o combustível é injetado (r_{kc}) e o raio de saída da câmara (r_{ksc}), onde ocorre a saída do combustível, são exatamente iguais, ou seja, no estágio de combustível não ocorre redução de raio no estágio de combustível do injetor.

O combustível é admitido na câmara do estágio de combustível através dos canais tangenciais de raio r_{bxc} . Ao sair dos canais e após entrar na câmara, o fluido se desloca em movimento centrífugo formando vórtices em seu interior, o que faz surgir uma área seca de raio r_{asc} .

Para a determinação dos parâmetros principais do estágio de combustível deve-se inicialmente arbitrar valores para os raios r_{kc} , r_{ksc} e r_{bxc} . Para o estágio de combustível é válido que r_{kc} é igual a r_{ksc} . Inicialmente, os valores arbitrados para os raios r_{kc} e r_{ksc} devem ser superiores ao valor do raio r_{ko} (ver FIG. 3.1), para que a manufatura seja possível uma vez que o estágio de combustível será fabricado externo ao estágio de

oxidante. O canal tangencial de entrada, como discutido no estágio de oxidante, deve possuir diâmetro entre 0,5 a 2,5 mm.

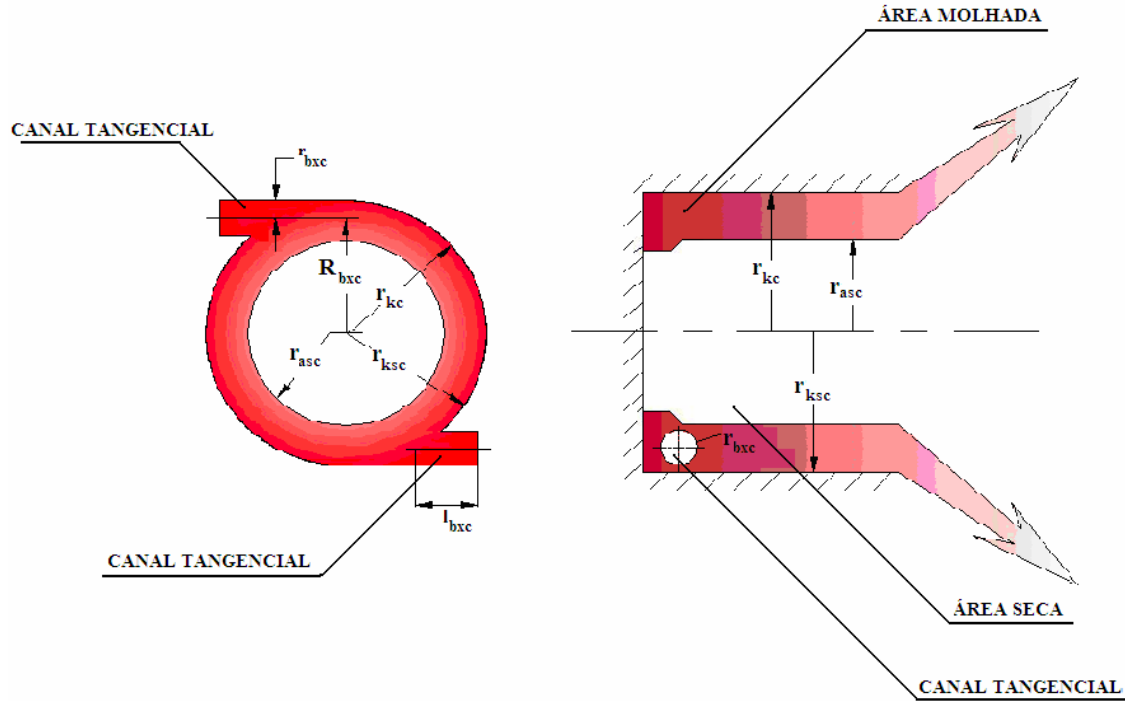


FIGURA 3.3 - Estágio de combustível do injetor

Aplicam-se os valores arbitrados no cálculo do raio R_{bxc} , que é o raio do centro do estágio de combustível até a linha de centro do canal tangencial (FIG. 3.3), através da relação geométrica abaixo:

$$R_{bxc} = r_{kc} - r_{bxc} \quad (3.20)$$

Com o raio R_{bxc} é possível calcular o parâmetro geométrico do estágio de combustível (A_c). Esse parâmetro é adimensional e relaciona os raios geométricos do estágio de combustível do injetor através da equação:

$$A_c = \frac{R_{bxc} \cdot r_{ksc}}{n_c \cdot r_{bxc}^2} \quad (3.21)$$

Onde:

n_c = número de canais tangenciais de entrada de combustível do injetor, que deve ser escolhido pelo projetista.

O estágio de combustível do injetor também possui uma área livre que é constituída pela área molhada somada à área seca (ver FIG. 3.3). O coeficiente de área livre do estágio de combustível (φ_c) pode ser determinado igualando as equações 3.22 e 3.23, o valor de (φ_c) é útil para determinar o coeficiente de descarga do injetor e, consequentemente, a vazão mássica do estágio de combustível.

$$A_c = \frac{(1 - \varphi_c) \cdot \sqrt{2}}{\varphi_c \cdot \sqrt{\varphi_c}} \quad (3.22)$$

O valor obtido para φ_c é aplicado na equação a seguir para determinar o coeficiente de descarga de combustível μ_c .

$$\mu_c = \varphi_c \sqrt{\frac{\varphi_c}{2 - \varphi_c}} \quad (3.23)$$

É possível também com o valor de φ_c calcular o raio de área seca do estágio de combustível (r_{asc}). Considera-se como hipótese que na área seca do estágio de

combustível do injetor não ocorre passagem de fluido. O raio r_{asc} pode ser obtido com a equação 3.24.

$$r_{asc} = \sqrt{(1 - \varphi_c) \cdot r_{ksc}} \quad (3.24)$$

O valor obtido do coeficiente de descarga μ_c através da equação 3.23, é aplicado no cálculo da vazão mássica ideal de combustível (\dot{m}_{ic}), através da equação:

$$\dot{m}_{ic} = \mu_c \cdot f_{ksc} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_c \cdot \Delta p_c} \quad (3.25)$$

Onde:

Δp_c = variação de pressão entre a entrada e a saída do estágio de combustível, que ser escolhida pelo projetista;

ρ_c = densidade do combustível;

f_{ksc} = área de saída da câmara do estágio de combustível, que é dado pela equação 3.26:

$$f_{ksc} = \pi \cdot r_{ksc}^2 \quad (3.26)$$

Encontrada a vazão mássica ideal de combustível (\dot{m}_{ic}) devem-se considerar os efeitos da viscosidade e as perdas no estágio de combustível, e assim obter a vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc}). Caso o valor calculado \dot{m}_{rc} seja diferente da vazão

mássica de combustível requerida para o injetor do motor projetado, deve-se então reiniciar os cálculos arbitrando novos valores para os raios r_{kc} , r_{ksc} e r_{bxc} .

Aplica-se o valor determinado de \dot{m}_{ic} para determinar a velocidade de escoamento do fluido no interior de um canal tangencial de entrada de combustível (W_c) com a equação:

$$W_c = \frac{\dot{m}_{ic}}{n_c \cdot \pi \cdot r_{bxc}^2 \cdot \rho_c} \quad (3.27)$$

Utiliza-se o valor da velocidade de escoamento do fluido W_c para calcular o número de Reynolds do escoamento de combustível no canal tangencial (Re_c), através da equação 3.28. Segundo Kessaev (2006), Re_c deverá ser superior a 4×10^3 para o escoamento no canal tangencial.

$$Re_c = W_c \cdot 2 \cdot r_{bxc} \cdot \nu_c^{-1} \quad (3.28)$$

Onde:

ν_c = viscosidade cinemática do combustível.

Se o número de Reynolds calculado for inferior a 4×10^3 , deve-se então reiniciar os cálculos do estágio de combustível arbitrando novos valores para o raio r_{bxc} até que Re_c convirja, garantindo a condição do escoamento no canal tangencial.

Satisfeita a condição de escoamento no canal, pode-se utilizar Re_c para determinar o coeficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_c) com a equação 3.29 (Fox, 1998).

$$\lambda_c = 0,3164.Re_c^{-0,25} \quad (3.29)$$

Determinada a resistência superficial do canal tangencial torna-se possível calcular as perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_c) com a equação 3.30.

$$\xi_c = \xi_{yc} + \lambda_c \cdot \frac{l_{bxc}}{2.r_{bxc}} \quad (3.30)$$

Onde:

ξ_{yc} = representa as perdas hidráulicas geradas em função da geometria de entrada do canal tangencial do estágio de combustível e podem ser obtidas a partir do gráfico apresentado na FIG. 3.2.

l_{bxc} = comprimento do canal tangencial de entrada de combustível do injetor, segundo Bazarov *et al* (2004) esse comprimento deve seguir a seguinte

recomendação baseada em ensaios práticos: $2 \leq \frac{l_{bxc}}{2.r_{bxc}} \leq 3$.

Assim, o valor da vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc}) pode ser determinado através da seguinte equação:

$$\dot{m}_{rc} = \frac{\pi \cdot r_{ksc}^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_c \cdot \Delta p_c}}{\sqrt{\frac{I}{\phi_c^2} + \frac{A_c^2 \cdot K_c^2}{1 - \phi_c} + (\xi_c \cdot n_c) \cdot \frac{A_c^2}{C_c^2}}} \quad (3.31)$$

Onde:

C_c = coeficiente de redução de área interna do estágio de combustível que pode ser obtido pela equação abaixo:

$$C_c = \frac{R_{bxc}}{r_{ksc}} \quad (3.32)$$

Segundo Kessaev (2006), em injetores do tipo aberto o coeficiente de redução de área pode ser considerado como $C_c \approx 1$.

No estágio de combustível o raio interno da câmara permanece constante, por isso considera-se o coeficiente de perda de quantidade de movimento angular do estágio de combustível $K_c \approx 1$ (Kessaev, 2006), motivo pelo qual não é determinado o parâmetro geométrico equivalente para o estágio de combustível.

Deve-se efetuar procedimento análogo ao executado para o estágio de oxidante para garantir a convergência da vazão mássica calculada com a vazão mássica requerida de projeto.

O valor de \dot{m}_{ro} calculado deve convergir para a vazão mássica de combustível do injetor nas condições de projeto, se caso não ocorra convergência deve-se variar o valor de ξ_y arbitrando nova razão entre o raio de entrada (r_{in}) e o diâmetro (d_{bx}) do canal tangencial, com base no gráfico visualizado na FIG. 3.2, até que o valor de \dot{m}_{rc} convirja

para a vazão de combustível requerida pelo projeto. Para o estágio de combustível

$$\xi_y = \xi_{yc}, d_{bx} = d_{bxc} \text{ e } r_{in} = r_{inc}.$$

Caso não ocorra a convergência de \dot{m}_{rc} com a variação de ξ_{yc} , deve-se então reiniciar os cálculos do estágio de combustível arbitrando novos valores para os raios r_{kc} , r_{ksc} e r_{bxc} até o valor da vazão mássica \dot{m}_{rc} convergir para o valor da vazão de combustível necessária ao injetor do motor projetado.

Com a convergência da vazão mássica real de combustível é possível determinar o ângulo do cone de saída do estágio de combustível ($2\alpha_c$), ângulo formado pelo fluido ao sair do injetor. Baseado em resultados experimentais o ângulo $2\alpha_c$ pode ser determinado com a equação a seguir (Bazarov, 2004).

$$\text{sen}\alpha_c = \frac{2 \cdot \mu_{tc} \cdot A_c \cdot K_c}{1 + \sqrt{1 - \varphi_c} \cdot \sqrt{1 - \xi_c \cdot \mu_{tc}^2 \cdot \frac{A_c^2}{C_c^2}}} \quad (3.33)$$

Onde:

μ_{tc} = coeficiente de descarga total do estágio de combustível, dado por:

$$\mu_{tc} = \frac{\mu_c}{\sqrt{1 + \mu_c^2 \cdot \xi_c \cdot \frac{A_c^2}{C_c^2}}} \quad (3.34)$$

3.1.3 Cálculo do comprimento de mistura interna do injetor

Após os cálculos dos estágios de oxidante e de combustível, deve-se considerar os estágios de oxidante e combustível unidos construtivamente, formando uma única peça denominada injetor centrífugo bipropelente líquido-líquido, como mostra a FIG. 3.4.

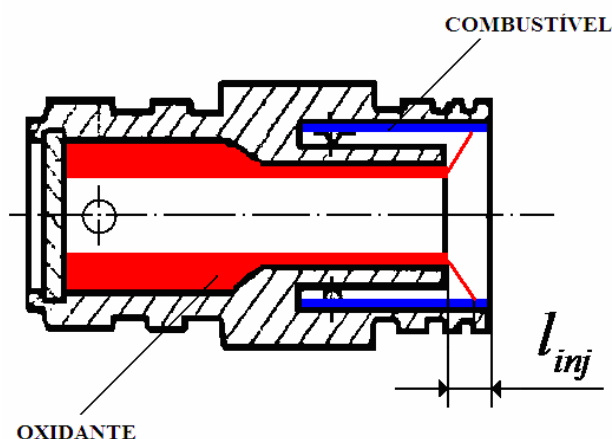


FIGURA 3.4 – Comprimento de mistura do injetor centrífugo bipropelente

O combustível e o oxidante irão se encontrar dentro do injetor centrífugo bipropelente onde ocorrerá a mistura. Segundo Bazarov *et al* (2004), o tempo de permanência da mistura no interior do injetor centrífugo bipropelente deve observar as seguintes condições para que a mistura ocorra de maneira eficiente:

- O tempo de permanência da mistura no interior do injetor (τ) não pode ser muito longo (1,5 – 10 ms), pois nessa condição ocorrerá ignição da mistura ainda no interior do injetor, o que pode ocasionar sobre aquecimento do injetor e até mesmo possibilidade de levar o motor ao colapso.
- Se o tempo de permanência for muito curto (menos que 0,1 ms) a mistura não ocorrerá por completo, reduzindo assim a qualidade da mistura e, por

consequência, sua queima no interior da câmara poderá ser incompleta, reduzindo assim a eficiência de combustão.

- O tempo ideal de permanência da mistura no interior do injetor deve ser entre 0,1 ms a 0,2 ms para vazões mássicas com valores entre 0,1 a 1,0 (kg/s). Para que essa condição seja satisfeita é necessário que o comprimento do injetor, onde ocorre a mistura do oxidante com o combustível (l_{inj}) e que pode ser visualizado na FIG. 3.4, seja determinado dentro desse intervalo de tempo de permanência. Segundo Bazarov *et al* (2004), baseado em resultados experimentais, pode-se determinar o comprimento l_{inj} através da seguinte equação:

$$l_{inj} = \sqrt{2} * \tau \left(\frac{K_m \cdot \mu_{tc}}{(K_m + 1) \cdot \varphi_c} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_c}{\rho_c}} + \frac{\mu_{to}}{(K_m + 1) \varphi_o} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_o}{\rho_o}} \right) \quad (3.35)$$

Onde :

km = razão de mistura dos propelentes que é dado por:

$$km = \frac{\dot{m}_{ro}}{\dot{m}_{rc}} \quad (3.36)$$

3.1.4 Comprimento do injetor

O projetista deve garantir que vazão mássica determinada para cada estágio do injetor seja alcançada, para isso o cabeçote de injeção deve possuir um volume mínimo tanto para o estágio de oxidante como para o estágio de combustível.

O comprimento do injetor é determinado em função do volume mínimo necessário para garantir as vazões mássicas nos estágios de oxidante e combustível nas condições de

projeto. Segundo Gregoryev (2007), baseado em resultados experimentais, o comprimento mínimo do estágio de combustível não deverá ser inferior ao seu respectivo diâmetro de entrada de câmara, ou seja, o comprimento do estágio de combustível (l_c) não deverá ser inferior a $2.r_{kc}$. O estágio de oxidante segue a mesma regra, porém quando o estágio de combustível for montado externo ao estágio de oxidante, este deverá possuir comprimento não inferior ao seu diâmetro de entrada de câmara ($2.r_{ko}$) e a esse comprimento deve ser somado o comprimento do estágio de combustível, ou seja, o comprimento mínimo do estágio de oxidante (l_o) para injetor bipropelente com montagem externa do estágio de combustível deverá ser $2.r_{kc} + 2.r_{ko}$. A FIG. 3.5 indica o comprimento dos estágios de oxidante e combustível em um injetor centrífugo bipropelente de mistura interna.

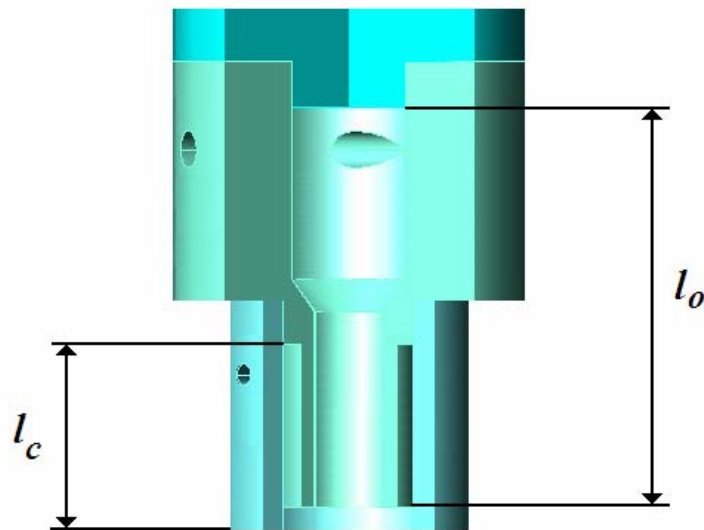


FIGURA 3.5 – Comprimento dos estágios de oxidante e combustível

3.2 Avaliação da metodologia de cálculo

A metodologia de cálculo proposta no item 3.1 será aplicada no dimensionamento de um injetor nas condições de projeto do motor RD-109. Os parâmetros geométricos obtidos no dimensionamento serão comparados com os parâmetros geométricos do injetor utilizado no motor RD-109 para avaliação da metodologia proposta.

3.2.1 Condições de projeto do motor RD-109

Para o dimensionamento de um injetor é necessário conhecer as condições de projeto do motor. As TABS. 3.1 e 3.2 informam as condições de projeto para os injetores do motor RD-109.

TABELA 3.1 – Condições de projeto do estágio de oxidante do injetor do RD-109

Oxidante	Oxigênio
Temperatura de referência do oxidante	100 (K)
Variação de Pressão no estágio de oxidante (Δp_o)	$4,4 \cdot 10^5$ (Pa)
Densidade (ρ_o)	1140 (kg/m ³)
Tensão superficial (σ_o)	0,0132 (kg/s ²)
Viscosidade dinâmica (\mathcal{G}_o)	$7,64 \cdot 10^{-6}$ (kg/s.m)
Viscosidade cinemática (ν_o)	$1,94 \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Vazão mássica requerida por injetor (\dot{m}_{ro})	0,1729 (kg/s)

TABELA 3.2 – Condições de projeto do estágio de combustível do injetor do RD-109

Combustível	Querosene
Temperatura de referência do combustível	293 (K)
Variação de Pressão no estágio de combustível (Δp_c)	$7,1 \cdot 10^5$ (Pa)
Densidade (ρ_c)	800 (kg/m ³)
Tensão superficial (σ_c)	0,0260 (kg/s ²)
Viscosidade dinâmica (\mathcal{G}_c)	$1,92 \cdot 10^{-3}$ (kg/s.m)
Viscosidade cinemática (ν_c)	$2 \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Vazão mássica requerida por injetor (\dot{m}_{rc})	0,0722 (kg/s)

3.2.2 Parâmetros do injetor dimensionado nas condições de projeto do RD-109

Os parâmetros geométricos obtidos com a aplicação da metodologia de cálculo proposta são apresentados nas TABS. 3.3, 3.4 e 3.5. Para os resultados obtidos para o estágio de oxidante, Tabela 3.3, considerou-se:

- Os valores dos raios foram inicialmente arbitrados como:

$$r_{bxo} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{ko} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{kso} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

- A relação entre o comprimento e o diâmetro do canal tangencial assume

$$\text{valor igual a 3, ou seja, } \frac{l_{bxo}}{2 \cdot r_{bxo}} = 3 ;$$

- A razão entre o raio de entrada do canal tangencial e o diâmetro de entrada

do canal tangencial (FIG. 3.2) com valor de 0,33, ou seja, $\frac{r_{ino}}{d_{bxo}} = 0,3$.

TABELA 3.3 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor do RD-109

	continua
Número de canais tangenciais (n_o)	6 canais
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{kso})	$2,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxo})	$0,9 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de oxidante (R_{bxo})	$3,6 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico ideal (A_{io})	2
Coeficiente de área livre ideal (φ_{io})	0,5
Coeficiente de descarga ideal de oxidante (μ_{io})	0,29
Raio de área seca (r_{aso})	$1,9 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{kso})	$22,9 \cdot 10^{-6}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de oxidante (\dot{m}_{io})	0,2094 (kg/s)
Velocidade do oxidante no interior do canal tangencial (W_o)	12,03 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_o)	$11,16 \cdot 10^3$
Coeficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_o)	0,031
Parâmetro geométrico equivalente ($A_{\omega o}$)	1,98
Coeficiente de área livre equivalente ($\varphi_{\omega o}$)	0,502
Coeficiente de perda de movimento angular (K_o)	0,99

TABELA 3.3 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor do RD-109

	conclusão
Coeficiente de redução de área (C_o)	1,33
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	$5,4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yo})	0,33
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_o)	0,422
Vazão mássica real de oxidante (\dot{m}_{ro})	0,1732 (kg/s)

Os resultados para o estágio de combustível, mostrados na TAB. 3.4, foram obtidos considerando-se:

- Os valores dos raios foram inicialmente arbitrados como:

$$r_{bxc} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{kc} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{ksc} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

- A relação entre o comprimento e o diâmetro do canal tangencial assume

valor igual a 3, ou seja, $\frac{l_{bxc}}{2 \cdot r_{bxc}} = 3$;

- A razão entre o raio de entrada do canal tangencial e o diâmetro de entrada

do canal tangencial (FIG. 3.2) com valor de 0,1, ou seja, $\frac{r_{inc}}{d_{bxc}} = 1,1$.

TABELA 3.4 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor do RD-109

Número de canais tangenciais (n_c)	6 canais
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxc})	$0,4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de combustível (R_{bxc})	$4,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico (A_c)	24,969
Coeficiente de área livre (φ_c)	0,134
Coeficiente de descarga de combustível (μ_c)	0,0359
Raio de área seca (r_{asc})	$4,75 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{ksc})	$81,71 \cdot 10^{-3}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de combustível (\dot{m}_{ic})	0,0989 (kg/s)
Velocidade do combustível no interior do canal tangencial (W_c)	40,99 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_c)	$16,4 \cdot 10^3$
Coeficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_c)	0,028
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	$2,4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yc})	0,1
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_c)	0,184
Vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc})	0,072 (kg/s)

3.2.3 Injetor dimensionado x Injetor utilizado no motor RD-109

Com o objetivo de analisar a metodologia de cálculo proposta, pode-se através das TABS. 3.5, 3.6 comparar os principais parâmetros geométricos obtidos com a aplicação da metodologia com os principais parâmetros geométricos do injetor utilizado no motor RD-109.

TABELA 3.5 – Comparação do estágio de oxidante

Principais parâmetros	Injetor dimensionado	Injetor RD-109
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{kso})	$2,7 \cdot 10^{-3}$ (m)	$2,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxo})	$0,9 \cdot 10^{-3}$ (m)	$0,9 \cdot 10^{-3}$ (m)
Número de canais tangenciais (n_o)	6 canais	6 canais
Coefficiente de redução de área (C_o)	1,33	1,33
Vazão mássica real de oxidante (\dot{m}_{ro})	0,1732 (kg/s)	0,1729 (kg/s)

TABELA 3.6 – Comparação do estágio de combustível

Principais parâmetros	Injetor dimensionado	Injetor RD-109
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxc})	$0,4 \cdot 10^{-3}$ (m)	$0,4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Número de canais tangenciais (n_c)	6 canais	6 canais
Vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc})	0,072 (kg/s)	0,0722 (kg/s)

Além dos estágios de oxidante e combustível deve-se determinar o comprimento de mistura do injetor (l_{inj}). Pode-se, arbitrar o tempo de permanência da mistura no interior do injetor (τ) e com a aplicação da equação 3.39 obter o comprimento de mistura do injetor. Para que ocorra a convergência entre (l_{inj}) do injetor dimensionado e do motor RD-109, $l_{inj} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (m), o tempo de permanência da mistura no interior do injetor deve ser $\tau = 0,11$ ms que está dentro do intervalo recomendado (entre 0,1 e 0,2 ms).

Observa-se na comparação entre os principais parâmetros geométricos do injetor dimensionado e o injetor do motor RD-109 que a metodologia proposta permite, com a convergência da vazão mássica, obter de forma precisa os parâmetros geométricos de um injetor.

3.3 Aplicação da metodologia de cálculo no dimensionamento de injetores

Após a avaliação da metodologia através do item 3.2.3, serão dimensionados três injetores, o primeiro com seis canais tangenciais, o segundo com quatro canais tangenciais e o terceiro com dois canais tangenciais. As condições de projeto serão diferentes das condições do motor RD-109 (TABS. 3.7 e 3.8), porque o equipamento de testes que será utilizado nos estudos experimentais não consegue fornecer as vazões necessárias a essas condições. O equipamento de testes possui 150g/s de capacidade máxima de fornecimento de vazão mássica de água por estágio. Os parâmetros geométricos que forem obtidos para os três injetores serão aplicados em sua fabricação, para estudo e análise experimental dos efeitos da variação do número de canais tangenciais no comportamento dos injetores.

3.3.1 Novas condições de projeto

TABELA 3.7 – Novas condições de projeto do estágio de oxidante do injetor

Oxidante	Oxigênio
Temperatura de referência do oxidante	100 (K)
Variação de Pressão no estágio de oxidante (Δp_o)	$4,4 \cdot 10^5$ (Pa)
Densidade (ρ_o)	1140 (kg/m ³)
Tensão superficial (σ_o)	0,0132 (kg/s ²)
Viscosidade dinâmica (\mathcal{G}_o)	$7,64 \cdot 10^{-6}$ (kg/s.m)
Viscosidade cinemática (ν_o)	$1,94 \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Vazão mássica requerida por injetor (\dot{m}_{ro})	0,139 (kg/s)

TABELA 3.8 – Novas condições de projeto do estágio de combustível do injetor

Combustível	Querosene
Temperatura de referência do combustível	293 (K)
Variação de Pressão no estágio de combustível (Δp_c)	$7,1 \cdot 10^5$ (Pa)
Densidade (ρ_c)	800 (kg/m ³)
Tensão superficial (σ_c)	0,0260 (kg/s ²)
Viscosidade dinâmica (\mathcal{G}_c)	$1,92 \cdot 10^{-3}$ (kg/s.m)
Viscosidade cinemática (ν_c)	$2 \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
Vazão mássica requerida por injetor (\dot{m}_{rc})	0,0522 (kg/s)

3.3.2 Parâmetros geométricos do injetor com seis canais tangenciais

Os resultados obtidos para os parâmetros geométricos de um injetor com seis canais tangenciais para as novas condições de projeto são apresentados nas TABS. 3.9, 3.10 e 3.11. Para os resultados obtidos e apresentados nas TABS. 3.9, 3.10 e 3.11 foram considerados:

- Os valores dos raios inicialmente arbitrados como:

$$r_{bxo} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{ko} = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{kso} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{bxc} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{kc} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$r_{ksc} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$$

- Relação entre o comprimento e o diâmetro do canal tangencial igual a 3, ou

$$\text{seja, } \frac{l_{bxo}}{2 \cdot r_{bxo}} = 3 \text{ e } \frac{l_{bxc}}{2 \cdot r_{bxc}} = 3;$$

- Razão entre o raio de entrada do canal tangencial e o diâmetro de entrada do canal tangencial (FIG. 3.2) igual a 0,5 ($\xi_{yc} = \xi_{yo} = 0,5$), ou seja, o canal tangencial faz ângulo de entrada de 90 graus com a parede externa do injetor. A entrada do canal foi escolhida a 90 graus para facilitar a manufatura e reduzir os possíveis erros de furação do injetor;
- Tempo de permanência da mistura no interior do injetor $\tau = 0,11 \text{ ms}$.

TABELA 3.9 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com seis canais

	continua
Número de canais tangenciais (n_o)	6 canais
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{kso})	$2,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxo})	$0,82 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de oxidante (R_{bxo})	$3,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico ideal (A_{io})	2,46
Coeficiente de área livre ideal (φ_{io})	0,459
Coeficiente de descarga ideal de oxidante (μ_{io})	0,25
Raio de área seca (r_{aso})	$2 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{kso})	$22,9 \cdot 10^{-6}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de oxidante (\dot{m}_{io})	0,1817 (kg/s)
Velocidade do oxidante no interior do canal tangencial (W_o)	12,58 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_o)	$10,63 \cdot 10^3$
Coeficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_o)	0,031
Parâmetro geométrico equivalente (A_{oo})	2,43
Coeficiente de área livre equivalente (φ_{oo})	0,461
Coeficiente de perda de movimento angular (K_o)	0,986
Coeficiente de redução de área (C_o)	1,36
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	$4,92 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yo})	0,5

TABELA 3.9 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com seis canais

	conclusão
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_o)	0,593
Vazão mássica real de oxidante (\dot{m}_{ro})	0,139 (kg/s)

TABELA 3.10 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com seis canais

	continua
Número de canais tangenciais (n_c)	6 canais
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxc})	$0,4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de combustível (R_{bxc})	$4,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico (A_c)	24,969
Coefficiente de área livre (φ_c)	0,134
Coefficiente de descarga de combustível (μ_c)	0,0359
Raio de área seca (r_{asc})	$4,75 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{ksc})	$81,71 \cdot 10^{-6}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de combustível (\dot{m}_{ic})	0,0989 (kg/s)
Velocidade do combustível no interior do canal tangencial (W_c)	40,99 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_c)	$16,4 \cdot 10^3$
Coefficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_c)	0,028
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	$2,4 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yc})	0,5

TABELA 3.10 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com seis canais

	conclusão
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_c)	0,584
Vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc})	0,051 (kg/s)

TABELA 3.11 – Comprimento de mistura do injetor com seis canais tangenciais

Parâmetro geométrico	Dimensionado
Comprimento de mistura (l_{inj})	$1,5 \cdot 10^{-3}$ (m)

Os resultados obtidos para o injetor com seis canais tangenciais nas novas condições de projeto serão aplicados no projeto e manufatura do injetor, é possível através da FIG. 3.8 visualizar os parâmetros geométricos obtidos.

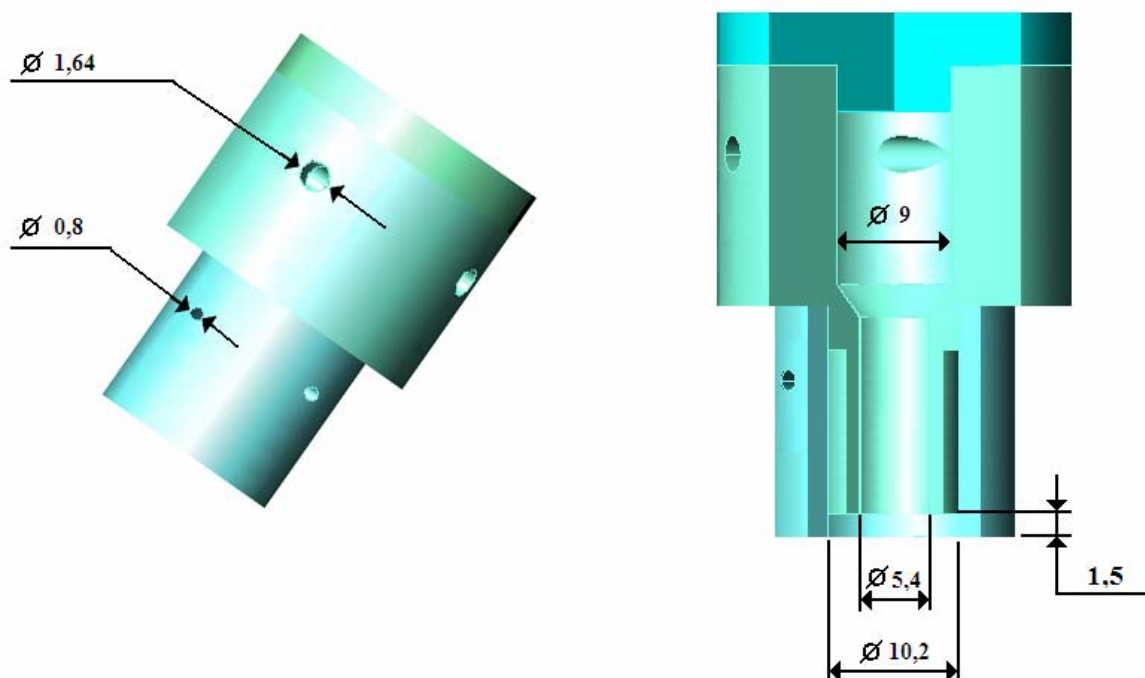


FIGURA 3.6 – Injetor com seis canais tangenciais

3.3.3 Parâmetros geométricos do injetor com quatro canais tangenciais

Para os cálculos do injetor com 4 canais tangenciais faz-se as mesmas considerações utilizadas no dimensionamento do injetor com seis canais tangenciais. Os resultados obtidos são apresentados nas TABS. 3.12, 3.13 e 3.14.

TABELA 3.12 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com quatro canais

	continua
Número de canais tangenciais (n_o)	4 canais
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{kso})	$2,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxo})	$0,95 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de oxidante (R_{bxo})	$3,6 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico ideal (A_{io})	2,655
Coefficiente de área livre ideal (φ_{io})	0,444
Coefficiente de descarga ideal de oxidante (μ_{io})	0,237
Raio de área seca (r_{aso})	$2,01 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{kso})	$22,9 \cdot 10^{-6}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de oxidante (\dot{m}_{io})	0,172 (kg/s)
Velocidade do oxidante no interior do canal tangencial (W_o)	13,307 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_o)	$13,03 \cdot 10^3$
Coefficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_o)	0,03

TABELA 3.12 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com quatro canais

	conclusão
Parâmetro geométrico equivalente ($A_{\omega o}$)	2,623
Coeficiente de área livre equivalente ($\varphi_{\omega o}$)	0,447
Coeficiente de perda de movimento angular (K_o)	0,988
Coeficiente de redução de área (C_o)	1,315
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	$5,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yo})	0,5
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_o)	0,589
Vazão mássica real de oxidante (\dot{m}_{ro})	0,139 (kg/s)

TABELA 3.13 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com quatro canais

	continua
Número de canais tangenciais (n_c)	4 canais
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxc})	$0,46 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de combustível (R_{bxc})	$4,6 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico (A_c)	27,958
Coeficiente de área livre (φ_c)	0,125
Coeficiente de descarga de combustível (μ_c)	0,03227
Raio de área seca (r_{asc})	$4,77 \cdot 10^{-3}$ (m)

TABELA 3.13 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com quatro canais

	conclusão
Área de saída da câmara (f_{ksc})	$81,71 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$
Vazão mássica ideal de combustível (\dot{m}_{ic})	$0,08889 \text{ (kg/s)}$
Velocidade do combustível no interior do canal tangencial (W_c)	$41,79 \text{ (m/s)}$
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_c)	$19,22 \cdot 10^3$
Coefficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_c)	$0,027$
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	$2,76 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yc})	$0,5$
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_c)	$0,581$
Vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc})	$0,0523 \text{ (kg/s)}$

TABELA 3.14 – Comprimento de mistura do injetor com quatro canais

Parâmetro geométrico	Dimensionado
Comprimento de mistura (l_{inj})	$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}$

Os principais parâmetros geométricos obtidos para o injetor com quatro canais tangenciais podem ser visualizados na FIG. 3.9.

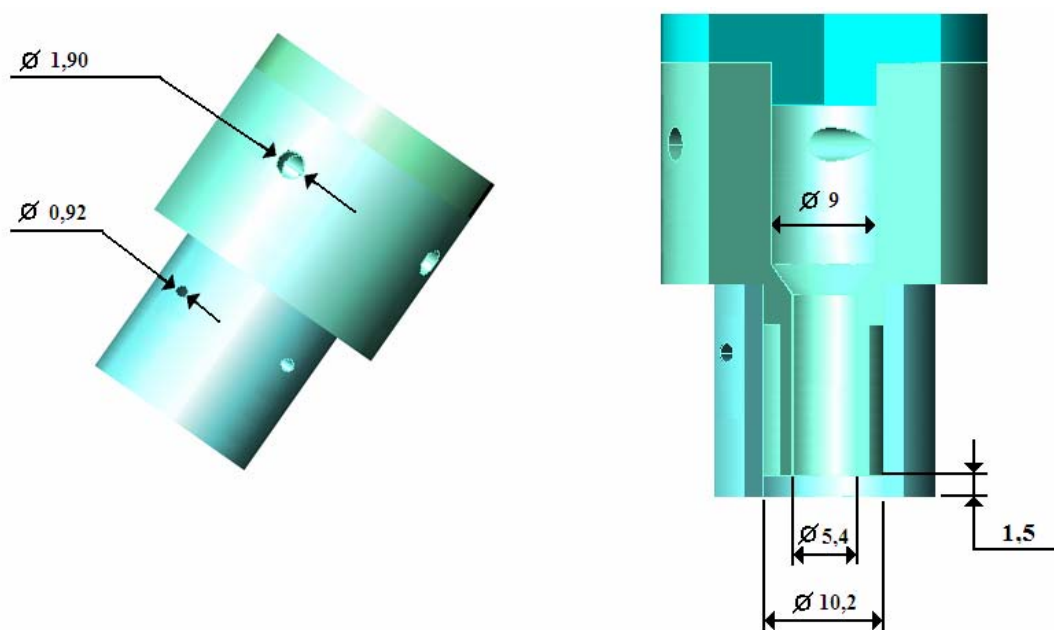


FIGURA 3.7 – Injetor dimensionado com quatro canais tangenciais

3.3.4 Parâmetros geométricos do injetor com dois canais tangenciais

As mesmas considerações utilizadas para dimensionar o injetor com seis canais e o com quatro canais tangenciais foram aplicadas para obtenção dos parâmetros geométricos do injetor com 02 canais tangenciais, os parâmetros obtidos são apresentados nas TABS. 3.15, 3.16 e 3.17.

TABELA 3.15 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com dois canais

	continua
Número de canais tangenciais (n_o)	2 canais
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{kso})	$2,7 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxo})	$1,25 \cdot 10^{-3}$ (m)

TABELA 3.15 – Parâmetros do estágio de oxidante do injetor com dois canais

	conclusão
Raio de centro do estágio de oxidante (R_{bxo})	$3,3 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico ideal (A_{io})	2,808
Coefficiente de área livre ideal (φ_{io})	0,443
Coefficiente de descarga ideal de oxidante (μ_{io})	0,2276
Raio de área seca (r_{aso})	$2,03 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{kso})	$22,9 \cdot 10^{-6}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de oxidante (\dot{m}_{io})	0,16511 (kg/s)
Velocidade do oxidante no interior do canal tangencial (W_o)	14,752 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_o)	$19,01 \cdot 10^3$
Coefficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_o)	0,027
Parâmetro geométrico equivalente (A_{oo})	2,787
Coefficiente de área livre equivalente (φ_{oo})	0,435
Coefficiente de perda de movimento angular (K_o)	0,992
Coefficiente de redução de área (C_o)	1,204
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	$7,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yo})	0,5
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_o)	0,581
Vazão mássica real de oxidante (\dot{m}_{ro})	0,140 (kg/s)

TABELA 3.16 – Parâmetros do estágio de combustível do injetor com dois canais

Número de canais tangenciais (n_c)	2 canais
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	$5,1 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio dos canais tangenciais (r_{bxc})	$0,58 \cdot 10^{-3}$ (m)
Raio de centro do estágio de combustível (R_{bxc})	$4,5 \cdot 10^{-3}$ (m)
Parâmetro geométrico (A_c)	34,263
Coeficiente de área livre (φ_c)	0,11
Coeficiente de descarga de combustível (μ_c)	0,026537
Raio de área seca (r_{asc})	$4,81 \cdot 10^{-3}$ (m)
Área de saída da câmara (f_{ksc})	$81,71 \cdot 10^{-6}$ (m ²)
Vazão mássica ideal de combustível (\dot{m}_{ic})	0,07309 (kg/s)
Velocidade do combustível no interior do canal tangencial (W_c)	43,22 (m/s)
Número de Reynolds no canal tangencial (Re_c)	$25,07 \cdot 10^3$
Coeficiente de resistência de superfície do canal tangencial (λ_c)	0,025
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	$3,48 \cdot 10^{-3}$ (m)
Perdas hidráulicas em função da geometria de entrada do canal (ξ_{yc})	0,5
Perdas hidráulicas no interior de cada canal tangencial (ξ_c)	0,575
Vazão mássica real de combustível (\dot{m}_{rc})	0,0525 (kg/s)

TABELA 3.17 – Comprimento de mistura do injetor dimensionado com dois canais

Parâmetro geométrico	Injetor com 2 canais
Comprimento de mistura (l_{inj})	$1,5 \cdot 10^{-3}$ (m)

Os resultados obtidos dos principais parâmetros geométricos para o injetor com dois canais tangenciais podem ser visualizados na FIG. 3.10.

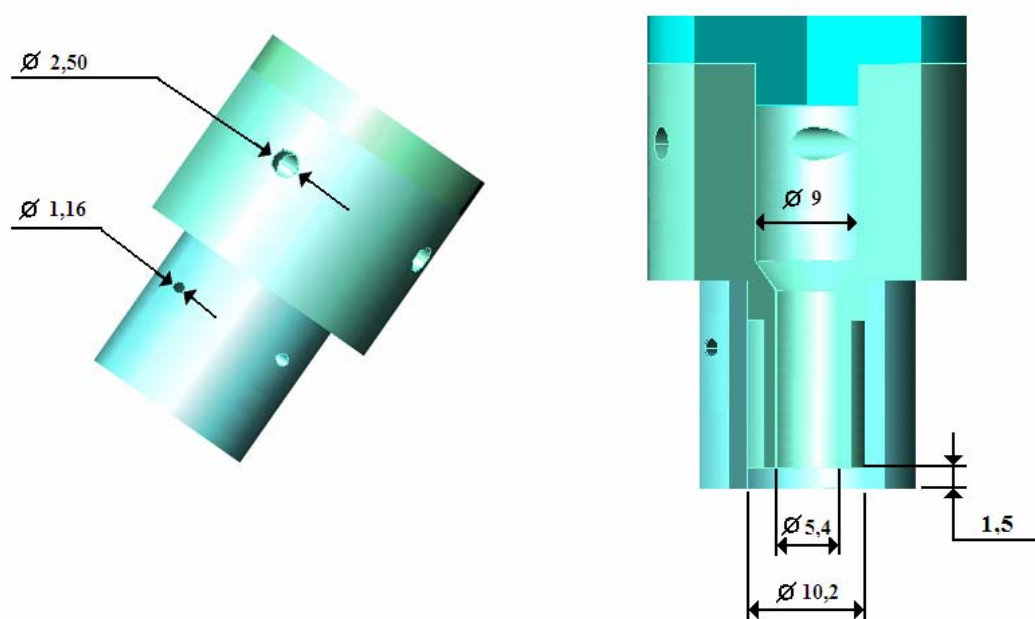


FIGURA 3.8 – Injetor dimensionado com dois canais tangenciais

4 Descrição dos experimentos

Este capítulo apresenta a descrição dos experimentos realizados no laboratório para testes de injetores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nesses experimentos são obtidos para os três injetores dimensionados no capítulo III, as vazões mássicas dos estágios de oxidante e combustível, ângulo do cone de pulverização, distribuição mássica e razão de mistura.

Através das análises experimentais torna-se possível obter parâmetros iniciais para encontrar qual dos injetores projetados atende melhor a finalidade de atomizar e prover uma combustão estável e eficiente dentro da câmara de combustão, justificando ou não a utilização de cada injetor dimensionado no projeto de um MFPL.

4.1 Instrumentação laboratorial

O laboratório para testes de injetores do INPE conta com um equipamento desenvolvido para testes de injetores utilizados em motor foguete a propelente líquido de pequeno empuxo (até 400N). Para alimentação do equipamento de testes de injetores o laboratório possui linhas de ar comprimido a pressão de 5 bar e água destilada fornecida em galões de 10 litros. Além do equipamento de testes de injetores, o laboratório conta também com uma balança digital e com um espectrofotômetro, este último de propriedade do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (IAE/CTA).

4.1.1 Equipamento de testes de injetores

O equipamento de testes de injetores é constituído por 4 tanques de 15 litros, dois tanques para líquido e dois para gás. Inicialmente, os tanques de gás são mantidos vazios para que os tanques de líquido possam ser abastecidos com água destilada. Durante o abastecimento é possível controlar a quantidade de água nos tanques através de indicadores de nível, após o abastecimento de líquido devem-se abastecer os tanques de gás com a pressão necessária aos ensaios. Caso a pressão relativa seja superior a 5 bar, pressão fornecida pela linha de gás (ar comprimido) ao equipamento, pode-se acionar um “booster”, que é parte integrante do equipamento, para elevar a pressão até no máximo 20 bar. As pressões nos tanques de gás são informadas por manômetros dispostos no painel do equipamento (FIG. 4.1).



FIGURA 4.1 – Painel do equipamento de testes de injetores

Os tanques de gás são utilizados para pressurizar os tanques de líquido. Com a abertura de uma válvula, o gás contido em um tanque passa através da tubulação e pressuriza a água no interior do tanque de líquido.

Com os tanques de líquido pressurizados pode-se através de válvulas alimentar o injetor com líquido e assim efetuar os experimentos. Para ensaios com objetivo de obter a distribuição mássica e razão de mistura o equipamento conta com uma colméia coletora de líquido (FIG. 4.2). A colméia é distanciada manualmente a 40 mm do injetor de forma que o filme cônico de líquido que sai do injetor seja totalmente coletado.

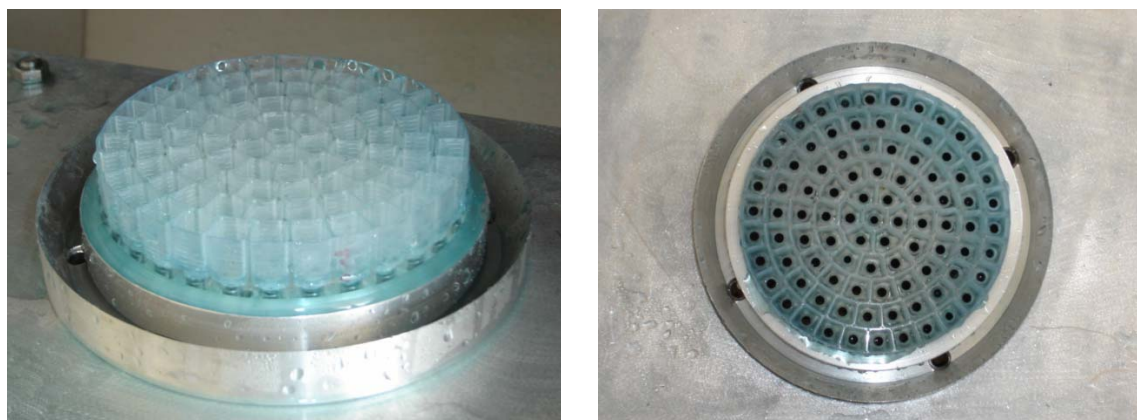


FIGURA 4.2 – Colméia coletora de líquido

A colméia coletora de líquido possui 91 divisões, cada divisão é conectada a uma mangueira que guia o líquido coletado a um tubo de ensaio para futuras medições. A colméia e as mangueiras são dispostas em um suporte que permite a fixação do conjunto no equipamento de testes de injetores. A FIG. 4.3 apresenta o suporte de colméia e mangueiras condutoras de líquido.

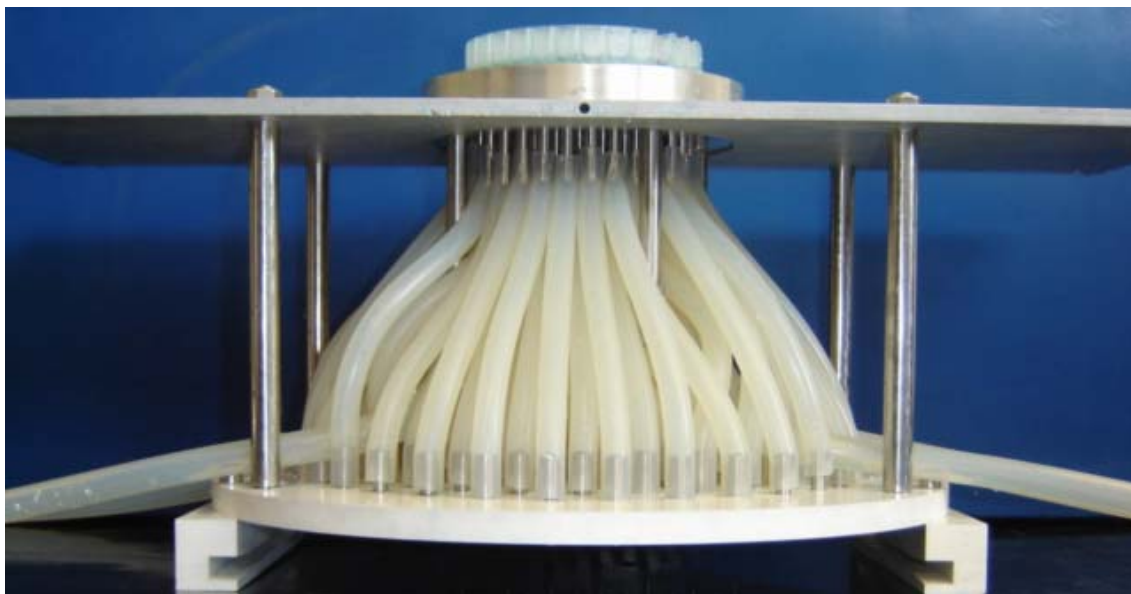


FIGURA 4.3 – Suporte de colméia e mangueiras condutoras de líquido

Os tubos de ensaios são dispostos em outro suporte que é montado abaixo do suporte de colméia e mangueiras de condução de líquido, esse suporte e os tubos de ensaio montados em seu interior são mostrados na FIG. 4.4.

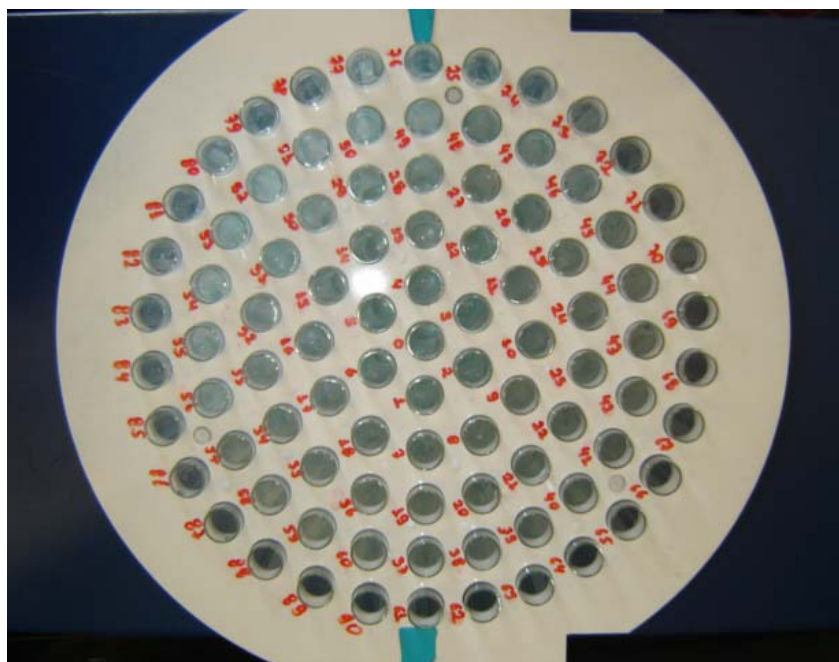


FIGURA 4.4 – Tubos de ensaio posicionados em seu suporte

A montagem completa do suporte para tubos de ensaio nas mangueiras de condução de líquido e destes no equipamento de testes de injetores é mostrada na FIG. 4.5. Pode-se observar também na FIG. 4.5 a presença de dois mostradores digital (displays) de cor vermelha.

Cada mostrador indica a pressão absoluta em um tanque de líquido. O mostrador que indica 8,1 informa a pressão do líquido contido no tanque posicionado a esquerda do equipamento (8,1 bar), esse líquido alimenta o injetor através da mangueira azul clara, enquanto que o outro mostrador informa a pressão do tanque de líquido posicionado a direita do equipamento (5,4 bar). O líquido do tanque pressurizado a 5,4 bar é enviado ao estágio de oxidante do injetor através da mangueira branca.



FIGURA 4.5 – Equipamento de testes de injetores montado

4.1.2 Balança de precisão

O laboratório conta também com uma balança digital que possui precisão de 0,001g, para sua utilização nos experimentos foi desenvolvido um suporte que possibilita a medição da massa de cada tubo de ensaio. A balança é ajustada para desconsiderar o peso do suporte e assim pode-se determinar a massa em cada tubo de ensaio. A FIG. 4.6 mostra a balança e o suporte para tubo de ensaio.



FIGURA 4.6 – Balança digital e suporte para tubo de ensaio

4.1.3 Espectrofotômetro

O espectrofotômetro é o aparelho utilizado para efetuar a espectrofotometria, que designa um método de análise baseado em medidas de absorção de radiação eletromagnética. A técnica que aqui se descreve é restrita a uma pequena região de

comprimento de onda da radiação eletromagnética, que corresponde à luz visível, ou seja, entre aproximadamente 400 e 800 nm, como ilustra a FIG. 4.7.

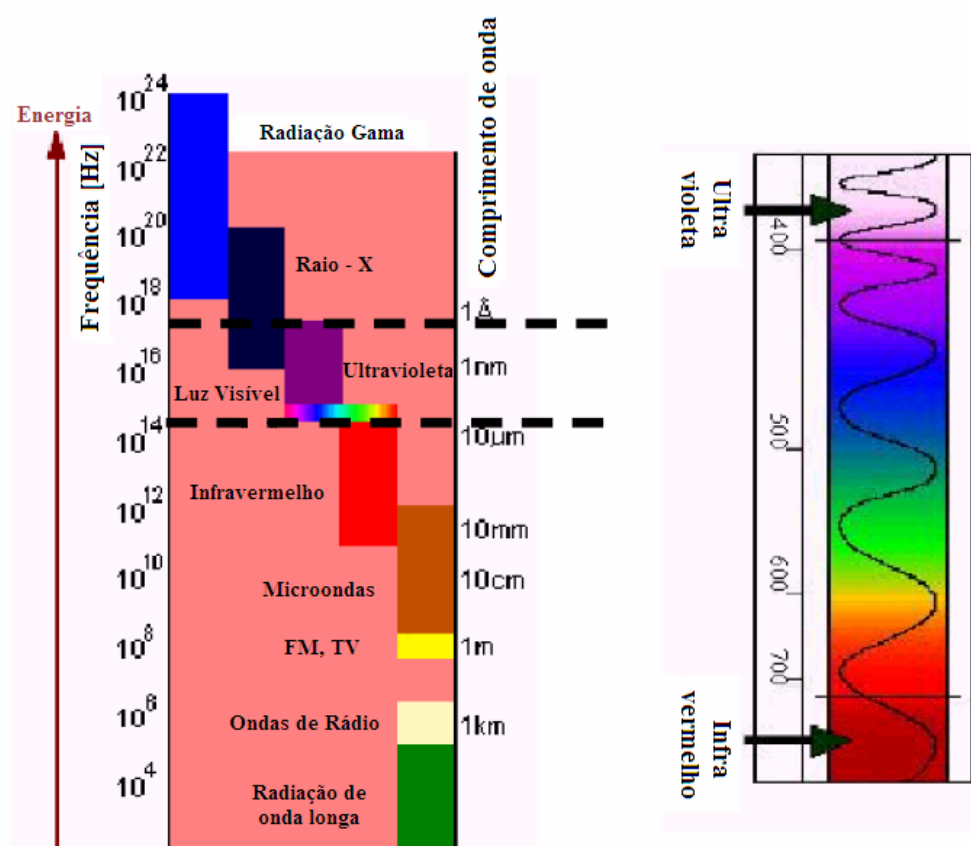


FIGURA 4.7 – Espectro eletromagnético

A radiação luminosa que atinge uma certa substância pode sofrer reflexão, refração, espalhamento ou ser absorvida pelo material. Disso resulta que somente uma parte da radiação incidente é transmitida através do material.

O processo de absorção ocorre ao nível molecular. Assim, como acontece num átomo, cada molécula caracteriza-se por possuir níveis de energia moleculares quantizados, os quais podem ser ocupados pelos elétrons das moléculas. Por outro lado, a radiação se dá quando a energia que ela transporta é igual à diferença entre dois níveis de

energia da molécula, nessa situação, a energia da radiação é transferida para a molécula e ocorre a chamada absorção de radiação.

Como moléculas de substâncias diferentes têm diferentes níveis moleculares de energia, ocorre que cada substância absorve a radiação de maneira peculiar, ou seja, os comprimentos de onda que uma certa substância absorve são característicos da sua estrutura e outras substâncias absorverão outros comprimentos de onda. Levantando-se dados referentes à intensidade de luz absorvida por uma substância, em função dos comprimentos de onda da radiação, obtêm-se uma curva chamada espectro de absorção da substância. O importante é que cada substância tem um espectro característico e, desse modo, pode-se identificar um material desconhecido a partir de sua curva de absorção, comparada com curvas de substâncias conhecidas.

Uma vez conhecido o espectro de absorção de uma dada substância, pode-se também determinar em que quantidade essa substância se apresenta em uma solução analisada. Isso é feito através da medida da intensidade de luz que atravessa a amostra, como ilustra a FIG. 4.8.

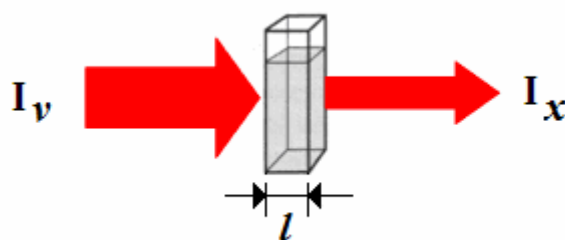


FIGURA 4.8 – Intensidade de luz que atravessa a amostra

Lambert estudou a transmissão de luz por sólidos homogêneos. Beer estendeu o trabalho de Lambert ao estudo de soluções. Pode-se apresentar as conclusões dos dois pesquisadores na forma de uma lei conhecida como a lei de Lambert-Beer.

Através dessa lei, intensidades das radiações incidentes e emergentes podem ser relacionadas com as concentrações do material presente na solução. Para tanto, aplicam-se como hipóteses:

- Os efeitos de reflexão, refração e espalhamento são considerados desprezíveis;
- A radiação incidente deve ser monocromática, isto é, conter somente um comprimento de onda.

Na FIG. 4.8 I_v e I_x são as intensidades da radiação incidente e transmitida pela amostra, respectivamente. A intensidade transmitida decai exponencialmente com o aumento do caminho percorrido na solução (comprimento l da FIG. 4.8) e com o aumento da concentração (c), podendo ser estimada pela equação a seguir:

$$I_x = I_v \cdot 10^{-\varepsilon \cdot l \cdot c} \quad (4.1)$$

Onde:

c = concentração do material em estudo;

l = comprimento interno do recipiente que contém a solução;

ε = coeficiente de absorção

A grandeza medida experimentalmente é a transmitância T que é a razão entre a intensidade incidente e a transmitida, dada pela seguinte equação:

$$T = \frac{I_x}{I_v} \quad (4.2)$$

Em relação a essa grandeza, a lei de Lambert-Beer assume a seguinte forma:

$$T = 10^{-\varepsilon.l.c} \quad (4.3)$$

A absorvância B é definida como:

$$B = -\log_{10} T \quad (4.4)$$

Assim, em relação à absorvância a lei de Lambert-Beer é escrita:

$$B = -\log_{10} T = \log_{10} (1/T) = \log_{10} (10^{\varepsilon.l.c}) \quad (4.5)$$

Portanto:

$$B = \varepsilon.l.c \quad (4.6)$$

Assim, o espectrofotômetro se torna um medidor de concentração seletivo para uma determinada substância através da seguinte relação:

$$c = \frac{B}{\varepsilon.l} \quad (4.7)$$

De uma maneira geral, para a solução de uma dada substância em solvente, analisada em um determinado comprimento de onda, pode-se traçar uma curva de absorvância B em função da concentração c . A partir dessa curva é possível determinar a concentração de qualquer amostra dessa solução.

A FIG. 4.9 ilustra o funcionamento do espectrofotômetro, uma fonte emite a luz que é dividida em feixes de diferentes comprimentos de onda por meio de um prisma óptico, a fenda de saída permite que um feixe de luz monocromática passe através da amostra contida numa tubeta e atinja um sensor que determina a quantidade de luz que foi absorvida.

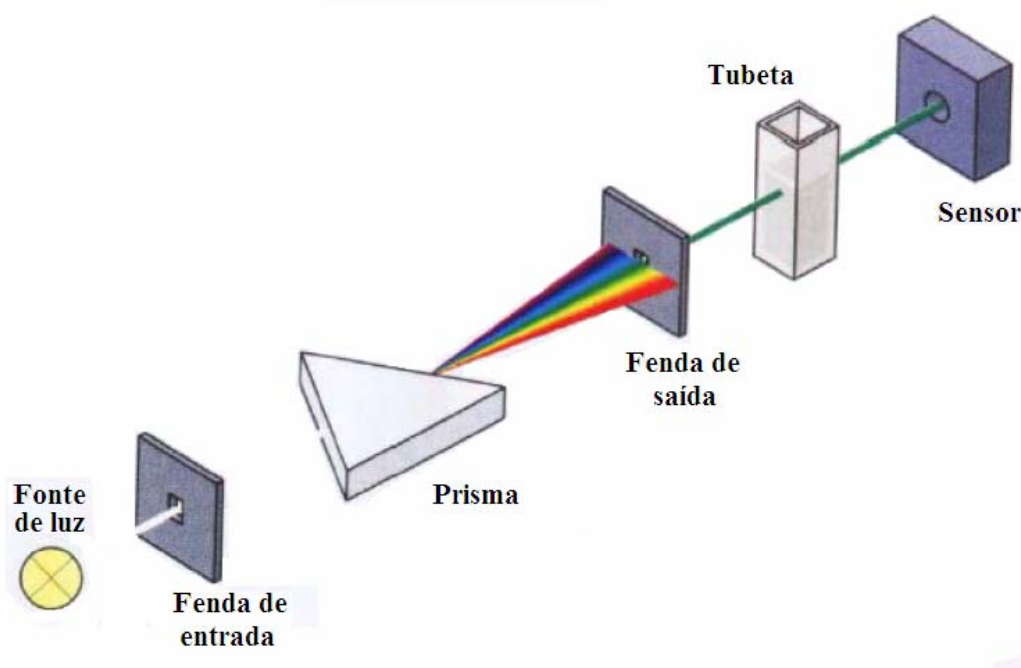


FIGURA 4.9 – Funcionamento do espectrofotômetro

A FIG. 4.10 apresenta o espectrofotômetro utilizado para o ensaio, o equipamento é de fabricação da Micronal, modelo B442. O mostrador digital posicionado no painel desse equipamento informa a concentração da substância analisada.



FIGURA 4.10 – Espectrofotômetro modelo B442

Observou-se experimentalmente que o espectrofotômetro utilizado nos ensaios possui comportamento linear, conforme demonstra a FIG. 4.11.

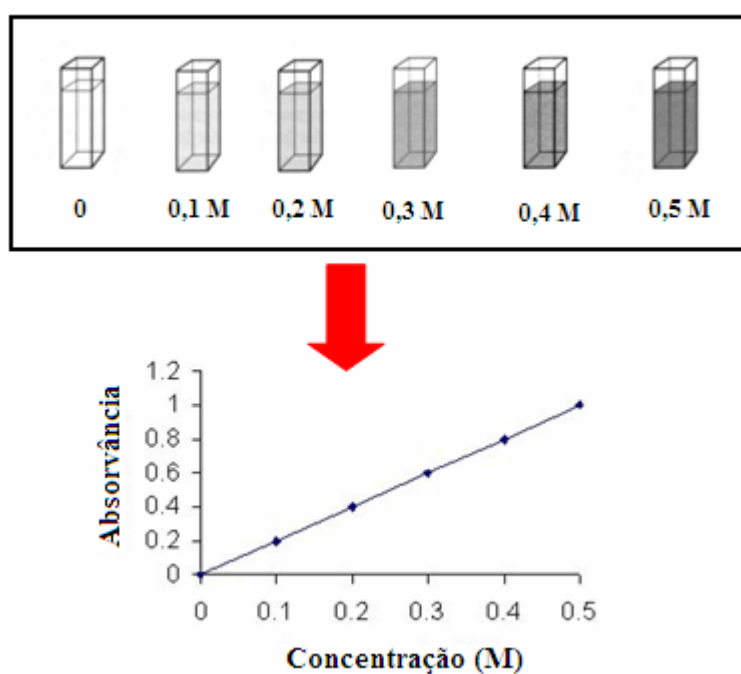


FIGURA 4.11- Comportamento linear do espectrofotômetro

4.2 Injetores e dispositivo de acoplamento

Os injetores foram adaptados para serem acoplados ao equipamento de testes através de um dispositivo de acoplamento, essa adaptação se deve ao fato do INPE desenvolver motores de pequeno empuxo, onde os injetores possuem pequenas dimensões e por isso são ensaiados já brasados ao cabeçote, portanto nesse equipamento o INPE ensaia o cabeçote inteiro e não somente o injetor, o que justifica a necessidade do dispositivo de acoplamento e das adaptações efetuadas nos injetores.

Para facilitar a manufatura, cada injetor foi projetado em três partes: tampa, estágio de oxidante e estágio de combustível (FIG. 4.12). Após a fabricação as três partes são unidas por interferência formando um injetor centrífugo bipropelente, como ilustra a FIG. 4.13.

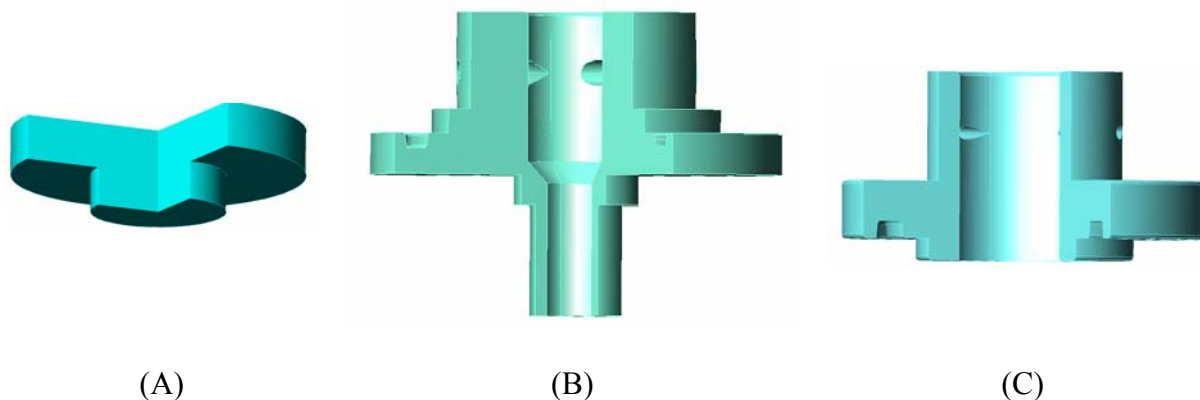


FIGURA 4.12 – Partes do injetor centrífugo bipropelente

(A) Tampa, (B) Estágio de oxidante, (C) Estágio de combustível

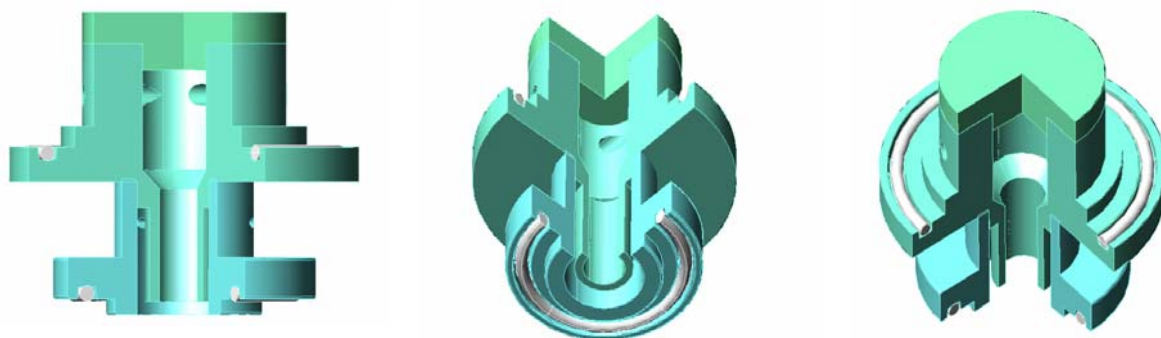


FIGURA 4.13 – Vista em corte do injetor

Anéis de vedação foram adicionados ao injetor para evitar a passagem do fluido do estágio de oxidante para o estágio de combustível e vice-versa, no interior do dispositivo de acoplamento do injetor com o banco de testes. Os projetos mecânicos dos injetores encontram-se nos Apêndices A, B e C.

O dispositivo de acoplamento, projeto mecânico no Apêndice D, permite que qualquer dos três injetores dimensionados seja ensaiado no banco de testes. O dispositivo de acoplamento e um injetor posicionado em seu interior são ilustrados na FIG. 4.14.

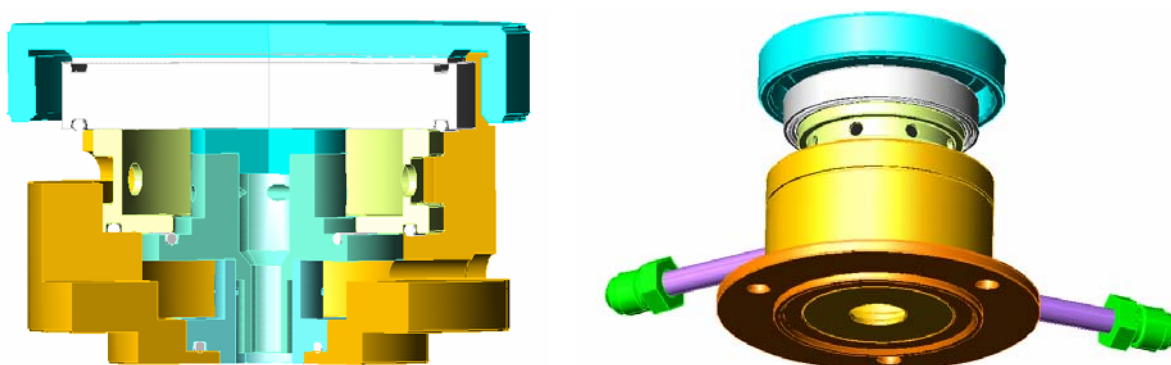


FIGURA 4.14 – Dispositivo de acoplamento

4.3 Metrologia dos injetores

Deve-se fazer a metrologia dos injetores após a sua fabricação para verificar se as dimensões e tolerâncias de projeto foram atendidas. As tolerâncias foram determinadas em função da variação de vazão mássica do injetor e das limitações de fabricação; por exemplo, com a aplicação da metodologia proposta no capítulo 3 observa-se que uma variação de 0,02mm no raio do canal tangencial representa variação de 5g/s na vazão mássica do injetor. Porém, por limitações de manufatura a tolerância dos canais não pode ser inferior a 0,02mm.

Para as medições dos canais tangenciais, utilizou-se um equipamento de medição a laser da marca HP que possui sistema de medição por coordenadas com ampliação de até quarenta e oito vezes do objeto medido. Para as demais dimensões utilizou-se um paquímetro e um micrômetro digital da marca Mitutoyo. Todos os equipamentos foram aferidos antes das medições.

As TABS. 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados da metrologia dos três injetores fabricados e as suas dimensões nominais com as tolerâncias de projeto. Os injetores fabricados com seis, quatro e dois canais tangenciais podem ser visualizados através das FIGS. 4.15, 4.16 e 4.17 respectivamente.

Após certificado que as dimensões dos injetores fabricados atendem as tolerâncias de projeto, através da metrologia, pode-se iniciar a preparação para realização dos experimentos.



FIGURA 4.15 – Injetor fabricado com seis canais tangenciais

TABELA 4.1 – Metrologia do injetor fabricado com seis canais tangenciais

Dimensão	Nominal (mm)	Tolerância (mm)	continua Medida
			(mm)
Canal tangencial de oxidante 1 (r_{bxo})	0,82	+/- 0,02	0,80
Canal tangencial de oxidante 2 (r_{bxo})	0,82	+/- 0,02	0,82
Canal tangencial de oxidante 3 (r_{bxo})	0,82	+/- 0,02	0,84
Canal tangencial de oxidante 4 (r_{bxo})	0,82	+/- 0,02	0,81
Canal tangencial de oxidante 5 (r_{bxo})	0,82	+/- 0,02	0,81
Canal tangencial de oxidante 6 (r_{bxo})	0,82	+/- 0,02	0,82
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	4,5	+/- 0,1	4,55
Raio de saída da câmara (r_{kso})	2,7	+/- 0,1	2,70
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	4,92	+/- 0,02	4,93

TABELA 4.1 – Metrologia do injetor fabricado com seis canais tangenciais

			conclusão
Canal tangencial de combustível 1 (r_{bxc})	0,4	+/- 0,02	0,39
Canal tangencial de combustível 2 (r_{bxc})	0,4	+/- 0,02	0,42
Canal tangencial de combustível 3 (r_{bxc})	0,4	+/- 0,02	0,39
Canal tangencial de combustível 4 (r_{bxc})	0,4	+/- 0,02	0,38
Canal tangencial de combustível 5 (r_{bxc})	0,4	+/- 0,02	0,41
Canal tangencial de combustível 6 (r_{bxc})	0,4	+/- 0,02	0,40
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	5,1	+/- 0,1	5,13
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	5,1	+/- 0,1	5,13
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	2,4	+/- 0,02	2,41
Comprimento de mistura (l_{inj})	1,5	+/- 0,02	1,50

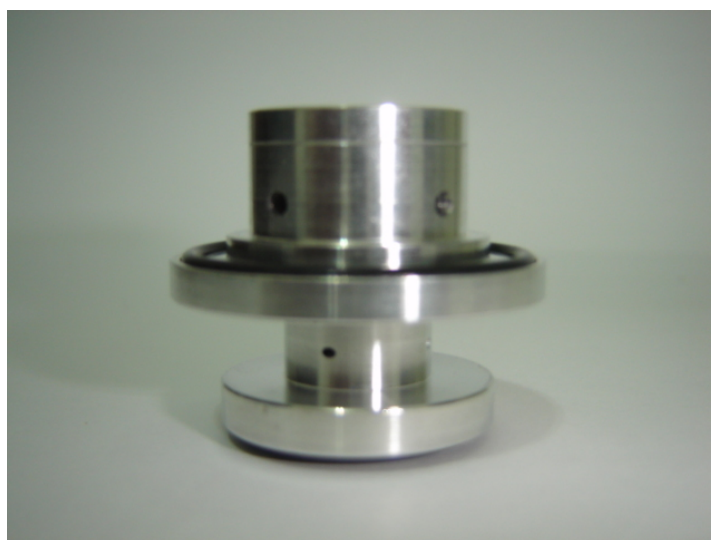


FIGURA 4.16 – Injetor fabricado com quatro canais tangenciais

TABELA 4.2 – Metrologia do injetor fabricado com quatro canais tangenciais

Dimensão	Nominal (mm)	Tolerância (mm)	Medida (mm)
Canal tangencial de oxidante 1 (r_{bxo})	0,95	+/- 0,02	0,93
Canal tangencial de oxidante 2 (r_{bxo})	0,95	+/- 0,02	0,95
Canal tangencial de oxidante 3 (r_{bxo})	0,95	+/- 0,02	0,96
Canal tangencial de oxidante 4 (r_{bxo})	0,95	+/- 0,02	0,94
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	4,5	+/- 0,1	4,53
Raio de saída da câmara (r_{kso})	2,7	+/- 0,1	2,68
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	5,7	+/- 0,02	5,71
Canal tangencial de combustível 1 (r_{bxc})	0,46	+/- 0,02	0,46
Canal tangencial de combustível 2 (r_{bxc})	0,46	+/- 0,02	0,45
Canal tangencial de combustível 3 (r_{bxc})	0,46	+/- 0,02	0,48
Canal tangencial de combustível 4 (r_{bxc})	0,46	+/- 0,02	0,44
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	5,1	+/- 0,1	5,08
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	5,1	+/- 0,1	5,08
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	2,76	+/- 0,02	2,75
Comprimento de mistura (l_{inj})	1,5	+/- 0,02	1,49

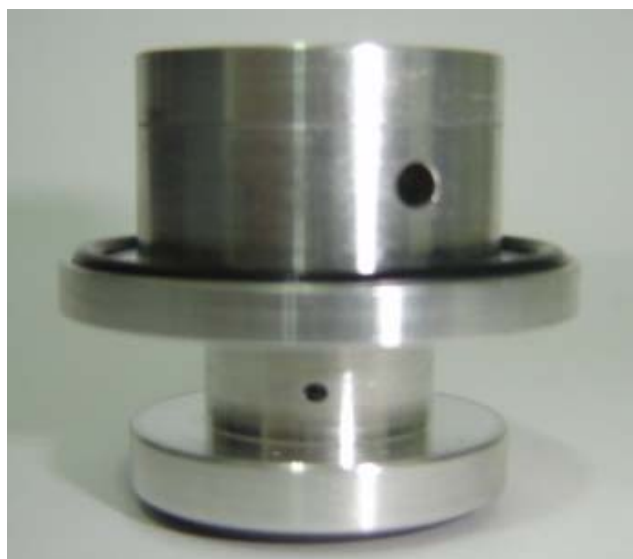


FIGURA 4.17 – Injetor fabricado com dois canais tangenciais

TABELA 4.3 – Metrologia do injetor fabricado com dois canais tangenciais

Dimensão	Nominal (mm)	Tolerância (mm)	Medida (mm)
Canal tangencial 1 (r_{bxo})	1,25	+/- 0,02	1,24
Canal tangencial 2 (r_{bxo})	1,25	+/- 0,02	1,26
Raio de entrada da câmara (r_{ko})	4,5	+/- 0,1	4,54
Raio de saída da câmara (r_{kso})	2,7	+/- 0,1	2,72
Comprimento do canal tangencial (l_{bxo})	5,7	+/- 0,02	5,80
Canal tangencial 1 (r_{bxc})	0,46	+/- 0,02	0,45
Canal tangencial 2 (r_{bxc})	0,46	+/- 0,02	0,45
Raio de entrada da câmara (r_{kc})	5,1	+/- 0,1	5,11
Raio de saída da câmara (r_{ksc})	5,1	+/- 0,1	5,11
Comprimento do canal tangencial (l_{bxc})	2,76	+/- 0,02	2,78
Comprimento de mistura (l_{inj})	1,5	+/- 0,02	1,50

4.4 Preparação para realização dos experimentos

Antes de iniciar os experimentos os injetores e o dispositivo de acoplamento devem ser limpos e desengraxados, para retirar possíveis resíduos do processo de fabricação. O equipamento de testes de injetores deve ser carregado com água destilada pura no tanque posicionado a direita. O tanque posicionado a esquerda deve ser carregado com uma mistura de água destilada e corante. Para cada 10 litros de água destilada diluiu-se 100 ml de corante da cor azul. O tanque carregado com a mistura de água destilada com corante (tanque posicionado a esquerda do equipamento de testes) fornecerá fluido ao estágio de combustível do injetor. Em seguida, o dispositivo de acoplamento deve ser posicionado no equipamento de testes e os tanques de líquido pressurizados. O tanque de líquido da direita do equipamento deve ser pressurizado a 5,4 bar, pressão nominal do estágio de oxidante dos injetores dimensionados, e o tanque de líquido localizado a esquerda do equipamento deve ser pressurizado a 8,1 bar, pressão nominal do estágio de combustível dos injetores dimensionados.

4.5 Realização dos experimentos

Os experimentos descritos abaixo foram realizados para cada um dos três injetores dimensionados, sendo necessário após o ensaio de cada injetor a preparação descrita no item 4.4 para a realização do ensaio seguinte. Os ensaios realizados foram: vazão mássica, ângulo de cone, distribuição mássica e razão de mistura.

4.5.1 Vazão mássica

Este primeiro experimento tem como objetivo obter a vazão mássica de cada estágio do injetor em suas pressões nominais de trabalho. Para determinar experimentalmente a vazão mássica de cada estágio do injetor em suas pressões nominais deve-se inicialmente executar o procedimento do item 4.4, em seguida posiciona-se o injetor a ser ensaiado no interior do dispositivo de acoplamento e os tubos de ensaio dispostos em seu suporte (FIG. 4.4) no equipamento de testes de injetores. Antes de serem posicionados no equipamento de testes os tubos de ensaio vazios dispostos no suporte são pesados na balança descrita no item 4.1.2.

Com o injetor e os tubos de ensaio posicionados abre-se simultaneamente a válvula de alimentação de fluido para o estágio de combustível ou de oxidante do injetor, o que se deseja determinar, e ao mesmo tempo se inicia a contagem de tempo com o auxílio de um cronômetro digital, decorrido um determinado intervalo de tempo Δt fecha-se a válvula e simultaneamente pára-se o cronômetro digital. Os tubos de ensaio são retirados do equipamento de testes e pesados, do valor obtido subtraí-se o peso dos tubos de ensaio vazios, pode-se assim determinar o valor da massa de líquido armazenada nos tubos de ensaio (Δm). A massa de líquido Δm é armazenada durante um intervalo de tempo Δt , pode-se então determinar a vazão mássica (\dot{m}) pela seguinte equação:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Deve-se observar que os injetores foram projetados para trabalhar com oxigênio líquido como oxidante e querosene como combustível e que durante os experimentos utiliza-se água destilada como oxidante e combustível. Como as densidades do oxigênio

líquido e do querosene são diferentes da água destilada, deve-se utilizar um fator de correção para determinar a vazão mássica, permitindo assim comparar o valor obtido através dos experimentos com a vazão mássica nominal. Segundo Souza (2001), a correção da vazão mássica pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\dot{m}_r = \dot{m}_{\text{água}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_{\text{água}}}} \quad (4.9)$$

Onde:

ρ_r = densidade do fluido, oxidante ou combustível;

$\rho_{\text{água}}$ = densidade da água.

Pode-se com a aplicação da equação 4.2 obter a vazão mássica nominal de água destilada para os estágios de oxidante e combustível dos três injetores dimensionados no capítulo 3, conforme apresenta a TAB. 4.4.

TABELA 4.4 – Vazão mássica nominal de água destilada

Injetor	06 Canais	04 Canais	02 Canais
Vazão de Oxidante	0,130 (kg/s)	0,130 (kg/s)	0,131 (kg/s)
Vazão de Combustível	0,057 (kg/s)	0,058 (kg/s)	0,058 (kg/s)
Vazão Total	0,187 (kg/s)	0,188 (kg/s)	0,189 (kg/s)

4.5.2 Ângulo de cone

Este experimento objetiva obter o ângulo de cone de saída do injetor, teoricamente o valor deste ângulo deve ser entre o ângulo calculado para o estágio de oxidante e o calculado para o estágio de combustível. Esse parâmetro de desempenho permite ao projetista estimar o raio de abrangência da mistura no interior da câmara de combustão, pode-se com essa informação, por exemplo, verificar se a distância adotada entre os injetores no cabeçote de injeção está coerente ou se há necessidade de reposicionar os injetores no cabeçote para que a mistura ocorra da forma desejada no interior da câmara de combustão.

Inicialmente deve-se preparar o equipamento de testes de injetores, conforme descrito no item 4.4, em seguida o injetor a ser ensaiado deve ser posicionado dentro do dispositivo de acoplamento. Para determinar o ângulo de cone utiliza-se uma câmara fotográfica digital para capturar a imagem do ângulo que a mistura forma ao sair do injetor, conforme ilustra a FIG. 4.14.

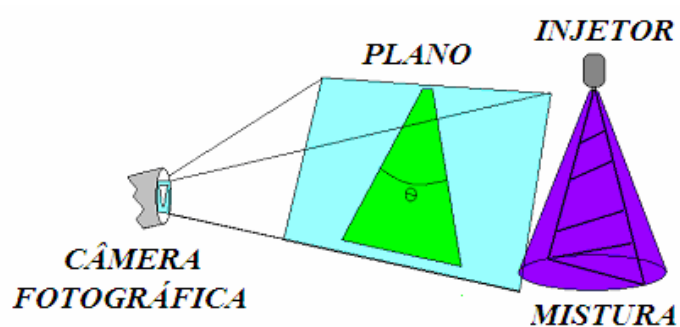


FIGURA 4.18 - Procedimento para medição do ângulo de cone (Garcia, 2005)

Com a câmara fotográfica digital posicionada abrem-se as válvulas, posicionadas no painel do equipamento de testes, de alimentação dos estágios de oxidante e combustível

do injetor iniciando a mistura e a formação do ângulo de cone de saída, pode-se com o auxílio da câmera fotográfica digital capturar o ângulo de cone de saída do injetor, em seguida importa-se a imagem digital capturada para o “software AUTOCAD”, onde se efetua a medição e assim obtêm-se o valor do ângulo de cone.

4.5.3 Distribuição mássica

Determinar experimentalmente a distribuição da vazão mássica é importante para estimar como a mistura injetada distribui-se ao longo do raio de abrangência do injetor no interior da câmara de combustão. Para a realização desse experimento, todos os 91 tubos de ensaio devem ser pesados vazios, após determinada a massa de cada tubo de ensaio deve-se posicionar os tubos de ensaio em seu suporte e este no equipamento de testes de injetores, montagem visualizada na FIG. 4.5, em seguida executa-se o procedimento descrito no item 4.4, posiciona-se o injetor a ser ensaiado no interior do dispositivo de acoplamento e este último no equipamento de testes de injetores.

Com todas as montagens efetuadas abrem-se as válvulas responsáveis pelo fornecimento de fluido para os estágios de oxidante e combustível, simultaneamente, e inicia-se a contagem de tempo através de um cronômetro digital, após decorridos menos de seis segundos fecham-se as válvulas e para-se o cronômetro digital. É importante que o tempo de permanência de abertura das válvulas seja inferior a seis segundos, tempo em que os tubos de ensaio ficam totalmente cheios. Essa limitação ocorre porque o equipamento de testes de injetores foi projetado para ensaiar pequenas vazões mássicas, que é o caso dos motores utilizados em satélites.

Ao sair do injetor, a mistura é recolhida pela colméia coletora de líquido, visualizada na FIG. 4.2, e conduzida através de mangueiras, FIG. 4.3, até os tubos de

ensaio posicionados em seu suporte. A colméia coletora de fluido é posicionada a uma distância de 40 mm da saída do injetor para que a mistura possa ser totalmente recolhida.

Após o fechamento das válvulas os tubos de ensaio contendo a mistura são retirados do equipamento de testes e pesados, do valor medido de cada tubo de ensaio que contem mistura subtrai-se o valor do próprio tubo de ensaio, vazio pesado anteriormente, dessa maneira pode-se determinar a distribuição mássica da mistura ao longo do raio de abrangência do injetor.

4.5.4 Razão de mistura

Através deste experimento, pode-se estimar a razão de mistura entre oxidante e combustível ao longo do raio de abrangência do injetor em estudo. Para este experimento aproveita-se o líquido coletado em cada tubo de ensaio através do experimento anterior (distribuição mássica).

Utilizam-se amostras de água destilada pura e de água destilada misturada com corante azul, 100ml de corante para cada 10 litros de água destilada, para calibrar o espectrofotômetro. Após calibrado, o espectrofotômetro informa através de um mostrador digital em seu painel, FIG. 4.7, a concentração da mistura analisada. Quando o mostrador indicar, 100 significa que a mistura analisada é constituída por 100% de combustível e quando a indicação for 0 significa 100% de oxidante. Os valores intermediários indicam a concentração de cada componente, oxidante e combustível, na mistura analisada. Por exemplo, se o mostrador indicar 30 significa que a mistura possui 30% de combustível e 70% de oxidante.

Com o espectrofotômetro calibrado, retira-se amostra da mistura coletada em um tubo de ensaio através do experimento para determinar a distribuição mássica e coloca-se

no espectrofotômetro para análise da mistura, esse procedimento deve ser repetido para todos os tubos de ensaio, obtêm-se assim a razão de mistura dos componentes ao longo do raio de abrangência do injetor ensaiado.

4.6 Avaliação da incerteza dos experimentos

Os experimentos para obtenção de vazão mássica e distribuição mássica dos injetores em estudo possuem incerteza em suas medições, uma vez que há necessidade de abrir as válvulas de admissão de fluido ao mesmo tempo em que se inicia a contagem de tempo com um cronômetro, tudo manualmente. Pode-se analisar a incerteza nas medições através da aplicação da norma NIT-DICLA-021 do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

A vazão mássica dos experimentos pode ser determinada em cada estágio do injetor através da seguinte equação:

$$\dot{m} = \frac{\rho_{\text{água}} \cdot W \cdot n \cdot f_{bx}}{\tau_{\text{exp}}} \quad (4.10)$$

Onde:

\dot{m} = vazão mássica do estágio corrigida para água;

$\rho_{\text{água}}$ = densidade da água;

W = velocidade do fluido no interior de um canal tangencial do estágio determinada no capítulo 3 deste trabalho;

n = número de canais tangenciais do estágio;

f_{bx} = área de cada canal tangencial do estágio;

τ_{exp} = tempo do ensaio.

A equação 4.10 aplicada à norma DICLA-021 resulta na equação 4.11, através dessa equação é possível obter o valor de erros de medição por estágio do injetor.

$$u^2_{(\dot{m})} = \left(\frac{\rho_{\text{água}} \cdot W \cdot n \cdot f_{bx}}{\tau_{exp}} \right)^2 \cdot u^2_{(\tau)} \quad (4.11)$$

Sendo:

$u^2_{(\dot{m})}$ = valor do erro propagado por estágio;

$u^2_{(\tau)}$ = estimativa do tempo gasto entre a parada do cronômetro e o fechamento das válvulas.

Com a aplicação da equação 4.11 e estimando o tempo gasto entre a parada do cronômetro e o fechamento das válvulas em 0,6 segundo, pode-se determinar a incerteza nos experimentos para determinação de vazão mássica e distribuição mássica, conforme apresenta a TAB. 4.5. No experimento que determina o ângulo de cone de saída dos injetores a leitura só é efetuada quando o escoamento se estabiliza, a incerteza nesse caso pode ser desprezada.

TABELA 4.5 – Incerteza dos experimentos

Experimento	Injetor	Tempo do experimento (s)	Estágio de Oxidante (kg/s)	Estágio de Combustível (kg/s)	Total por injetor (kg/s)
Vazão mássica	06 canais	5,32	0,018	0,014	0,032
	04 canais	5,15	0,017	0,013	0,030
	02 canais	5,26	0,016	0,011	0,027
Distribuição mássica	06 canais	5,22	0,0183	0,0142	0,0325
	04 canais	5,03	0,018	0,013	0,031
	02 canais	5,11	0,017	0,011	0,028

Como já discutido anteriormente, o equipamento de testes de injetores utilizado foi desenvolvido para motores de pequeno empuxo, que possuem menor vazão mássica que os injetores ensaiados. Assim, os tubos coleta de fluido são preenchidos em seis segundos, limitando o ensaio de vazão mássica a esse período. Pode-se observar que devido ao curto período dos ensaios as incertezas calculadas assumiram valores relativamente elevados.

5 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente dos principais parâmetros de desempenho dos três injetores dimensionados no capítulo 3. Os resultados apresentados foram obtidos através dos experimentos descritos no capítulo 4.

5.1 Vazão mássica

A TAB. 5.1 apresenta as vazões mássicas obtidas experimentalmente para os três injetores dimensionados e sua comparação com as vazões mássicas nominais, além das incertezas nas medições.

TABELA 5.1 – Vazões mássicas nominais, experimentais e incertezas nas medições

Vazão mássica	Injetor	Nominal (kg/s)	Experimental (kg/s)	Incerteza (kg/s)
Oxidante	06 canais	0,130	0,115	0,018
	04 canais	0,130	0,111	0,017
	02 canais	0,131	0,118	0,016
Combustível	06 canais	0,057	0,052	0,014
	04 canais	0,058	0,050	0,013
	02 canais	0,058	0,053	0,011
Total	06 canais	0,187	0,167	0,032
	04 canais	0,188	0,161	0,030
	02 canais	0,189	0,171	0,027

Apesar dos valores obtidos experimentalmente estarem dentro do intervalo de incerteza, através de melhorias na fabricação dos injetores e desenvolvimento de um equipamento próprio para testes de injetores utilizados em motores de médio e grande empuxo é possível obter resultados mais próximos dos valores nominais. As melhorias no processo de fabricação podem ocorrer principalmente nos canais tangenciais através da utilização de métodos de furação mais precisos como eletroerosão ou furação a laser com o auxílio de refrigeração com água, este último melhora também o acabamento superficial dos canais.

5.2 Distribuição da vazão mássica

Os resultados obtidos através do experimento para determinar a distribuição da vazão mássica, descrito no capítulo 4, são apresentados em gráficos de superfície para facilitar a visualização da distribuição da vazão mássica ao longo do raio de abrangência do injetor ensaiado. Durante o ensaio a vazão mássica é coletada por 91 tubos de ensaio, o tubo de ensaio que coletar a maior quantidade de massa será usado como referência, ou seja, o gráfico será normalizado em relação a maior massa coletada. As FIGS. 5.1 e 5.2 apresentam a distribuição da vazão mássica ao longo do raio de abrangência do injetor com seis canais tangenciais.

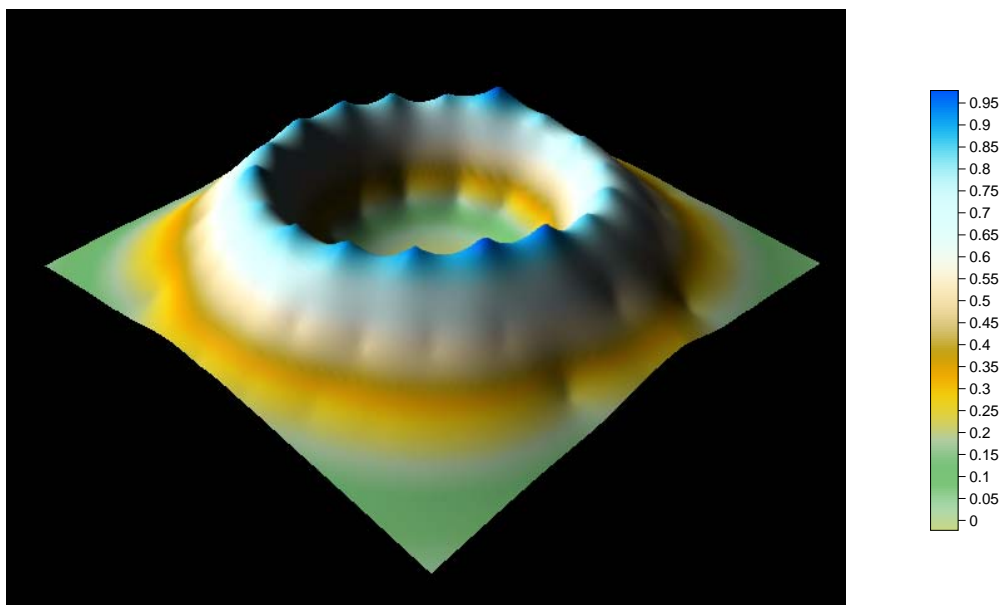


FIGURA 5.1 – Superfície da distribuição mássica do injetor com seis canais

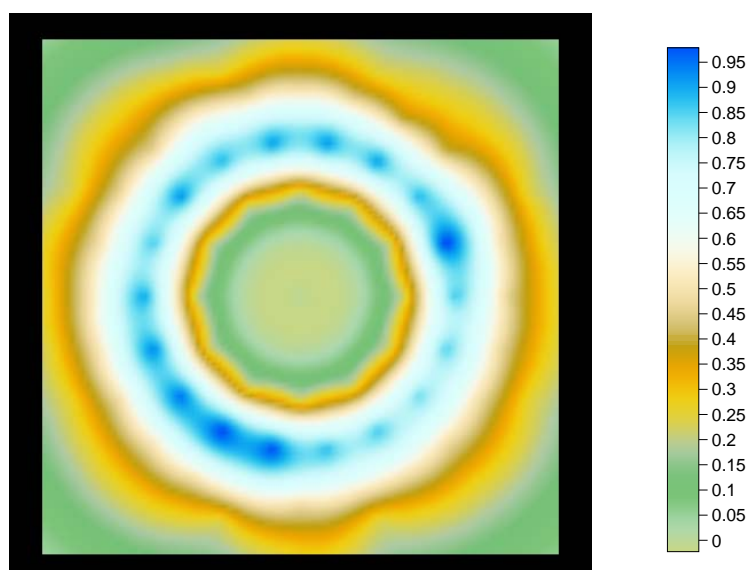


FIGURA 5.2 – Distribuição mássica do injetor com seis canais

Pode-se através das FIGS. 5.3 e 5.4 visualizar graficamente os resultados obtidos experimentalmente da distribuição da vazão mássica para o injetor dimensionado com quatro canais tangenciais.

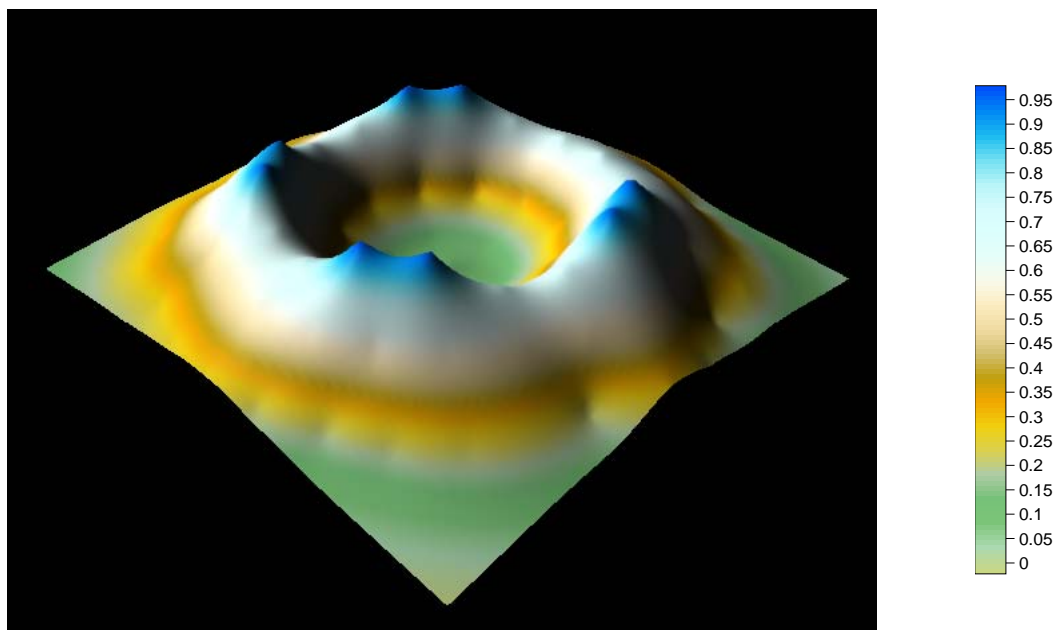


FIGURA 5.3 – Superfície da distribuição mássica do injetor com quatro canais

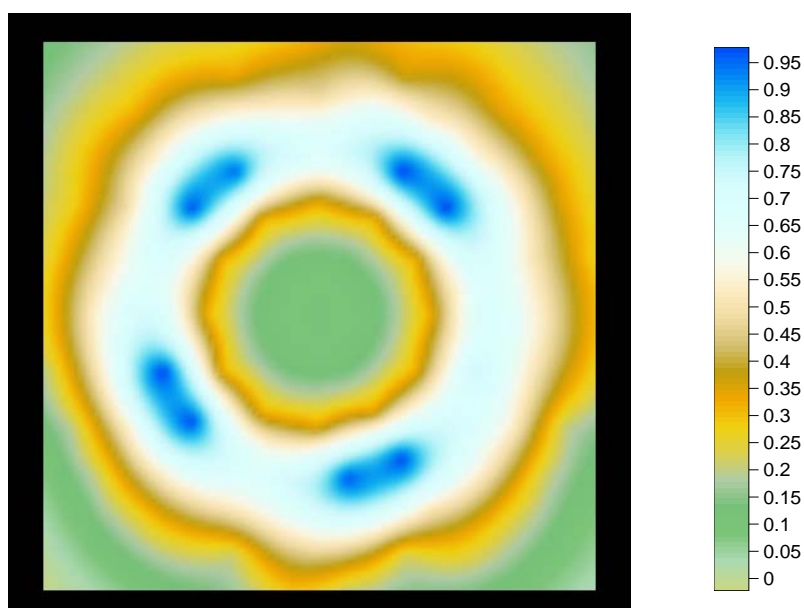


FIGURA 5.4 – Distribuição mássica do injetor com quatro canais

Os resultados do experimento para determinação da distribuição da vazão mássica do injetor com dois canais tangenciais são mostrados nas FIGS. 5.5 e 5.6.

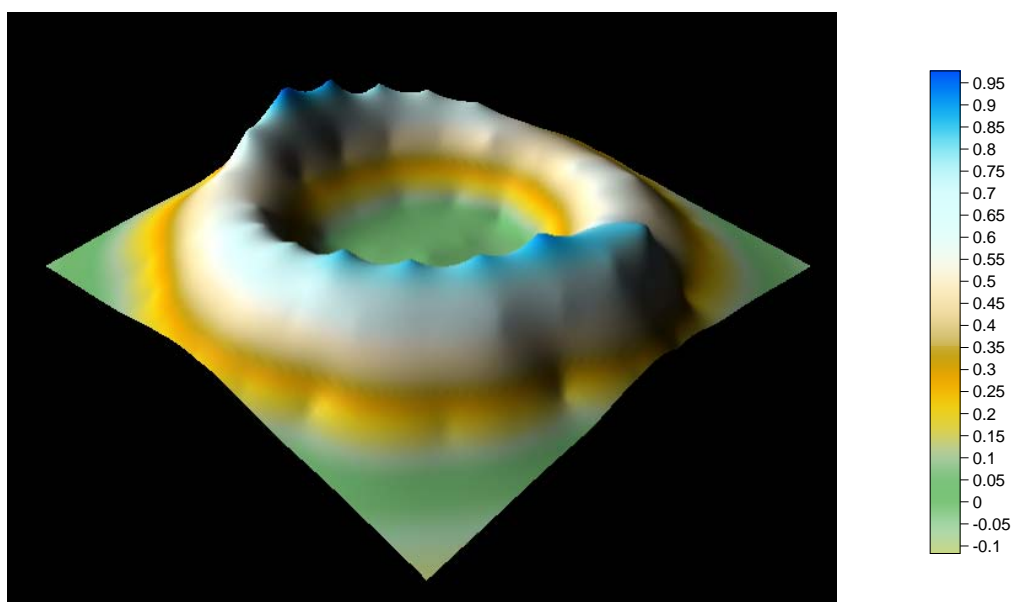


FIGURA 5.5 – Superfície da distribuição mássica do injetor com dois canais

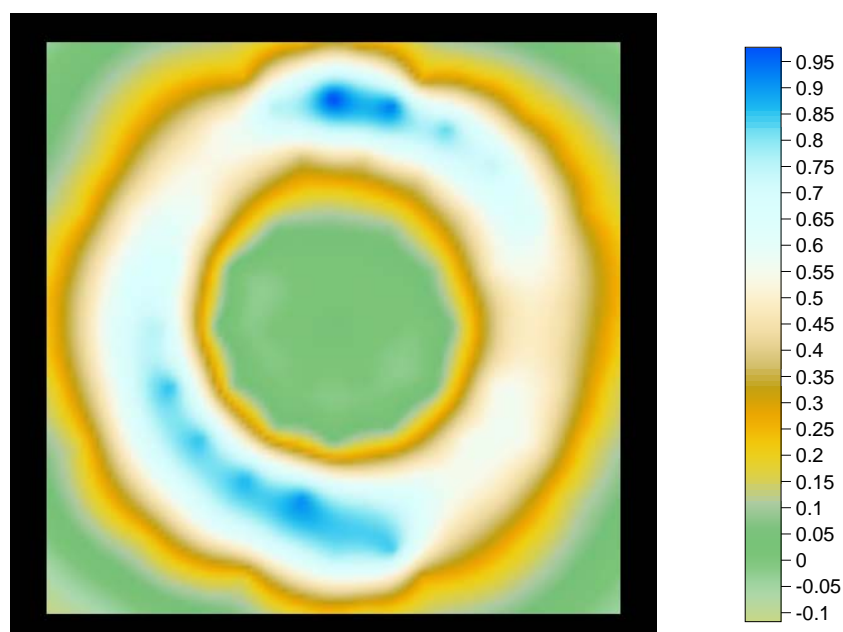


FIGURA 5.6 – Distribuição mássica do injetor com dois canais

Observa-se através dos gráficos que existe uma relação direta entre o número de canais tangenciais e a distribuição mássica da mistura ao longo do raio de abrangência do injetor. Nota-se que a distribuição mássica se torna mais uniforme com o aumento do número de canais tangenciais do injetor, como demonstram as FIGS. 5.1 a 5.6. O injetor

com dois canais tangenciais apresentou dois picos de concentração de massa ao longo de seu raio de abrangência, o injetor com quatro canais tangenciais apresentou quatro picos de concentração de massa e o injetor com seis canais tangenciais apresentou a melhor distribuição mássica entre os três injetores, sua distribuição é mais uniforme ao longo do raio de abrangência do injetor. Porém, os picos de concentração de massa nos injetores de quatro e dois canais não são acentuados.

5.3 Distribuição de razão de mistura

A razão de mistura global (K_m) foi determinada em função da vazão mássica de oxidante e de combustível dos injetores. Como nos ensaios utilizou-se água destilada torna-se necessário determinar a razão de mistura para essa condição experimental. As vazões mássicas de projeto convertidas para água destilada, através da equação 4.9, são $\dot{m}_o=0,130$ (kg/s) e $\dot{m}_c=0,058$ (kg/s). Determinadas as vazões mássicas pode-se com a aplicação da equação 3.36 calcular a razão de mistura global ($K_m=2,24$).

Baseado no item 4.5.4, para uma razão de mistura 2,24, que corresponde ao K_m global, o espectrofotômetro deve apresentar em seu mostrador digital o valor 31. Para os três injetores em estudo levantou-se a distribuição de razão de mistura. As FIGS. 5.7 a 5.9 mostram a distribuição de razão de mistura utilizando a indicação direta do espectrofotômetro.

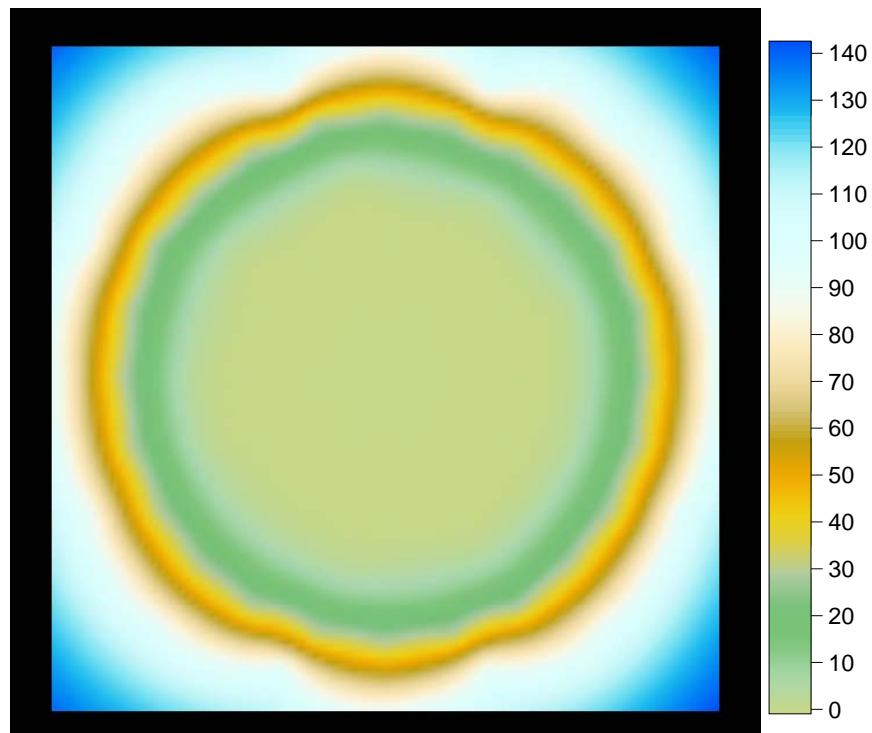


FIGURA 5.7 - Razão de mistura experimental do injetor com seis canais

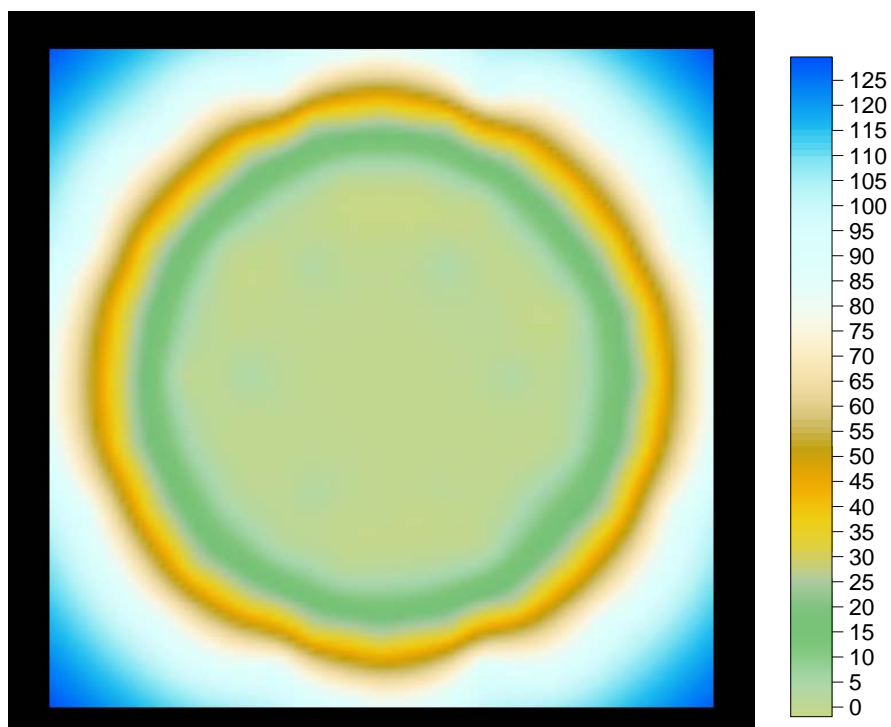


FIGURA 5.8 - Razão de mistura experimental do injetor com quatro canais

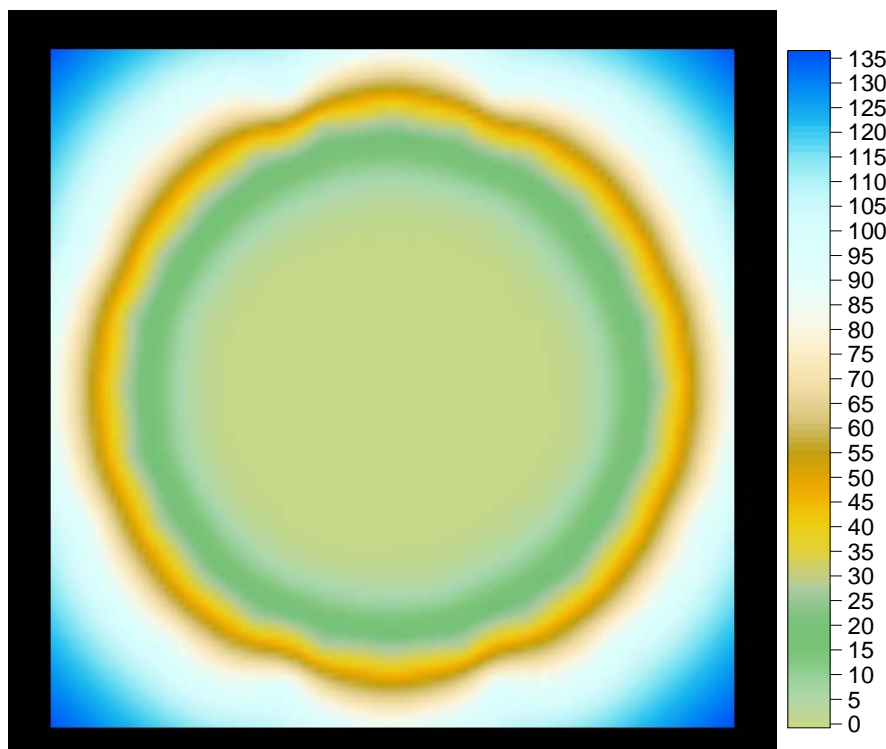


FIGURA 5.9 - Razão de mistura do injetor com quatro canais tangenciais

Na região central as misturas analisadas possuem grandes concentrações de oxidante, ou seja, a indicação do espectrofotômetro atinge valores próximos a zero, o que corresponde a 100% de oxidante. Entre as regiões central e periférica as misturas apresentam variações na razão de mistura, as concentrações de oxidante e combustível próximas da razão de mistura global de projeto são encontradas na região indicada pelo número 31. A região periférica apresenta alta concentração de combustível, indicações no espectrofotômetro com valores próximos a 100, que corresponde a 100% de combustível.

Observou-se experimentalmente que com a variação dos números de canais tangenciais dos injetores a razão de mistura não sofreu grandes variações e que a razão de mistura global de projeto somente é atingida em uma determinada faixa do cone que está diretamente relacionada o ângulo de cone de saída dos propelentes.

5.4 Ângulo de cone de saída

Segundo Gregoryev (2007), baseado em resultados experimentais, em injetores centrífugos bipropelente com vazão mássica inferior a 0,5 kg/s o ângulo de cone de saída (2α) pode ser estimado entre o valor do ângulo de cone calculado para o estágio de combustível ($2\alpha_c$) e o valor calculado para o estágio de oxidante ($2\alpha_o$). Pode-se com a aplicação da equação 3.17 e 3.35 calcular o ângulo de cone dos estágios de oxidante e combustível do injetor. A TAB. 5.2 mostra os valores calculados dos ângulos de cone dos estágios de combustível e oxidante para os três injetores dimensionados, considerando oxigênio líquido e querosene como oxidante e combustível respectivamente. Calculam-se também os ângulos de cone para os estágios de combustível e oxidante considerando a água destilada como oxidante e combustível, os resultados são apresentados na TAB. 5.3.

TABELA 5.2 – Ângulo de cone calculado para oxigênio líquido e querosene

Injetor	06 Canais	04 Canais	02 Canais
Ângulo de Cone de Combustível ($2\alpha_c$)	113°	114°	115°
Ângulo de Cone de Oxidante ($2\alpha_o$)	102°	109°	104°

TABELA 5.3 – Ângulo de cone calculado para água destilada

Injetor	06 Canais	04 Canais	02 Canais
Ângulo de Cone de Combustível ($2\alpha_c$)	114°	115°	115°
Ângulo de Cone de Oxidante ($2\alpha_o$)	103°	110°	105°

Através dos valores apresentados nas TABS. 5.2 e 5.3 nota-se que os ângulos de cone de combustível e oxidante não sofrem grandes variações quando substitui-se o fluido de trabalho pela água destilada.

Os valores de ângulo de cone de saída (2α) obtidos experimentalmente para os injetores com seis, quatro e dois canais tangenciais podem ser visualizados através das FIGS. 5.10, 5.11 e 5.12 respectivamente.

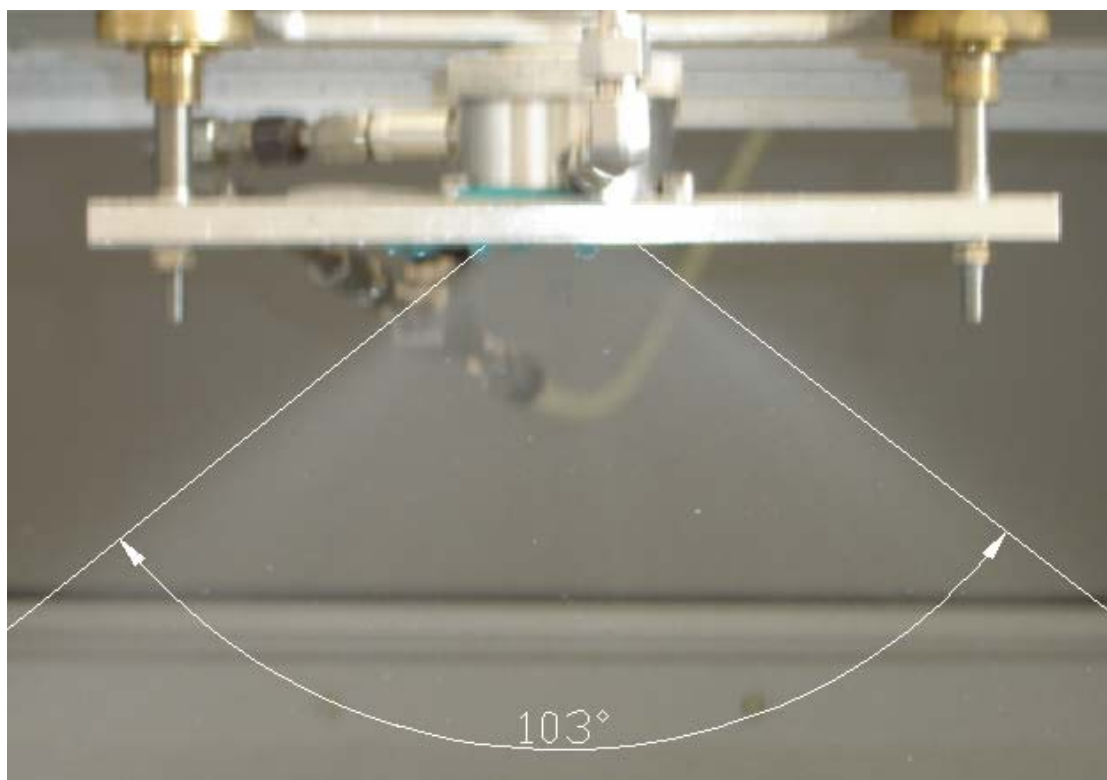


FIGURA 5.10 – Ângulo de cone do injetor com seis canais

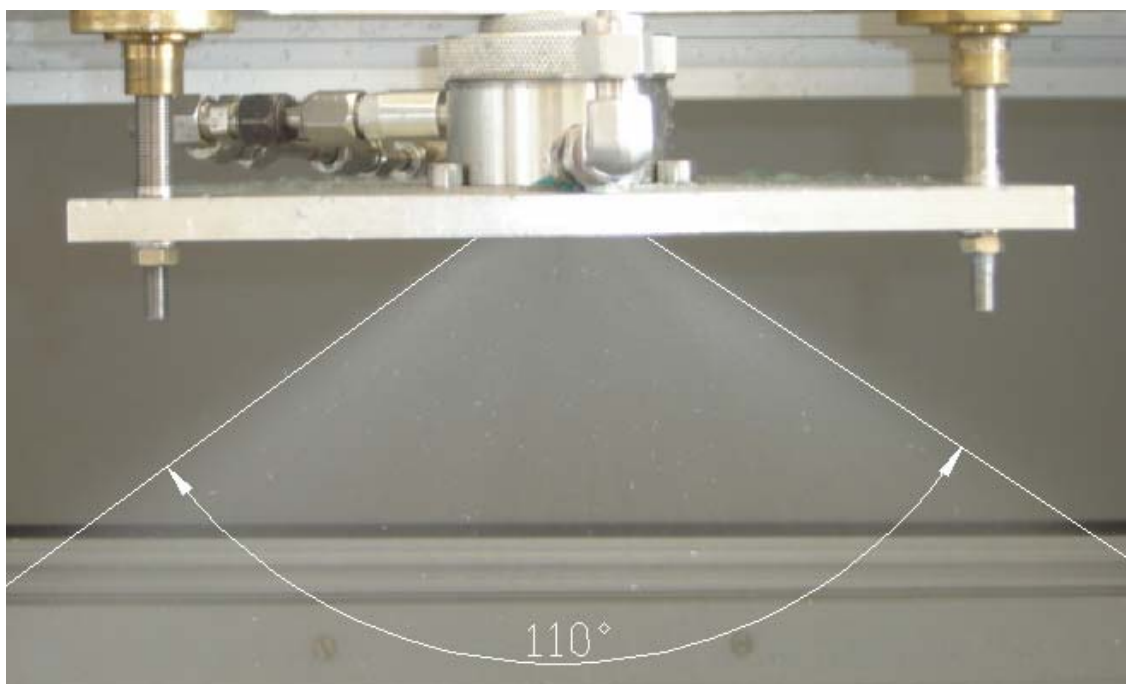


FIGURA 5.11 – Ângulo de cone do injetor com quatro canais

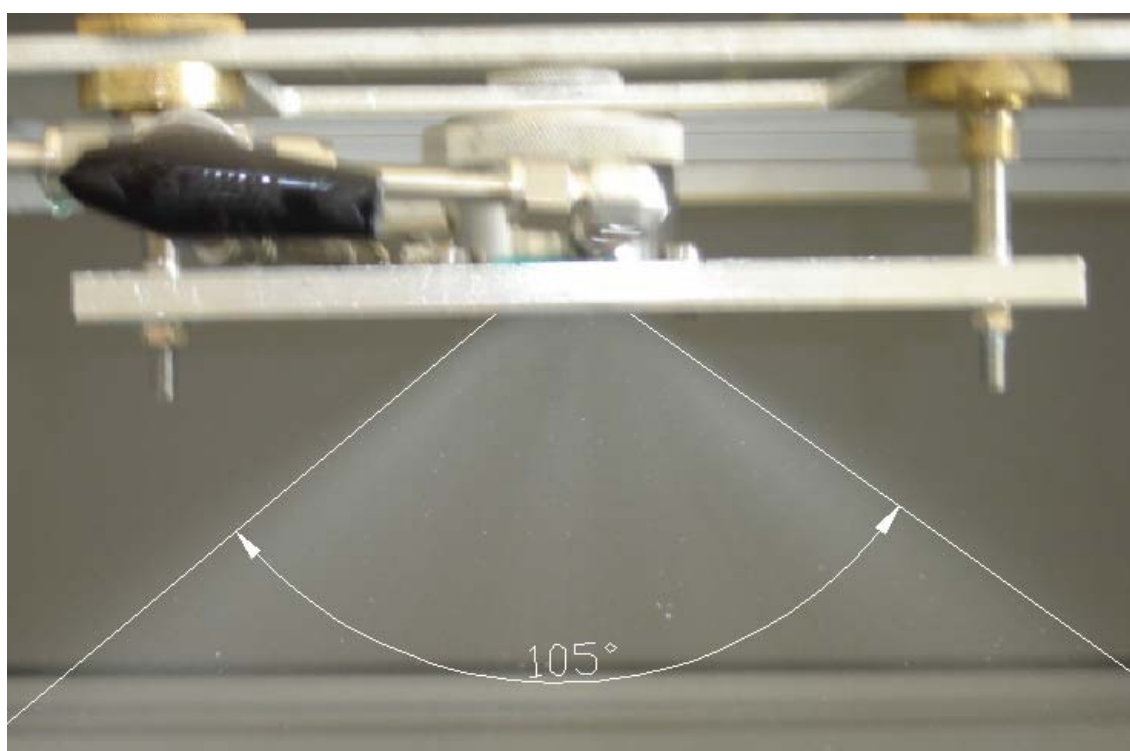


FIGURA 5.12 – Ângulo de cone do injetor com dois canais

A TAB. 5.4 apresenta a comparação entre os valores de ângulo de cone (2α) estimados através de cálculos, considerando água destilada como fluido de trabalho, e os obtidos experimentalmente.

TABELA 5.4 – Comparação entre 2α estimado e obtido experimentalmente

Ângulo de cone (2α)	Intervalo estimado	Resultado experimental
Injetor com seis canais tangenciais	$103^\circ \sim 114^\circ$	103°
Injetor com quatro canais tangenciais	$110^\circ \sim 115^\circ$	110°
Injetor com dois canais tangenciais	$105^\circ \sim 115^\circ$	105°

Pode-se observar que para os três injetores o ângulo de cone do injetor tende para o ângulo de cone de oxidante, isso se deve ao fato do estágio de oxidante possuir vazão mássica quase três vezes maior que o estágio de combustível. Como a quantidade de movimento do oxidante ao sair do injetor é muito maior que a de combustível, surge uma região de baixa pressão próxima ao cone de oxidante que induz o ângulo de cone de combustível a aproximar-se deste.

Observou-se também que o número de canais não alterou significativamente o ângulo de cone de saída dos injetores e como este influi diretamente sobre a região onde ocorre a razão de mistura global de projeto, o K_m praticamente não sofreu alterações como foi observado nas FIGS. 5.7 a 5.9.

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Este capítulo apresenta as conclusões e comentários finais sobre a metodologia de cálculo proposta e os resultados experimentais obtidos, também sugestões para trabalhos futuros são apresentadas neste capítulo.

6.1 Conclusões

Os resultados obtidos experimentalmente e apresentados no capítulo 5 mostram que a variação de número de canais tangenciais em injetores centrífugos bipropelente líquido-líquido influenciam principalmente na distribuição mássica do injetor. Observou-se através dos ensaios que o aumento do número de canais tangenciais melhora a distribuição mássica, porém de maneira não acentuada. Entre os três injetores ensaiados o que possui seis canais tangenciais em cada estágio apresentou distribuição mássica mais uniforme ao longo do raio de abrangência.

Os outros parâmetros de desempenho obtidos experimentalmente (ângulo de cone de saída, razão de mistura e vazão mássica) não sofreram grandes variações com o aumento do número de canais tangenciais. O ângulo de cone de saída dos três injetores dimensionados, projetados, fabricados e ensaiados apresentaram valores próximos (103° , 105° e 110°) e esses valores estão dentro do intervalo estimado teoricamente. A razão de mistura (K_m) dos injetores em estudo apresentou pequenas variações assumido valores próximos ao teórico ($K_m = 2,24$). As vazões mássicas obtidas experimentalmente também apresentaram pequenas variações, mas para os três injetores os valores obtidos estão dentro do intervalo de incerteza do experimento.

Os parâmetros de desempenho analisados experimentalmente apresentaram resultados satisfatórios e validam a metodologia de cálculo proposta, pode-se com melhorias na manufatura dos injetores, principalmente dos canais tangenciais, e desenvolvimento de um banco de testes específico para injetores utilizados em MFPL aplicáveis em veículos lançadores obter resultados experimentais mais precisos.

Entre os três injetores ensaiados o que obteve melhor resultado foi o injetor que possui seis canais tangenciais em cada estágio, os resultados dos parâmetros de desempenho obtidos experimentalmente podem ser utilizados para iniciar o modelamento dinâmico do injetor e posteriormente de todo o cabeçote de injeção, após o modelamento dinâmico podem-se iniciar os testes a quente.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como o desenvolvimento de motor foguete a propulsão líquida no Brasil é recente muitos trabalhos são importantes e necessários, no sistema de injeção um trabalho interessante é estudar e desenvolver um banco para testes a frio de injetores líquido-líquido e gás líquido, bem instrumentado e específico para MPFL utilizados em veículos lançadores.

Outro trabalho importante é estudar experimentalmente a influência de diferentes métodos de perfuração dos canais tangenciais (laser, laser com refrigeração, eletroerosão, com brocas de forma direta e através do auxílio de máscaras, etc) nos principais parâmetros de desempenho do injetor.

Um trabalho interessante e de grande importância é o modelamento dinâmico do injetor e de todo o sistema de injeção e aplicar esse modelamento na sintonia dos injetores

no cabeçote de injeção e posteriormente efetuar os testes a quente com o auxílio de um banco específico para este tipo de teste.

Por fim, deve-se ressaltar a importância do projeto denominado Câmara de Elemento Único (C.E.U.) que está atualmente em desenvolvimento no ITA pelo professor Amílcar e o doutorando Klaus, esse projeto prevê a construção de uma unidade para testes a quente de injetores o que irá permitir estudar o comportamento dos injetores em condição de combustão real.

Referências

Barbosa, F. I. Modelagem dinâmica e simulação computacional de motores foguete a propelente líquido, 1999, Dissertação (mestre em engenharia aeronáutica e mecânica)-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Bazarov, V. *et al*, Design and dynamics of jet and swirl injectors, Moscow: Paul Zarchan, 2004.

Bazarov, V., Hidraulic of Swirl Propellant Injectors, Moscow, 2001.

Berrère, M. *et al*, Rocket Propulsion, Paris: Elsevier, 1960.

Dubnets, S. Design and development of combustion chamber, Moscow Aviation Institute, Moscow, 2006.

Fox, R.W. Introdução à mecânica dos fluidos, 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

Garcia, S.A.G. Avaliação experimental de injetores tipo doal orifice, 2005, Trabalho de graduação (Graduado em engenharia aeronáutica)-Universidade Nacional Experimental de La Fuerza Armada, Caracas.

Gregoryev, S.S. Combustion instability, Moscow Aviation Institute, Moscow, 2007.

Kudriavtcev, B.D. Basis of theory and calculation of LRE, 4 ed. Moscow: Vyschaia Chkola, 1993.

Kessaev, K. Theory and calculation of liquid propellant rocket engine, Moscow Aviation Institute, Moscow, 2006.

Kim, D. *et al*, Effect of Recess on the Spray Characteristics of Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injectors, Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, N.16, November-December 2007.

Kim, H.Y. *et al*, An Experimental Study on the Spray Characteristics of a Dual Orifice Type Swirl Injector at Low Fuel Temperatures, KSME International Journal, Vol. 18, N.7, pp. 1187- 1195, 2004.

Lacava P.T., Bastos-Netto D., Pimenta A.P. Design procedure and experimental evaluation of pressure-swirl atomizers. 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.

Lefebvre, A.H. Atomization and sprays, Indiana, Taylor & Francis, 1989.

Marchione, T. *et al*, Experimental Investigation of a Pressure Swirl Atomizer Spray, Journal Propulsion and Power, Vol. 23, N.5, September-October 2007.

Palmério, A.F. Introdução à tecnologia de foguetes, 2005, Instituto de Aeronáutica e Espaço do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, São José dos Campos.

Pereira, F.C.V. Numerical simulation of a two-stage turbine for turbopumps of liquid propellant rocket engine, 1999, Dissertação (mestre em engenharia aeronáutica e mecânica)-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Santolaya, J.L. *et al*, Experimental Study of Near-Field Flow Structure in Hollow Cone Pressure Swirl Sprays, Journal Propulsion and Power, Vol. 23, N.2, March-April 2007.

Schlichting, H. Boundary-layer theory, 6 ed. São Francisco: McGRAW-HILL, 1968.

Sivakumar, D. and Raghunandan, B. N. Hysteretic interaction of conical liquid sheet from coaxial swirl atomizers, Physics of fluid, Volume 10, Issue 6, pp. 1384-1397, 1998

Souza, J.R.P. Estudo de um injetor centrífugo bipropelente utilizado em motor foguete a propulsão líquida, 2001, Dissertação (mestre em engenharia aeroespacial)-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

White, F. M. Fluid Mechanics, 3rd ed. New York: McGRAW-HILL, 1994.

Widger, I.R. *et al*, Swirl Atomizers Operating at High Water Pressure, International Journal Mech. Science, Vol. 38, Ns. 8-9, pp. 981-999, 1996.

Elliot, R.M. Estudo e desenvolvimento de injetor bipropelente para motor foguete a propelente líquido que trabalha com O₂(g) e Etanol (l), 2007, Dissertação (mestre em engenharia aeroespacial)-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

Apêndice A – Projeto do injetor com 06 canais tangenciais

01

02

03

04

05

05

04

03

02

01

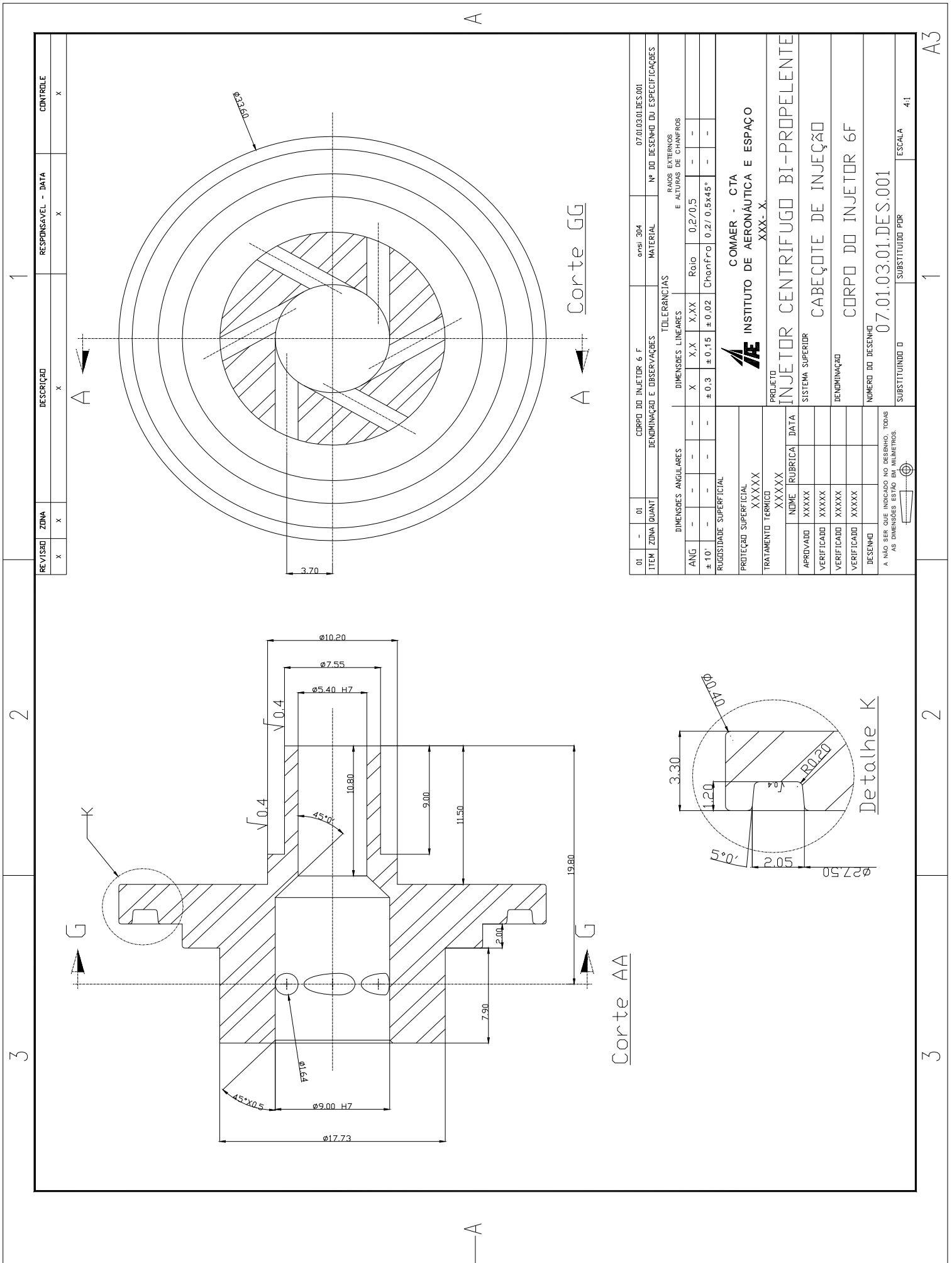
REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X

ITEM	ZONA	DESCRIÇÃO	MATERIAL	Nº DO DESENHO
05	-	DRING Ø1 28.00 W x Ø15	Borracha Nitrilica	Lu nº 1-058
04	-	DRING Ø1 19.05 W x Ø15	Borracha Nitrilica	Lu nº 1-026
03	-	TAMPA 6F	ansi 304	07.01.03.03.DES.001
02	-	BASE 6F	ansi 304	07.01.03.02.DES.001
01	-	CORPO INJETOR 6F	ansi 304	07.01.03.01.DES.001

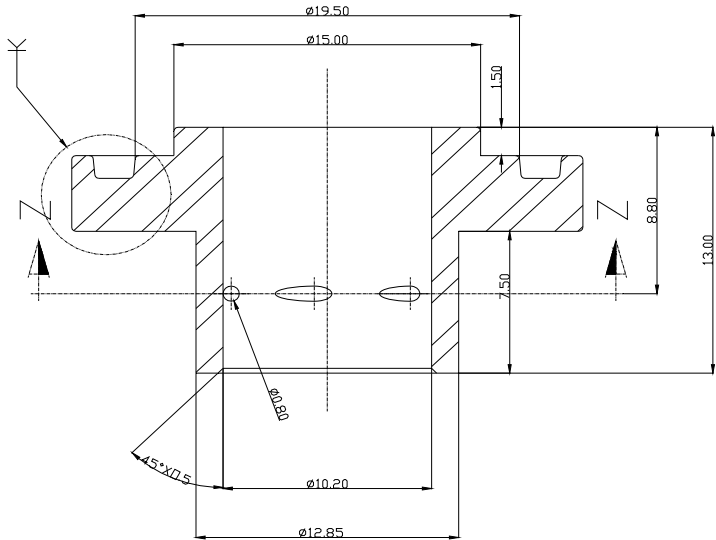
DIMENSÕES LINEARES		DIMENSÕES ANGULARES		TOLERÂNCIAS		RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHANFROS	
ANG	± 10°	X	X,XX	X,XX	X,XX	Raio	0,2/0,5
						Chanfro	0,2/ 0,5x45°

PROTEÇÃO SUPERFICIAL		TRATAMENTO TÉRMICO		RUBRICA		DATA	
XXXXX		XXXXX		XXXXX		XXXXX	
APROVADO							
VERIFICADO							
VERIFICADO							
VERIFICADO							
DESENHO							

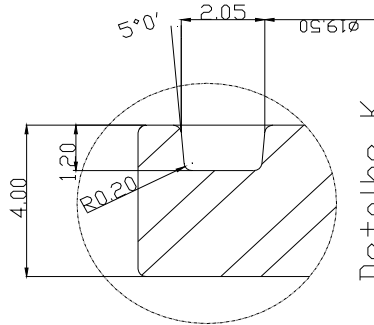
COMAER - CTA		INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO		XXX- X.	
INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE		SISTEMA SUPERIOR		CABEÇOTE DE INJEÇÃO	
MONTAGEM DO INJETOR 6F		NÚMERO DO DESENHO		07.01.03.DES.001	
SUBSTITUÍDO POR		ESCALA		4:1	



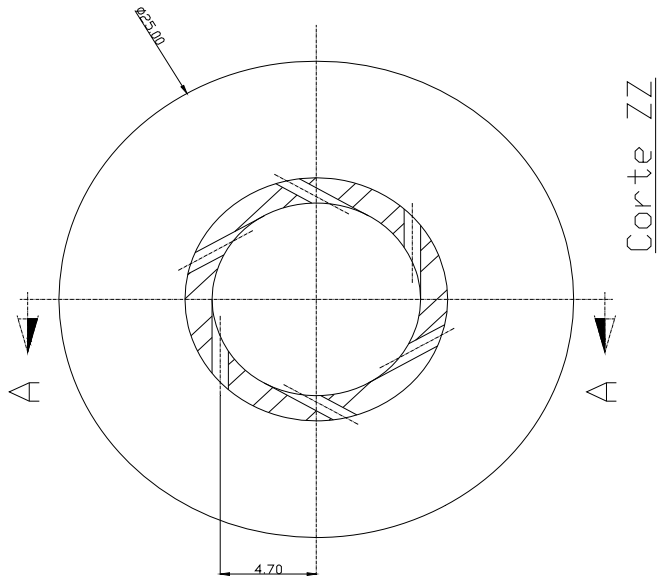
REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL	DATA	CONTROLE
x	x	x	x	x	x



Corte AA



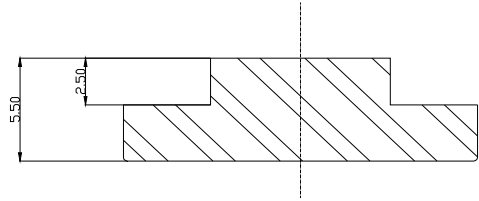
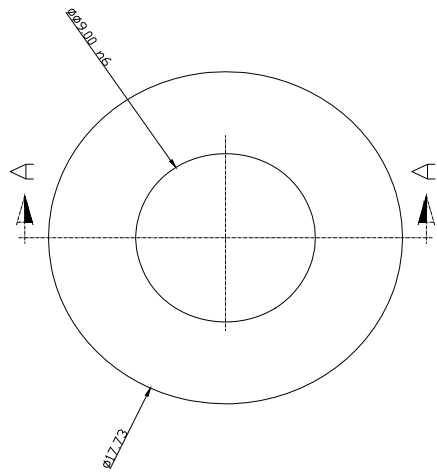
Detalhe K



Corte ZZ

01	-	01	BASE 6F	07.01.03.021.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	Nº DO DESENHO
			MATERIAL	07.01.03.021.DES.001
			RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS	
ANG	-	-	-	-
± 10'	-	-	-	-
			TOLERÂNCIAS	
			DIMENSÕES LINEARES	
			DIMENSÕES ANGULARES	
			PROTEÇÃO SUPERFICIAL	
			TRATAMENTO TÉRMICO	
			NOME	
			RUBRICA	
			DATA	
			APROVADO	
			VERIFICADO	
			VERIFICADO	
			VERIFICADO	
			DESENHO	
			A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.	
			COMAER - CTA	
			INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO	
			XXX- X.	
			PROJETO	
			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE	
			SISTEMA SUPERIOR	
			DENOMINAÇÃO	
			BASE 6F	
			NÚMERO DO DESENHO	
			07.01.03.02.DES.001	
			SUBSTITUINDO	
			ESCALA	
			4:1	

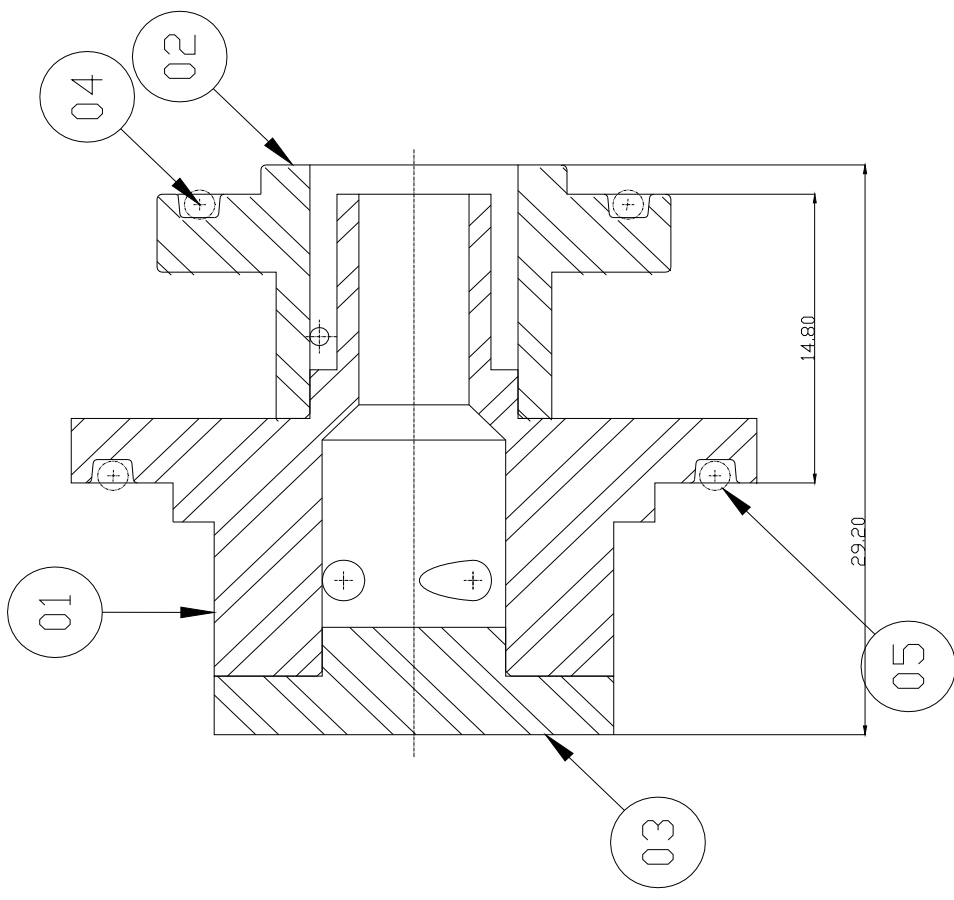
REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X



Corte AA

01	-	01	TAMPA 6F	opel 304	07.01.03.03.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES
TOLERÂNCIAS					
DIMENSÕES LINEARES			DIMENSÕES LINEARES	RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS	
ANG	-	-	X	X,X	Raio 0,2/0,5
± 10'	-	-	± 0,3	± 0,15	Chamfro 0,2/ 0,5x45°
RUGOSIDADE SUPERFICIAL					
PROTEÇÃO SUPERFICIAL					
TRATAMENTO TÉRMICO					
XXXXX					
XXXXX					
APROVADO	XXXXX	NOME	RUBRICA	DATA	
VERIFICADO	XXXXX				
VERIFICADO	XXXXX				
VERIFICADO	XXXXX				
DESENHO					
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.					
07.01.03.03.DES.001					
SUBSTITUINDO O					
SUBSTITUINDO POR					
ESCALA 4:1					

Apêndice B – Projeto do injetor com 04 canais tangenciais

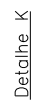


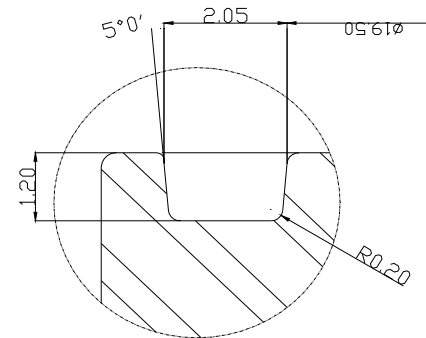
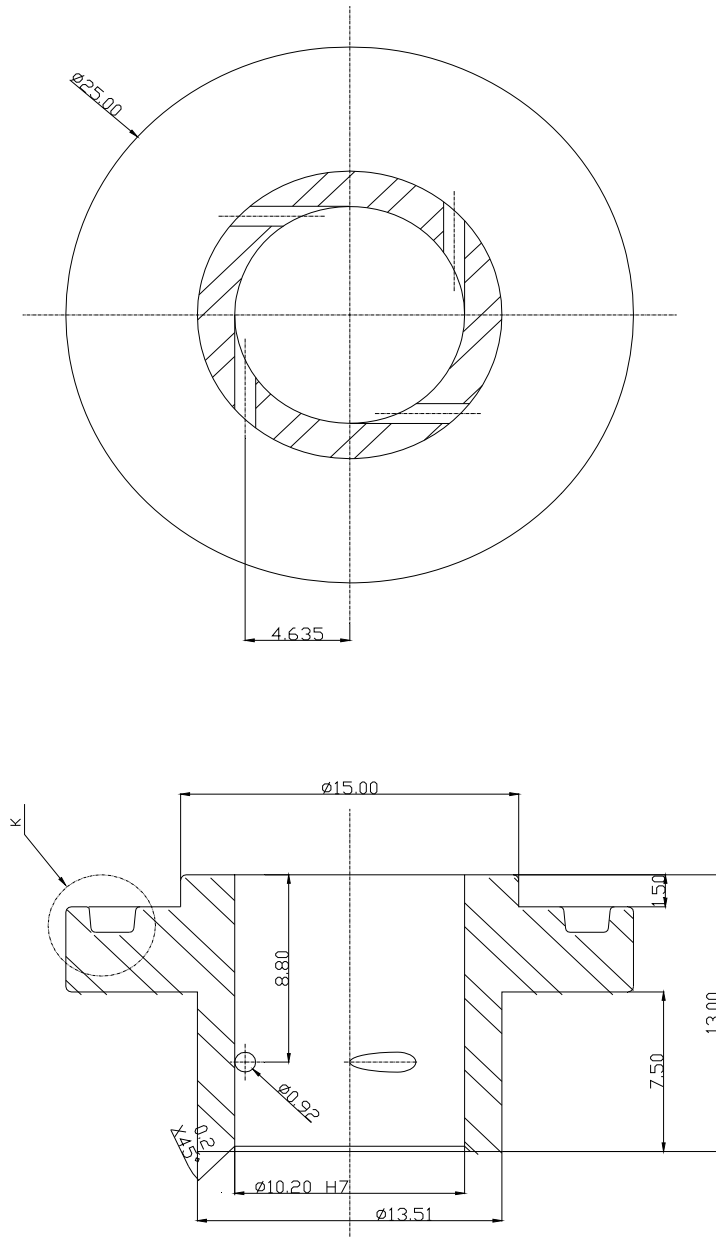
A


A

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL	DATA	CONTROLE
X	X	X	X		X

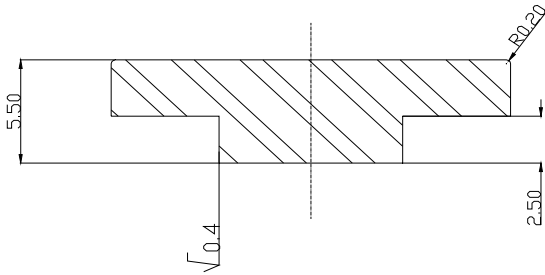
05	-	DRING Ø1 28.00 W x Ø15	Borracha Nitrílica	Lu nº 1-058
04	-	DRING Ø1 19.05 W x Ø15	Borracha Nitrílica	Lu nº 1-026
03	-	TAMPA 4F	onsi 304	07.01.02.03.DES.001
02	-	BASE 4F	onsi 304	07.01.02.02.DES.001
01	-	CORPO INJETOR 4F	onsi 304	07.01.02.01.DES.001
ITEM	ZONA	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES
TOLERÂNCIAS				
DIMENSÕES ANGULARES		DIMENSÕES LINEARES		
ANG	-	-	X	X,X
± 10°	-	-	± 0,3	± 0,15 ± 0,02
RUGOSIDADE SUPERFICIAL		Raio		
PROTEÇÃO SUPERFICIAL		Chanfro		
TRATAMENTO TÉRMICO		0,2/0,5		
XXXXX		0,2/0,5x45°		
XXXXX		- -		
RUBRICA		COMAER - CTA		
DATA		INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO		
APROVADO		XXX- X.		
VERIFICADO		PROJETO		
VERIFICADO		INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE		
VERIFICADO		SISTEMA SUPERIOR		
DESENHO		CABEÇOTE DE INJEÇÃO		
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.		DENOMINAÇÃO		
		MONTAGEM DO INJETOR 4F		
		NÚMERO DO DESENHO		
		07.01.02.DES.001		
		SUBSTITUINDO O		
		SUBSTITUÍDO POR		
		ESCALA		
		4:1		

A3

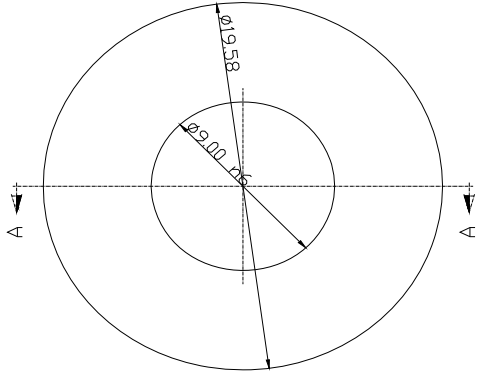


02.	-	01	BASE 4F	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	origm. 304	Nº DO DESENHO DO ESPECÍFICAÇES	07.01.02.02.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	TOLERÂNCIAS				
			DIMENSÕES ANGULARES		DIMENSÕES LINEARES		
ANG	-	-	-	X X X	Raio	0,2/0,5	-
+10°	-	-	-	±0,3 ± 0,15	Chamfros	0,2/0,5x45°	-
RUGOSIDADE SUPERFICIAL							
PROTEÇÃO SUPERFICIAL							
XXXXX							
TRATAMENTO TÉRMICO							
XXXXX							
		NOME	RUBRICA	DATA	PRQ-JETO		
APROVADO		XXXXX			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE		
VERIFICADO		XXXXX			SISTEMA SUPERIOR		
VERIFICADO		XXXXX			CABEÇOTE DE INJEÇÃO		
VERIFICADO		XXXXX			BASE 4F		
DESENHO					NÚMERO DO DESENHO		
A NAO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.					07.01.02.02.DES.001		
SUBSTITUINDO O				SUBSTITUINDO POR		ESCALA	
						4:1	

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL	DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X	X



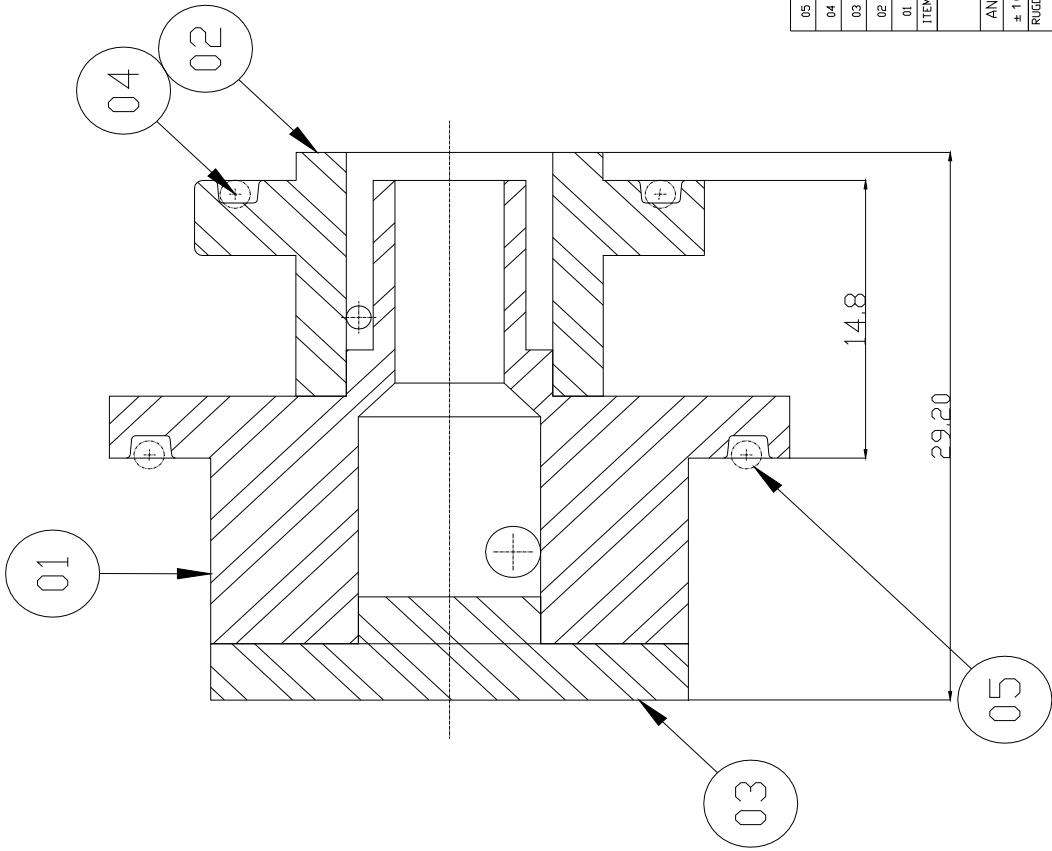
Corte AA



03	-	01	TAMPA 4F		ansi 304	07.01.02.03.DES.001			
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES		MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES			
			TOLERÂNCIAS		RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS				
			DIMENSÕES ANGULARES		DIMENSÕES LINEARES				
ANG	-	-	-	-	X	X,X	Raio 0,2/0,5	-	-
± 10°	-	-	-	-	± 0,3	± 0,15	Chamfro 0,2/ 0,5x45°	-	-
			RUGOSIDADE SUPERFICIAL						
			PROTEÇÃO SUPERFICIAL						
			TRATAMENTO TÉRMICO						
			XXXXX						
			XXXXX		PROJETO				
			XXXXX		INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE				
			NOME		RUBRICA		DATA		
			APROVADO		XXXXX				
			VERIFICADO		XXXXX				
			VERIFICADO		XXXXX				
			VERIFICADO		XXXXX				
			DESENHO						
			NÚMERO DO DESENHO					TAMPA 4F	
			07.01.02.03.DES.001					CABEÇOTE DE INJEÇÃO	
			SUBSTITUÍDO POR					ESCALA	
								3:1	

Apêndice C – Projeto do injetor com 02 canais tangenciais

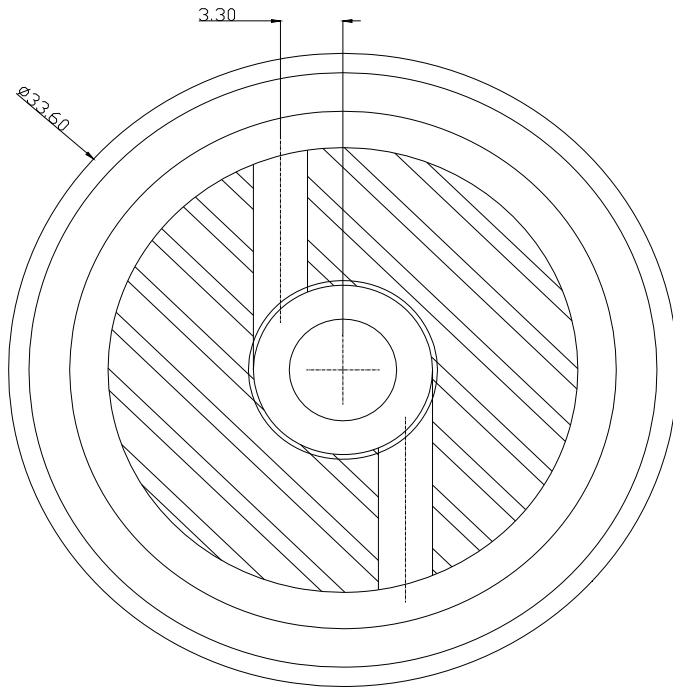
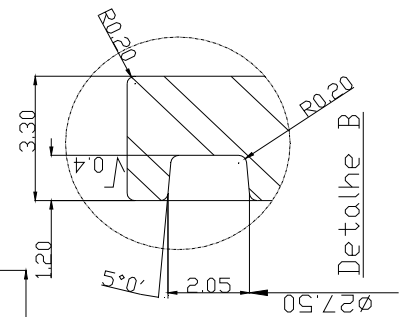
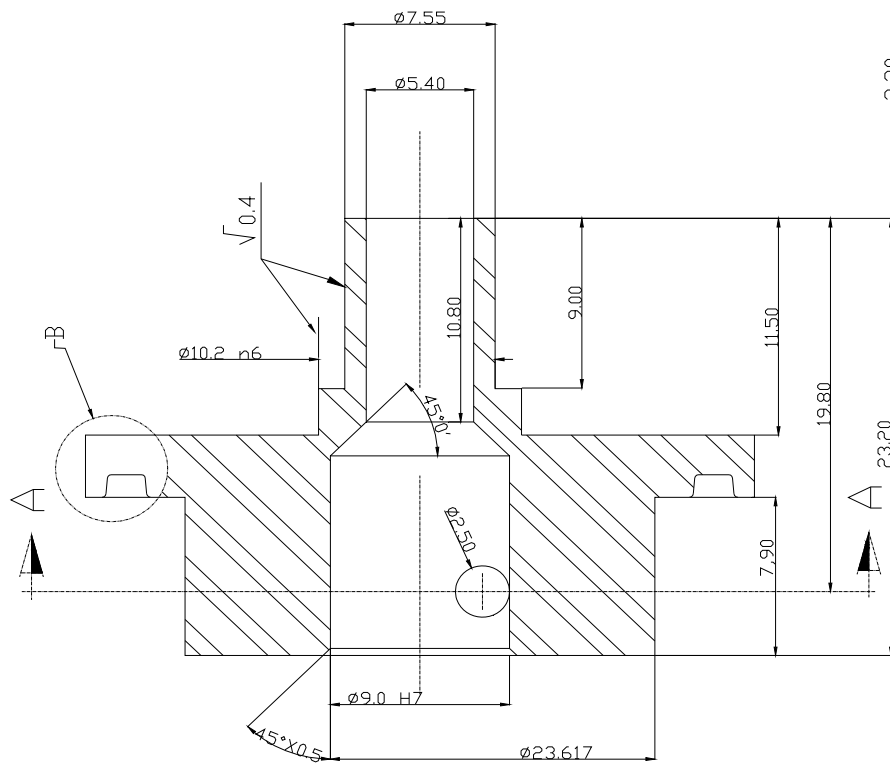
REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL	DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X	X

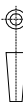


A

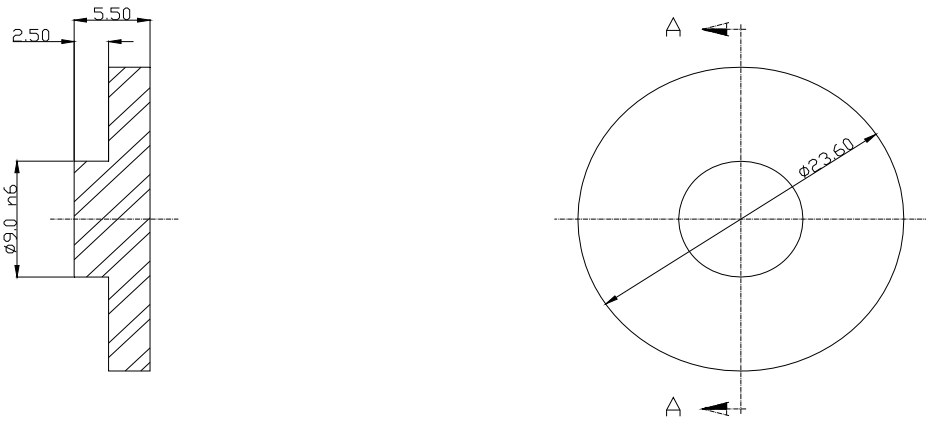
A

05	-	01	DRING Ø1 28.00 V x Ø1.5	Borracha Nitrílica	Lu nº 1-058
04	-	01	DRING Ø1 19.05 V x Ø1.5	Borracha Nitrílica	Lu nº 1-026
03	-	01	TAMPA	ansi 304	07.01.01.03.DES.001
02	-	01	BASE 2F	ansi 304	07.01.01.02.DES.001
01	-	01	CORPO INJETOR 2 F	ansi 304	07.01.01.01.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES
TOLERÂNCIAS					
DIMENSÕES ANGULARES			DIMENSÕES LINEARES		
ANG	-	-	-	X	X
	-	-	-	X	X
	-	-	-	X	XX
	-	-	-	± 0.15	± 0.02
	-	-	-	Chamfrô	0.2/0.5x45°
RUGOSIDADE SUPERFICIAL			RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS		
PROTEÇÃO SUPERFICIAL			COMAER - CTA		
TRATAMENTO TÉRMICO			INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO		
XXXXX			XXX- X.		
PROJETO			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE		
XXXXX			SISTEMA SUPERIOR		
APROVADO			CABEÇOTE DE INJEÇÃO		
VERIFICADO			DENOMINAÇÃO		
VERIFICADO			MONTAGEM DO INJETOR 2F		
DESENHO			NÚMERO DO DESENHO		
XXXXX			07.01.01.DES.001		
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.			SUBSTITUÍDO POR		
			ESCALA		
			4:1		



01	-	01	CORPO DO INJETOR 2 F		ansi 304	07.01.01.01.DES.001				
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES		MATERIAL	Nº DO DESENHO DO ESPECIFICAÇÕES				
			TOLERÂNCIAS							
DIMENSÕES ANGULARES			DIMENSÕES LINEARES		RACOS EXTERIORES E ALTURAS DE CHAMFROS					
ANG	-	-	-	X	X,X	Raio	0,2/0,5	-	-	
± 10°	-	-	-	± 0,3	± 0,15	± 0,02	Chanfro	0,2/ 0,5x45°	-	-
RUGOSIDADE SUPERFICIAL										
PROTEÇÃO SUPERFICIAL										
XXXXXX										
TRATAMENTO TÉRMICO										
XXXXXX										
			NOME	RUBRICA	DATA					
APROVADO			XXXXX							
VERIFICADO			XXXXX							
VERIFICADO			XXXXX							
VERIFICADO			XXXXX							
DESENHO										
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.										
										
					SUBSTITUÍDO POR		ESCALA		21	
					07.01.01.01.DES.001					
					COMAER - CTA					
					INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO					
					XXX- X.					
					PROJETO					
					INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE					
					SISTEMA SUPERIOR					
					CABEÇOTE DE INJEÇÃO					
					CORPO DO INJETOR 2F					
					NÚMERO DO DESENHO					
					07.01.01.01.DES.001					
					SUBSTITUÍDO POR		ESCALA		21	


REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X



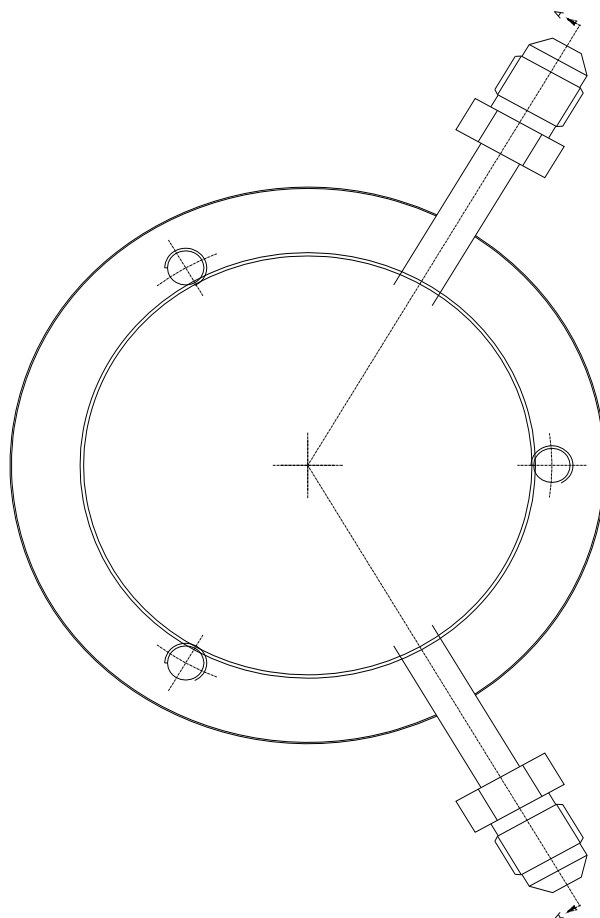
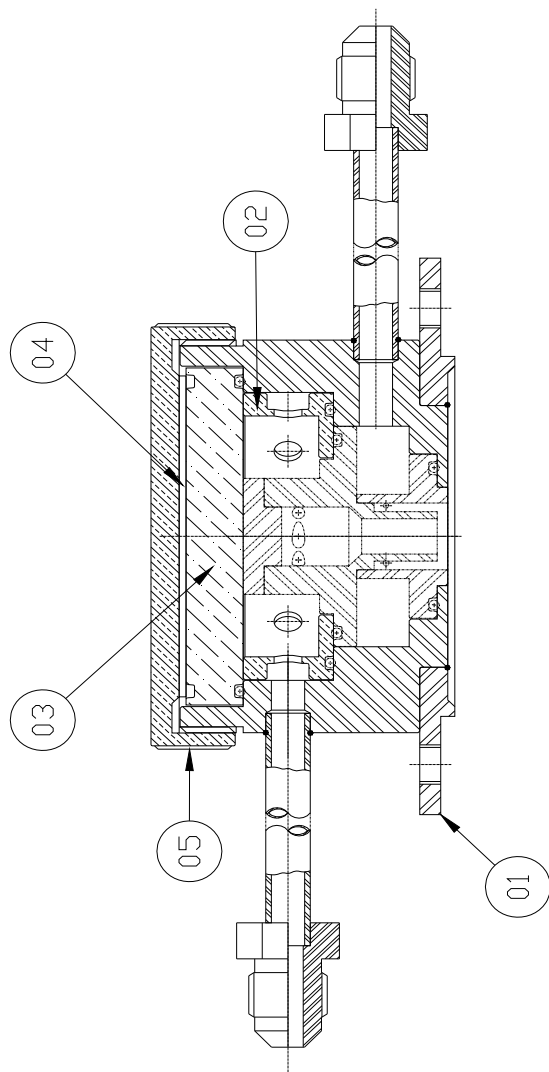
Corte AA

03	-	01	TAMPA 2F	ansi 304	07.01.01.03.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES

TOLERÂNCIAS											
DIMENSÕES ANGULARES					DIMENSÕES LINEARES			RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHANFROS			
ANG	-	-	-	-	X	X,X	X,XX	Raio	0,2/0,5	-	-
± 10'	-	-	-	-	± 0,3	± 0,15	± 0,02	Chanfro	0,2/ 0,5x45°	-	-

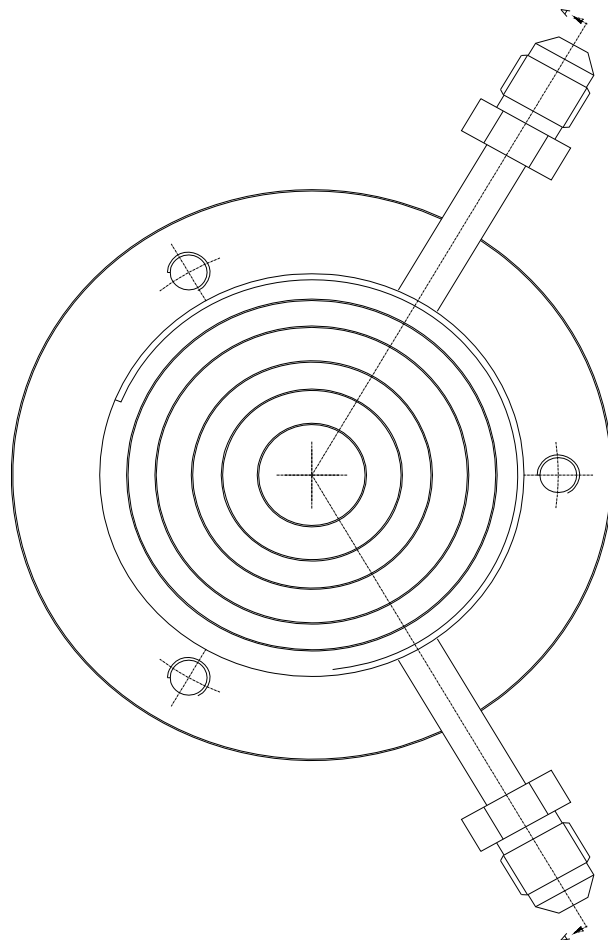
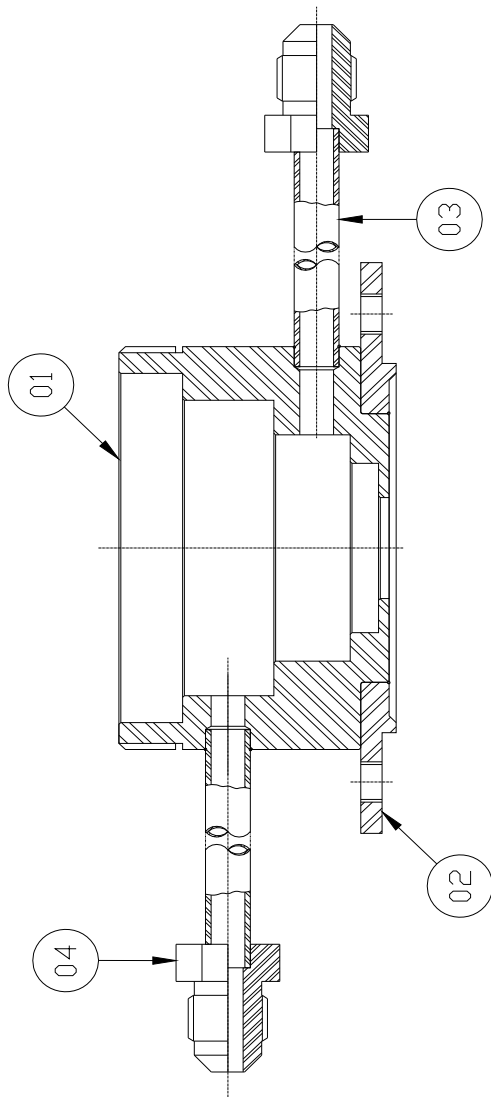
RUGOSIDADE SUPERFICIAL				 COMAER - CTA INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO XXX- X.							
PROTEÇÃO SUPERFICIAL XXXXXX											
TRATAMENTO TÉRMICO XXXXXX				PROJETO							
				INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE							
APROVADO				SISTEMA SUPERIOR							
VERIFICADO				CABEÇOTE DE INJEÇÃO							
VERIFICADO				DENOMINAÇÃO							
VERIFICADO				TAMPA 2F							
DESENHO				NÚMERO DO DESENHO							
				07.01.01.03.DES.001							
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.				SUBSTITUINDO □		SUBSTITUÍDO POR		ESCALA 4:1			

Apêndice D – Projeto do dispositivo de acoplamento



REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X

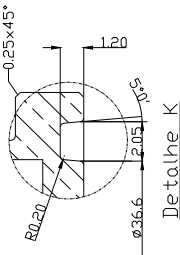
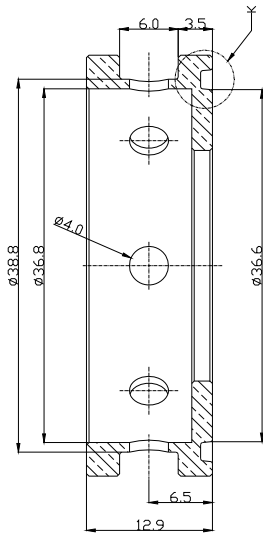
- - 03		Par-Cat. Holden No. 12	ASTM D645	DIN 912
- - 01		ANEL DENG. H 371 x #16	BORRACHA NITRILICA	Cook Lu F-56
- - 01		ANEL DENG. H 371 x #16	BORRACHA NITRILICA	Cook Lu F-56
- - 01		ANEL DENG. H 371 x #16	BORRACHA NITRILICA	Cook Lu F-56
04 - 01		TAMPA	LATÃO	07.02.01.04.DES.001
05 - 01		TAMPA	LATÃO	07.02.01.05.DES.001
06 - 01		TAMBO INTERIOR	ALUMINIO	07.02.01.06.DES.001
07 - 01		TAMBO INTERIOR	ALUMINIO	07.02.01.07.DES.001
08 - 01		TAMBO INTERIOR	LATÃO	07.02.01.08.DES.001
09 - 01		1º CALDEIRO #45 x 12mm	LATÃO	07.02.01.09.DES.001
10 - 01		1º CALDEIRO DO ALICATADO	ASTM 304	07.02.01.10.DES.001
11 - 01		RENDIMENTO DO ALICATADO	MATERIAL	Nº DO DESENHO DO ESPECÍFICAÇÕES
12 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	TOLERÂNCIAS	REGRAS DE DESENHO E ALICATADOS
13 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS LINEARES	RENDIMENTOS LINEARES
14 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
15 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
16 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
17 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
18 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
19 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
20 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
21 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
22 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
23 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
24 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
25 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
26 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
27 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
28 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
29 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
30 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
31 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
32 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
33 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
34 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
35 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
36 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
37 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
38 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
39 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
40 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
41 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
42 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
43 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
44 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
45 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
46 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
47 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
48 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
49 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
50 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
51 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
52 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
53 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
54 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
55 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
56 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
57 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
58 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
59 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
60 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
61 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
62 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
63 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
64 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
65 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
66 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
67 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
68 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
69 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
70 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
71 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
72 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
73 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
74 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
75 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
76 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
77 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
78 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
79 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
80 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
81 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
82 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
83 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
84 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
85 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
86 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
87 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
88 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
89 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
90 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
91 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
92 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
93 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
94 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
95 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
96 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
97 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
98 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
99 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES
100 - 01		RENDIMENTO E DIMENSÕES	RENDIMENTOS ANGULARES	RENDIMENTOS ANGULARES



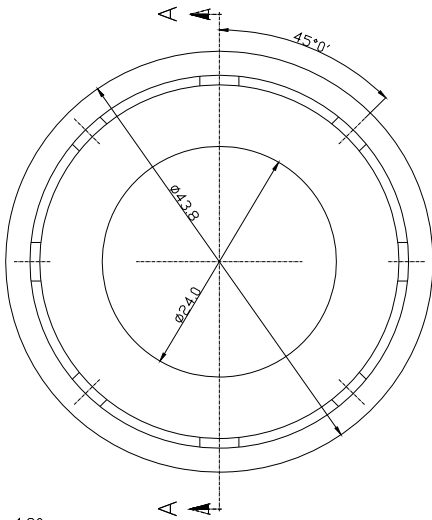
REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X		X	X


04	-	02	CORRETOR SWÉDLICK 7/16"	ANSI 304	07.02.01.01.01.DES.001
05	-	02	TUBO 1/4" x 80mm	ANSI 304	07.02.01.01.01.DES.001
06	-	01	ALCANTARAL 600 X 150MM	ANSI 304	07.02.01.01.01.DES.001
07	-	01	ALCANTARAL 600 X 75MM	ANSI 304	07.02.01.01.01.DES.001
ITEM	ZONA	QNT	MATERIAL	Nº DO DESMOLDO DE ESPECIFICAÇÕES	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>ÂNGULOS ANG</p> <p>+10° - - - - -</p> <p>PROJEÇÃO SUPERFICIAL</p> <p>PROTEÇÃO SUPERFICIAL XXXXXX</p> <p>TATAMENTO LERIDIO</p> </div> <div> <p>ÂNGULOS LINEARES</p> <p>ANG - - - - -</p> <p>+10° - - - - -</p> <p>PROJEÇÃO SUPERFICIAL</p> <p>PROTEÇÃO SUPERFICIAL XXXXXX</p> <p>TATAMENTO LERIDIO</p> </div> <div> <p>TOLERÂNCIAS</p> <p>BIMENSURAS LINEARES</p> <p>ANG - - - - -</p> <p>+10° - - - - -</p> <p>PROJEÇÃO SUPERFICIAL</p> <p>PROTEÇÃO SUPERFICIAL XXXXXX</p> <p>TATAMENTO LERIDIO</p> </div> <div> <p>RAIO EXTERIORS</p> <p>E ALARGA DE CANTOIRS</p> <p>ANG - - - - -</p> <p>+10° - - - - -</p> <p>PROJEÇÃO SUPERFICIAL</p> <p>PROTEÇÃO SUPERFICIAL XXXXXX</p> <p>TATAMENTO LERIDIO</p> </div> </div>					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE</p> <p>SUPORTE PARA ENSAIO</p> <p>MONTAGEM DO ALOJAMENTO</p> <p>NOME DO DESMOLDO</p> <p>07.02.01.01.DES.001</p> <p>ESCALA 2:1</p> </div> <div> <p>COMAR - CTA</p> <p>INSTITUTO DE AERONAUTICA E ESPAO</p> <p>XXX.X</p> </div> </div>					

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL	DATA	CONTROLE
x	x	x	x	x	x

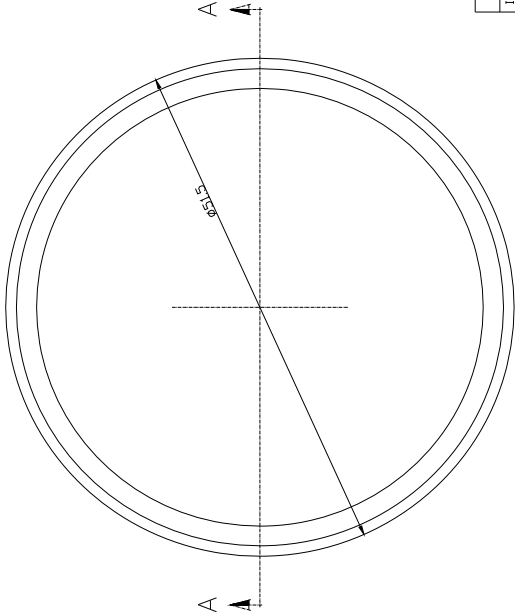
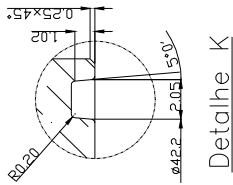
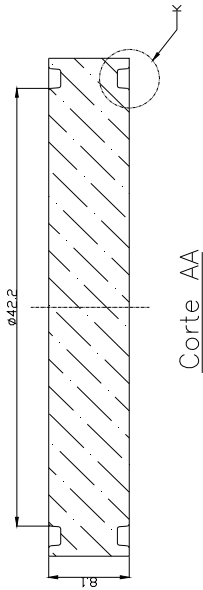


Corte AA



02	-	01	1° CALSO Ø45 x 13mm		LATÃO	07.02.01.02.DES.001	
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES		MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES	
			TOLERÂNCIAS		RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS		
			DIMENSÕES ANGULARES	DIMENSÕES LINEARES	Raio	0,2/0,5	-
ANG	-	-	-	X	X,X	0,2/0,5	-
± 10°	-	-	-	± 0,3	± 0,15 ± 0,02	Chanfro	0,2 / 0,5x45°
RUGOSIDADE SUPERFICIAL							
PROTEÇÃO SUPERFICIAL							
XXXXX							
TRATAMENTO TÉRMICO							
XXXXX			COMAER - CTA				
			INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO				
			XXX- X				
PROJETO			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE				
NOME			SISTEMA SUPERIOR				
RUBRICA			SUPORTE PARA ENSAIO				
DATA			1° CALSO				
APROVADO	XXXXX						
VERIFICADO	XXXXX						
VERIFICADO	XXXXX						
VERIFICADO	XXXXX						
DESENHO							
NÚMERO DO DESENHO			07.02.01.02.DES.001				
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.							
			SUBSTITUINDO 0		SUBSTITUÍDO POR		ESCALA
							2:1


REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X



A

A

03	-	01	TAMPO INTERIOR	ø52.0 x 8.5mm	ALUMINIO	07.02.01.03.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES		MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES
TOLERÂNCIAS						
DIMENSÕES ANGULARES			DIMENSÕES LINEARES			PAROS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS
ANG	-	-	-	X X.X X.XX	Raio	0,2/0,5 - -
± 10'	-	-	-	± 0,3 ± 0,15 ± 0,02	Chamfrol	0,2/0,5x45° - -
RUGOSIDADE SUPERFICIAL						
PROTEÇÃO SUPERFICIAL						
XXXXX						
TRATAMENTO TERMICO						
XXXXX			PROJETO			
			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE			
			SISTEMA SUPERIOR			
			SUPORTE PARA ENSAIO			
			DENOMINAÇÃO			
			TAMPO INTERIOR			
			NUMERO DO DESENHO			
			07.02.01.03.DES.001			
			SUBSTITUINDO O			
			SUBSTITUINDO POR			
			ESCALA			
			2:1			



A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X

10

Ø49.0

04	-	01	CALSO Ø49.0 x 1mm	TEFLON	07.02.01.04.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES

DIMENSÕES ANGULARES				DIMENSÕES LINEARES			RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHANFROS			
ANG	-	-	-	X	X,X	X,XX	Raio	0,2/0,5	-	-
± 10'	-	-	-	± 0,3	± 0,15	± 0,02	Chanfro	0,2/ 0,5x45°	-	-

RUGOSIDADE SUPERFICIAL

PROTEÇÃO SUPERFICIAL
XXXXX

TRATAMENTO TÉRMICO
XXXXX

APROVADO XXXXX

VERIFICADO XXXXX

VERIFICADO XXXXX

VERIFICADO XXXXX

DESENHO

COMAER - CTA
INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO
XXX- X.

PROJETO
INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE

SISTEMA SUPERIOR
SUPORTE PARA ENSAIO

DENOMINAÇÃO
CALSO

NÚMERO DO DESENHO
07.02.01.04.DES.001

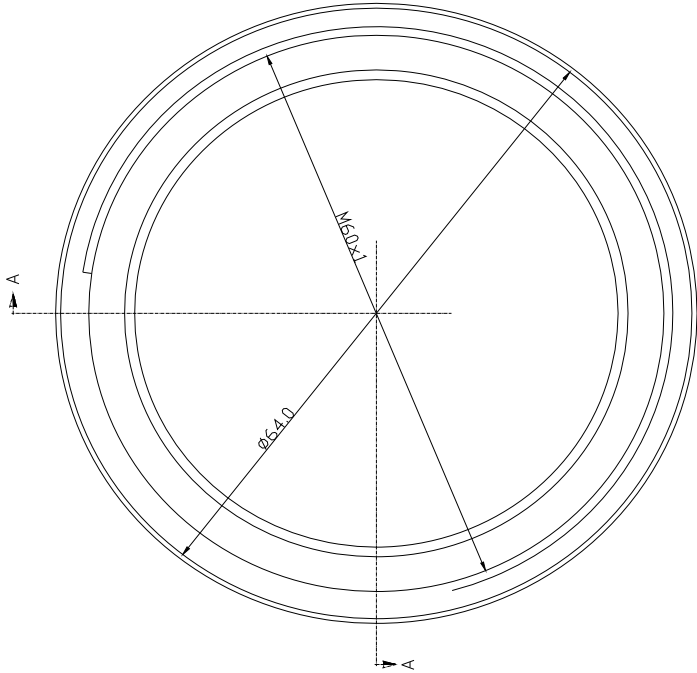
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.

SUBSTITUINDO Ø

SUBSTITUÍDO POR

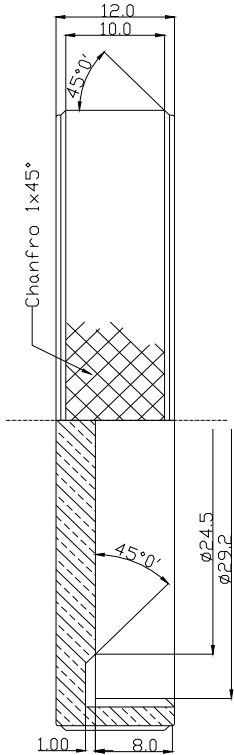
ESCALA
2:1

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X



A

A



1/2 Corte AA

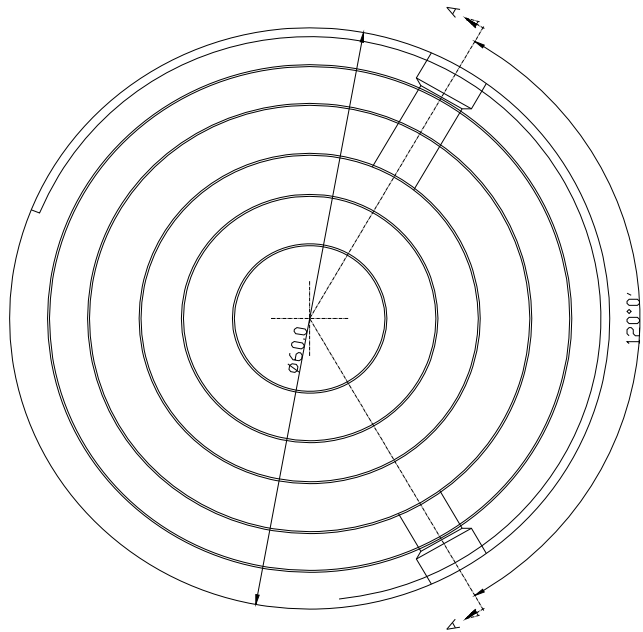
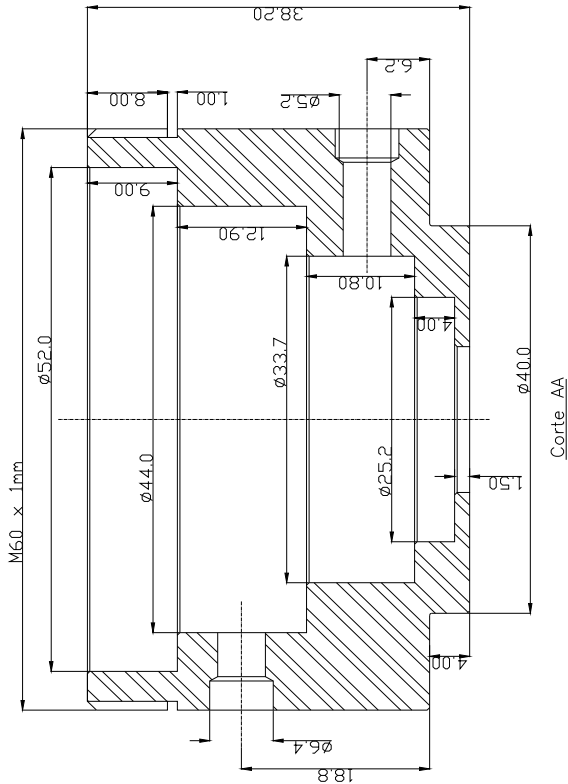
IT	OL	OL	TAMPA Ø65.0 X 13.0mm	DESCRIÇÃO	LATÃO	Nº DO DESENHO	ESPECIFICAÇÕES
ANG	-	-	-	-	X	X,X	RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHÂNFRÓS
± 10°	-	-	-	-	± 0.3	± 0.15	0.2/0.5
RUGOSIDADE SUPERFICIAL	-	-	-	-	Charfro	0.2/ 0.5x45°	-
PROTEÇÃO SUPERFICIAL	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
TRATAMENTO TÉRMICO	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
APROVADO	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
VERIFICADO	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
VERIFICADO	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
DESENHO	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.							
INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO							
COMAER - CTA							
XXX- X.							
PROJETO							
INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE							
SISTEMA SUPERIOR							
DENOMINAÇÃO							
TAMPA							
NÚMERO DO DESENHO							
07.02.01.05.DES.001							
SUBSTITUÍDO POR							
ESCALA 2:1							

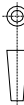
3

2

1

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
x	x	x	x	x



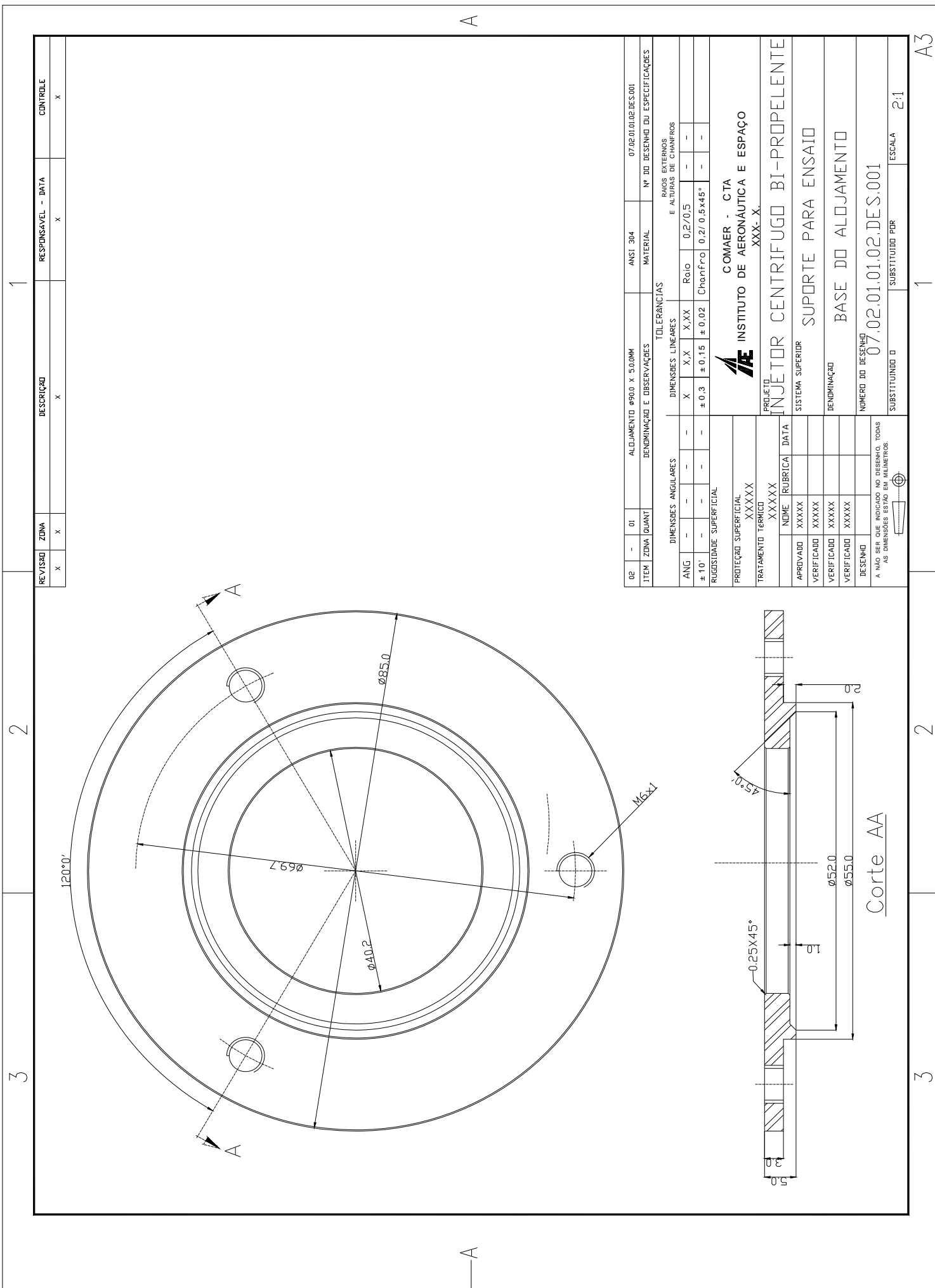
01	-	01	ALAJAMENTO Ø60.0 X 39.0MM	ANSI 304	07.02.01.01.01.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES
TOLERÂNCIAS					
DIMENSÕES ANGULARES			DIMENSÕES LINEARES		
ANG	-	-	-	X X X	Raio
± 10°	-	-	-	± 0.3	Chanfro
RUGOSIDADE SUPERFICIAL			RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS		
PROTEÇÃO SUPERFICIAL			COMAER - CTA		
XXXXX			INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO		
TRATAMENTO TÉRMICO			XXX- X		
XXXXX			PROJETO		
NOME			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE		
APROVADO	XXXXXX	DATA	SISTEMA SUPERIOR		
VERIFICADO	XXXXXX		SUPORTE PARA ENSAIO		
VERIFICADO	XXXXXX		ALAJAMENTO		
VERIFICADO	XXXXXX		NOMERO DO DESENHO		
DESENHO			07.02.01.01.01.DES.001		
A NÃO SER QUE INDICADO NOS DESENHOS, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.			SUBSTITUINDO POR		
			ESCALA		
			2:1		

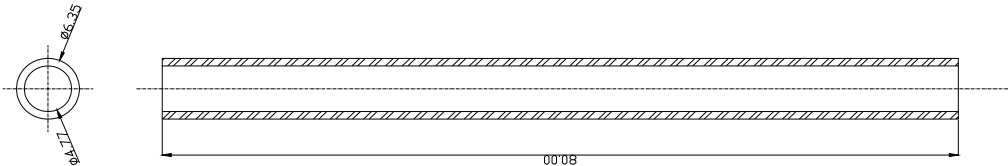
3

2

1

A3





REVISÃO		ZONA	DESCRIÇÃO		RESPONSÁVEL - DATA		CONTROLE	
x		x	x		x		x	

03	-	02	TUBO ø1/4" x 80mm		ANSI 304	07.02.01.01.03.DES.001								
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES		MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES								
			DIMENSÕES ANGULARES		TOLERÂNCIAS									
					DIMENSÕES LINEARES									
ANG	-	-	-	-	X	X,X	X,XX	Raio	0,2/0,5	-	-			
± 10°	-	-	-	-	± 0,3	± 0,15	± 0,02	Chamfero	0,2/ 0,5x45°	-	-			
			RUGOSIDADE SUPERFICIAL		RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHAMFROS									
			PROTEÇÃO SUPERFICIAL		COMAER - CTA									
			TRATAMENTO TÉRMICO		INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO									
					XXX- X.									
			APROVADO		PROJETO									
			VERIFICADO		INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE									
			VERIFICADO		SISTEMA SUPERIOR									
			VERIFICADO		SUPORTE PARA ENSAIO									
			DESENHO		DENOMINAÇÃO									
					TUBO									
					NÚMERO DO DESENHO									
					07.02.01.01.03.DES.001									
					SUBSTITUINDO O									
					SUBSTITUÍDO POR									
					ESCALA									
					2:1									

REVISÃO	ZONA	DESCRIÇÃO	RESPONSÁVEL - DATA	CONTROLE
X	X	X	X	X

04	-	02	CONECTOR SWEDLOCK 7/16"	ANSI 304	07.02.01.01.04.DES.001
ITEM	ZONA	QUANT	DENOMINAÇÃO E OBSERVAÇÕES	MATERIAL	Nº DO DESENHO OU ESPECIFICAÇÕES

DIMENSÕES ANGULARES					DIMENSÕES LINEARES			RAIOS EXTERNOS E ALTURAS DE CHANFROS			
ANG	-	-	-	-	X	X,X	X,XX	Raio	0,2/0,5	-	-
± 10'	-	-	-	-	± 0,3	± 0,15	± 0,02	Chanfro	0,2/ 0,5x45°	-	-

RUGOSIDADE SUPERFICIAL

PROTEÇÃO SUPERFICIAL
XXXXXX

TRATAMENTO TÉRMICO
XXXXXX

COMAER - CTA
INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO
XXX- X.

	NOME	RUBRICA	DATA	PROJETO
APROVADO	XXXXX			INJETOR CENTRIFUGO BI-PROPELENTE
VERIFICADO	XXXXX			SISTEMA SUPERIOR
VERIFICADO	XXXXX			SUPORTE PARA ENSAIO
VERIFICADO	XXXXX			DENOMINAÇÃO
DESENHO				CONECTOR SWEDLOCK
A NÃO SER QUE INDICADO NO DESENHO, TODAS AS DIMENSÕES ESTÃO EM MILÍMETROS.				NUMERO DO DESENHO
				07.02.01.01.04.DES.001
SUBSTITUINDO 0		SUBSTITUÍDO POR		ESCALA
				2:1

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DP	2. DATA 12 de agosto de 2008	3. REGISTRO N° CTA/ITA/DP-035/2008	4. N° DE PÁGINAS 154
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Injeção Centrífugo Bipropelente Utilizado em Motor Foguete a Propelente Líquido.			
6. AUTOR(ES): Alexandre Alves			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Injetor Bipropelente Líquido-Líquido. 2. Sistema de Injeção para Motor Foguete. 3. Motor Foguete a Propelente Líquido.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Injetores; Propelentes de base dupla; Motores foguetes a propelente líquido; Injeção de combustível; Câmaras de combustão; Sistemas de propulsão; Centrifugação; Engenharia mecânica; Engenharia aeroespacial			
10. APRESENTAÇÃO: <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> X Nacional Internacional </div> ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeroespacial. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava. Defesa em 04/08/2008. Publicada em 2008.			
11. RESUMO: <p>O sistema de injeção de um motor foguete a propelente líquido (MFPL) é considerado uma das partes mais importantes para o perfeito funcionamento do motor. Seus parâmetros fluidos mecânicos influenciam diretamente no comportamento térmico da câmara, por consequência na eficiência de combustão, refrigeração do motor e também na estabilidade dinâmica de todo o motor. Esta dissertação propõe uma metodologia de cálculo para dimensionamento de injetores centrífugos líquido-líquido para motor foguete a propelente líquido, validada através da obtenção da geometria de um injetor já conhecido, o injetor do motor russo RD-109. Este trabalho também estuda aspectos experimentais de influência dos canais tangenciais de admissão de fluido no ângulo de cone, distribuição da vazão mássica e razão de mistura, que são os principais parâmetros de desempenho do injetor. O conhecimento prévio desses parâmetros é útil antes da montagem dos injetores no cabeçote, pois conhecendo seu comportamento é possível distribuí-los de maneira a melhorar a resposta dinâmica do sistema e a eficiência de combustão, otimizando os custos de ajustes do motor na fase de testes a quente.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO </div>			