

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Fenômeno de carreamento na propulsão híbrida:
Estudo da variação do diâmetro das gotículas**

Pedro Henrique Fauza Sadocco

São Paulo

2011

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Fenômeno de carreamento na propulsão híbrida:
Estudo da variação do diâmetro das gotículas**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Pedro Henrique Fauza Sadocco

Orientador: Marcos de Mattos Pimenta

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Sadocco, Pedro Henrique Fauza

Fenômeno de carreamento na propulsão híbrida: estudo da variação do diâmetro das gotículas / P.H.F. Sadocco. – São Paulo, 2011.

55 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Propulsão 2.Foguetes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

A pouca utilização da propulsão híbrida no setor aeroespacial, mesmo considerando as grandes vantagens que este tipo de propulsão apresenta, se deve à baixa velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido obtida em motores deste tipo. Um dos métodos descobertos para aumentar esta velocidade de regressão é a utilização de combustíveis sólidos que dão origem ao fenômeno de *entrainment*, também conhecido como desprendimento de gotículas. O diâmetro dessas gotículas tem uma grande influência no aumento da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido causado por esse fenômeno, o que justifica o objetivo deste projeto de analisar os efeitos da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, e do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante no diâmetro das gotículas formadas. Os dados necessários para essa análise foram obtidos através de simulações do fenômeno de *entrainment* feitas com um código desenvolvido neste projeto para o programa *Gerris Flow Solver*. Como resultado desta análise, observou-se que o diâmetro das gotículas: tende a diminuir com o aumento da viscosidade do combustível e da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, tende a aumentar com o aumento da espessura da camada líquida de combustível, e varia para diferentes perfis de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

ABSTRACT

The low use of hybrid propulsion in the aerospace industry, even considering the great advantages this type of propulsion presents, is due to the low surface regression rate of the solid fuel found in this kind of thrusters. One of the methods discovered to increase this regression rate is the use of solid fuels that give rise to droplet entrainment. The diameter of the droplets has a great influence on the increase of the surface regression rate of the solid fuel caused by the droplet entrainment, therefore justifying the objective of this project, which is the analysis of the effects of the fuel viscosity, thickness of the liquid layer of the fuel, velocity of the oxidizer gas flow, and velocity profile of the oxidizer gas flow on the diameter of the droplets. The necessary data for the analysis was obtained from simulations of the droplet entrainment made with a code developed in this project for the software *Gerris Flow Solver*. As a result of this analysis, it was observed that the diameter of the droplets: tends to decrease with the increase of the viscosity of the fuel and velocity of the oxidizer gas flow, tends to increase with the increase of the thickness of the liquid layer of the fuel, and varies for different velocity profiles of the oxidizer gas flow.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1) INTRODUÇÃO.....	1
1.1) Contexto do projeto.....	1
1.1.1) Propulsão híbrida.....	1
1.1.2) Fenômeno de <i>entrainment</i>	4
1.2) Objetivos do projeto.....	6
2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1) Revisão do artigo técnico Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3].....	8
2.2) Revisão do artigo técnico Karabeyoglu; Cantwell [4].....	11
3) METODOLOGIA.....	16
3.1) Simulação do fenômeno de <i>entrainment</i> com o programa <i>Gerris Flow Solver</i>	16
3.1.1) Descrição do programa <i>Gerris Flow Solver</i>	17
3.1.2) Modelagem da geometria.....	18
3.1.3) Definição das condições iniciais.....	20
3.1.4) Definição das condições de contorno.....	21
3.1.5) Definição das propriedades físicas.....	22
3.1.6) Definição dos parâmetros de controle.....	23
3.1.7) Exibição da resposta.....	24
3.2) Medição dos diâmetros das gotículas com o programa <i>ImageJ</i>	25
4) RESULTADOS.....	27
4.1) Descrição dos casos.....	27
4.2) Descrição da análise estatística.....	28
4.3) Efeito da viscosidade do combustível.....	29
4.4) Efeito da espessura da camada líquida de combustível.....	31
4.5) Efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante.....	34
4.6) Efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.....	37
5) CONCLUSÕES.....	40

LISTA DE REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE A.....	44
APÊNDICE B.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1.1: Configuração clássica de um motor a propulsão híbrida.....	1
Figura 1.1.1.2: Ilustração da combustão na propulsão híbrida tradicional (retirado de De Luca [1]).....	3
Figura 1.1.2.1: Ilustração do fenômeno de <i>entrainment</i> (retirado de Franchi [2]).....	5
Figura 2.1.1: Velocidades de regressão da superfície do bloco de combustível sólido obtidas para vários combustíveis sólidos (retirado de Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3]).....	9
Figura 2.1.2: Modelo térmico utilizado para o desenvolvimento da expressão da espessura da camada líquida (retirado de Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3]).....	10
Figura 2.1.3: Condições críticas para a ocorrência do fenômeno de <i>entrainment</i> para cada combustível sólido (retirado de Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3]).....	10
Figura 2.2.1: Modelo de estabilidade estudado (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4]).....	13
Figura 2.2.2: Efeito do número de Reynolds do fluxo gasoso na taxa de amplificação das instabilizações (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4]).....	14
Figura 2.2.3: Efeito da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido na taxa de amplificação das instabilizações (b é o parâmetro de velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido) (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4]).....	15
Figura 2.2.4: Efeito do combustível sólido na taxa de amplificação das instabilizações (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4]).....	15
Figura 3.1.1: Descrição da sequência lógica utilizada no desenvolvimento do código para simular o fenômeno de <i>entrainment</i> com o programa <i>Gerris Flow Solver</i>	17
Figura 3.1.1.1: Logotipo do programa <i>Gerris Flow Solver</i> (retirado de Popinet [5]).....	18
Figura 3.1.2.1: Geometria criada para representar bidimensionalmente a câmara de combustão de um motor híbrido (obtido com <i>Gerris Flow Solver</i> [6]).....	20

Figura 3.1.7.1: Ilustração do fenômeno de <i>entrainment</i> obtido com a simulação do código desenvolvido para o programa <i>Gerris Flow Solver</i> (obtido com <i>Gerris Flow Solver</i> [6]).....	24
Figura 3.1.7.2: Aumento da área destacada da figura 3.1.7.1 (obtido com <i>Gerris Flow Solver</i> [6]).....	25
Figura 3.2.1: Ilustração da medição do diâmetro de uma gotícula com o programa <i>ImageJ</i> (obtido com <i>ImageJ</i> [8]).....	26
Figura 4.3.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da viscosidade do combustível.....	30
Figura 4.4.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da espessura da camada líquida de combustível.....	33
Figura 4.5.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante.....	35
Figura 4.6.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.....	39
Figura B.1: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso padrão.....	48
Figura B.2: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V1.....	49
Figura B.3: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V2.....	49
Figura B.4: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V3.....	50
Figura B.5: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V4.....	50
Figura B.6: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H1.....	51
Figura B.7: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H2.....	51
Figura B.8: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H3.....	52
Figura B.9: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H4.....	52
Figura B.10: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U1.....	53
Figura B.11: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U2.....	53
Figura B.12: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U3.....	54
Figura B.13: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U4.....	54

Figura B.14: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso L.....	55
Figura B.15: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso DR.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.5.1: Propriedades físicas do ar e da parafina.....	22
Tabela 4.1.1: Valores dos parâmetros utilizados em cada caso.....	28
Tabela 4.3.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da viscosidade do combustível.....	30
Tabela 4.4.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da espessura da camada líquida de combustível.....	32
Tabela 4.5.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante.....	35
Tabela 4.6.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.....	38

1) INTRODUÇÃO

1.1) Contexto do projeto

1.1.1) Propulsão híbrida

A propulsão híbrida se baseia em utilizar um dos reagentes da combustão no estado sólido, e o outro no estado líquido ou gasoso. Esse tipo de propulsão é chamado de “híbrido” justamente porque utiliza os reagentes da combustão em estados diferentes. Na configuração clássica de um motor híbrido, representada na figura 1.1.1.1, utiliza-se o combustível no estado sólido, e o oxidante no estado líquido ou gasoso, enquanto que na configuração inversa utiliza-se o oxidante no estado sólido, e o combustível no estado líquido ou gasoso.

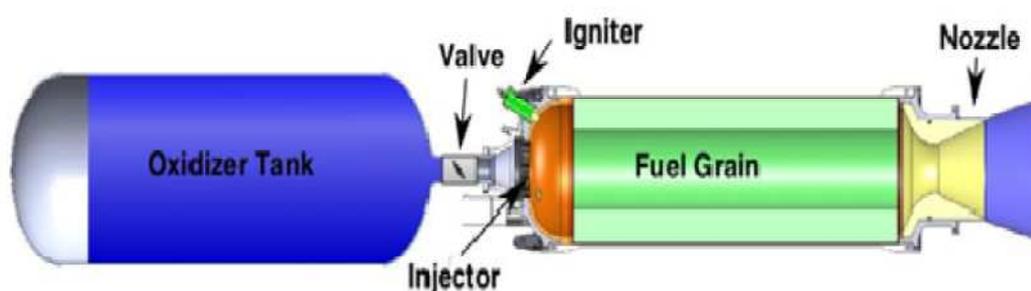


Figura 1.1.1.1: Configuração clássica de um motor a propulsão híbrida

Na configuração clássica, um motor a propulsão híbrida é constituído dos seguintes componentes principais:

1. Reservatório de oxidante: utilizado para armazenar o oxidante pressurizado na forma líquida ou gasosa.
2. Válvula de injeção: utilizada para controlar a injeção de oxidante na câmara de combustão.
3. Câmara de combustão: utilizada para armazenar o bloco de combustível sólido e como local para realizar a combustão.

4. Bocal: utilizado para gerar empuxo através da aceleração dos gases produzidos pela combustão.

A propulsão híbrida apresenta as seguintes vantagens que fazem com que este tipo de propulsão seja de grande interesse no setor aeroespacial:

1. Segurança: os reagentes são inertes enquanto estão separados. Por isso, não existe o risco de uma ignição acidental e, em caso de uma emergência, basta interromper a injeção de oxidante para que o motor seja desligado.

2. Flexibilidade de funcionamento: a quantidade de oxidante injetado é controlada pela válvula de injeção. Por isso, pode-se controlar a quantidade de empuxo gerado, e pode-se fazer inúmeras ignições e extinções.

3. Confiabilidade de funcionamento: é de simples construção, há baixa sensibilidade térmica, e tolera falhas de fabricação do bloco de combustível sólido.

4. Versatilidade na escolha dos reagentes: os requisitos mecânicos do reagente sólido são pouco exigentes.

5. Custos baixos: a construção é simples (confiabilidade de funcionamento) e pode-se utilizar reagentes econômicos (versatilidade na escolha dos reagentes).

6. Baixo impacto ambiental: pode-se utilizar reagentes cuja combustão causa um baixo impacto ambiental (versatilidade na escolha dos reagentes).

7. Bom desempenho propulsivo: pode-se utilizar uma combinação de reagentes que proporcione um alto desempenho propulsivo (versatilidade na escolha dos reagentes).

O grande interesse do setor aeroespacial na propulsão híbrida está no fato que esta combina as principais vantagens das já consolidadas propulsões líquida (segurança e flexibilidade de funcionamento) e sólida (custos baixos). Todavia, apesar dessas grandes vantagens, a propulsão híbrida apresenta as seguintes desvantagens que limitam o seu uso no setor aeroespacial:

1. Velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido baixa e pouco sensível às condições operativas.
2. Dificuldade para operar em motores de grande escala.
3. Baixa qualidade de combustão (rugosa e pouco eficiente).
4. Possibilidade de instabilizações longitudinais durante o funcionamento do motor.
5. Variação da razão de mistura ao longo do tempo durante o funcionamento do motor.

Na propulsão híbrida tradicional, a combustão ocorre entre o oxidante gasoso e o combustível vaporizado, como é representado na figura 1.1.1.2. A condição limitante na propulsão híbrida é a baixa velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido. Esta é a taxa com que o combustível sólido é consumido na direção normal à superfície sólida; ou seja, é a velocidade com que o combustível vaporizado é formado. Portanto, na propulsão híbrida a vazão mássica de combustível vaporizado é baixa.

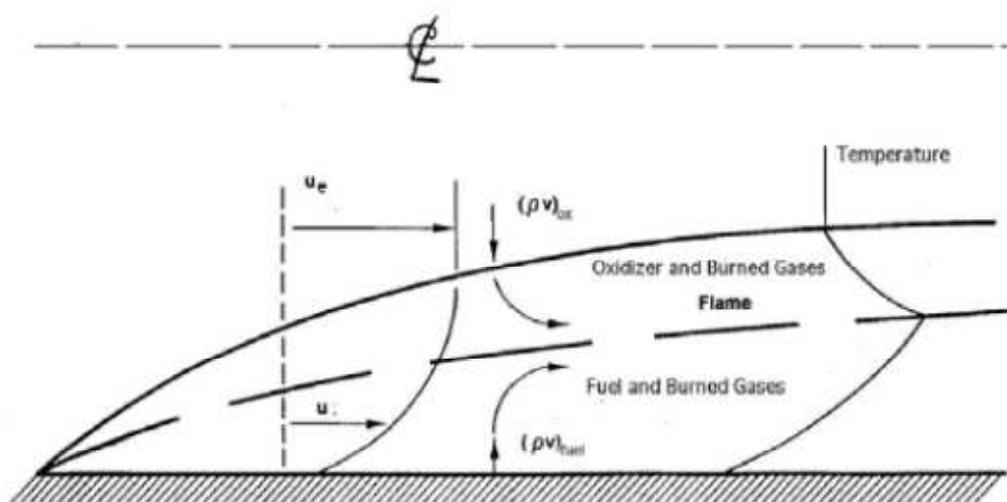


Figura 1.1.1.2: Ilustração da combustão na propulsão híbrida tradicional (retirado de De Luca [1])

Além disso, a vazão mássica de oxidante injetado na câmara de combustão é controlada de forma a haver uma razão de mistura desejada. Dessa forma, a vazão mássica de oxidante está diretamente ligada à vazão mássica de combustível vaporizado e, portanto, também é baixa. Conseqüentemente, a vazão mássica dos gases de combustão, que é diretamente ligada à soma das vazões mássicas de combustível vaporizado e de oxidante, também é baixa.

O empuxo gerado na propulsão híbrida é diretamente proporcional à vazão mássica que passa no bocal. Esta corresponde à vazão mássica dos gases de combustão e, por esse motivo, o empuxo gerado é baixo. Isso faz com que não seja possível utilizar motores de tipo híbrido no lançamento de foguetes, pois a condição necessária de um propulsor para essa aplicação é gerar uma quantidade de empuxo superior ao peso do próprio foguete.

Um importante tema de pesquisa atualmente é o aumento da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido na propulsão híbrida devido às grandes vantagens que este tipo de propulsão apresenta. Dessa forma, motores de tipo híbrido poderão ser utilizados, no futuro, no lançamento de foguetes, que é a principal aplicação propulsiva no setor aeroespacial.

1.1.2) Fenômeno de *entrainment*

O fenômeno de *entrainment* é um das técnicas descobertas para aumentar a velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido na propulsão híbrida. Com esta técnica, pode-se aumentar em uma ordem de grandeza esta velocidade em um motor de tipo híbrido.

A palavra “*entrainment*” significa, em inglês, desprendimento de gotículas de uma camada líquida para um gás. Em português, este fenômeno é conhecido como “carreamento”. Essa técnica é chamada dessa forma porque descobriu-se que o desprendimento de gotículas de combustível para o fluxo de oxidante gasoso aumenta a velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido na propulsão híbrida. Ao longo deste relatório, este fenômeno será designado com o termo em inglês pois este é o mais utilizado na literatura.

O fenômeno de *entrainment* ocorre quando há uma instabilização da camada líquida de combustível formada sobre a superfície sólida do bloco de combustível, como é representado na figura 1.1.2.1. A formação dessa camada líquida é observada em combustíveis com baixa temperatura de fusão. A instabilização desta, por sua vez, pode ocorrer se a camada líquida de combustível tiver baixas viscosidade e tensão superficial. O comportamento da instabilização e as características das gotículas formadas variam com as propriedades físicas dos reagentes e com as condições operativas do motor.

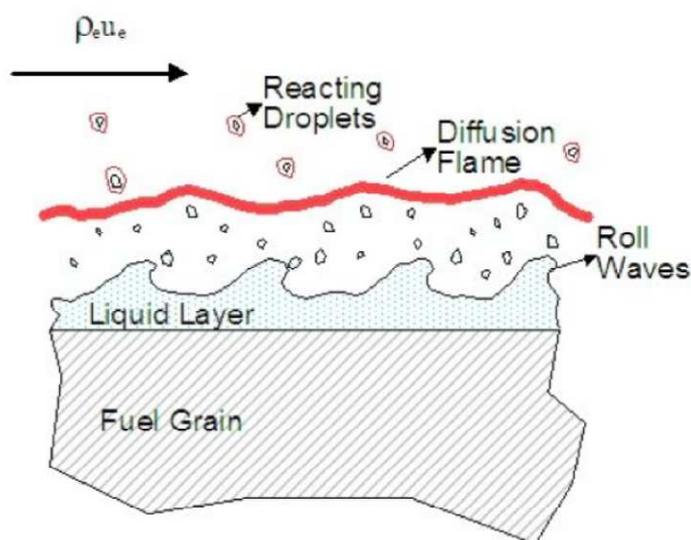


Figura 1.1.2.1: Ilustração do fenômeno de *entrainment* (retirado de Franchi [2])

Dessa forma, o fenômeno de *entrainment* só ocorre quando determinados combustíveis são utilizados. As características necessárias para a formação da camada líquida e o conseqüente desprendimento de gotículas são encontradas nos sólidos criogênicos e nos alcanos. Alguns dos sólidos criogênicos testados com sucesso na propulsão híbrida apresentando o fenômeno de *entrainment* são o monóxido de carbono (CO), o oxigênio (O₂) e o hidrogênio (H₂). No caso dos alcanos, o desprendimento de gotículas em um motor híbrido pode ser observado com o uso de parafinas como combustível sólido.

Na propulsão híbrida com o fenômeno de *entrainment*, a combustão ocorre entre o oxidante gasoso e o combustível na forma de gotículas, e

não na forma de vapor. Sendo assim, o aumento da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido devido ao desprendimento de gotículas de combustível pode ser explicado por dois motivos principais:

1. As gotículas de combustível, estando no estado líquido, precisaram absorver calor de fusão na sua formação. Este é menor que o calor de vaporização que o vapor de combustível deve absorver na sua formação. Portanto, para um mesmo fluxo de calor proveniente da combustão, a formação de gotículas é mais veloz que a formação de vapor de combustível. Isso significa que, na propulsão híbrida, a velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido é maior no caso com o fenômeno de *entrainment* do que no caso tradicional.

2. A transferência de massa gasosa de combustível vaporizado da superfície sólida para a chama de combustão provoca um efeito de blocagem que reduz a transferência de calor convectiva para a superfície sólida, reduzindo a velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido no caso tradicional da propulsão híbrida. No caso com desprendimento de gotículas, a transferência de massa gasosa é reduzida, o que significa que o subsequente efeito de blocagem também é reduzido. Portanto, a redução da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido provocada pelo efeito de blocagem é menor no caso com o fenômeno de *entrainment* do que no caso tradicional.

1.2) Objetivos do projeto

O aumento da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido na propulsão híbrida causado pelo fenômeno de *entrainment* depende das características das gotículas de combustível formadas, principalmente do diâmetro destas. Por esse motivo, é de grande interesse conhecer quais propriedades dos reagentes e quais condições operativas do motor alteram o diâmetro médio das gotículas formadas, e de que forma essas alterações ocorrem. Sabendo isso, pode-se projetar um motor de tipo híbrido que utilize a técnica do fenômeno de

entrainment para obter a maior velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido possível.

Dessa forma, decidiu-se como objetivo deste projeto analisar a variação do diâmetro das gotículas formadas no fenômeno de *entrainment* na propulsão híbrida em função dos seguintes parâmetros:

1. Viscosidade da camada líquida de combustível.
2. Espessura da camada líquida de combustível.
3. Velocidade do fluxo gasoso de oxidante.
4. Perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

Decidiu-se também que essa análise será feita com o *software* livre “*Gerris Flow Solver*” capaz de resolver as equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento dos fluidos. Dessa forma, pode-se simular em um ambiente computacional o fenômeno de *entrainment* entre o fluxo de oxidante gasoso e a camada líquida de combustível.

Ao final deste projeto, espera-se saber de que forma a variação dos parâmetros anteriormente elencados afeta o diâmetro das gotículas de combustível geradas pelo fenômeno de *entrainment* na propulsão híbrida.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados de forma resumida os trabalhos que forneceram a base teórica para a execução deste projeto. Estes trabalhos são os artigos técnicos Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3], e Karabeyoglu; Cantwell [4].

2.1) Revisão do artigo técnico Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3]

Neste artigo técnico, os autores se propuseram a generalizar a teoria clássica da propulsão híbrida para que esta pudesse ser estendida aos casos onde são utilizados combustíveis sólidos que formam uma camada líquida na superfície, como os sólidos criogênicos e as parafinas.

Em outros trabalhos já haviam sido realizadas experiências com motores híbridos que utilizavam combustíveis sólidos que formavam uma camada líquida na superfície. Utilizando os dados dessas experiências, foram calculadas neste artigo técnico as velocidades de regressão da superfície do bloco de combustível sólido para cada caso. Os resultados obtidos são apresentados na figura 2.1.1.

Observa-se que o pentano e a parafina apresentam velocidades de regressão da superfície do bloco de combustível sólido três a quatro vezes superiores àquela obtida com o HTPB (polibutadieno com terminação hidroxílica). O pentano e a parafina são combustíveis sólidos que formam uma camada líquida na superfície, enquanto que o HTPB é o combustível sólido tradicionalmente utilizado na propulsão híbrida e, portanto, não forma esta camada líquida. Estes resultados não podem ser explicados utilizando a teoria clássica da propulsão híbrida, o que justifica o objetivo dos autores de generalizar esta teoria. Segundo eles, as maiores velocidades de regressão da superfície do bloco de combustível sólido observadas para o pentano e para a parafina são causadas pelo fenômeno de *entrainment*, e este não é previsto na teoria clássica da propulsão híbrida.

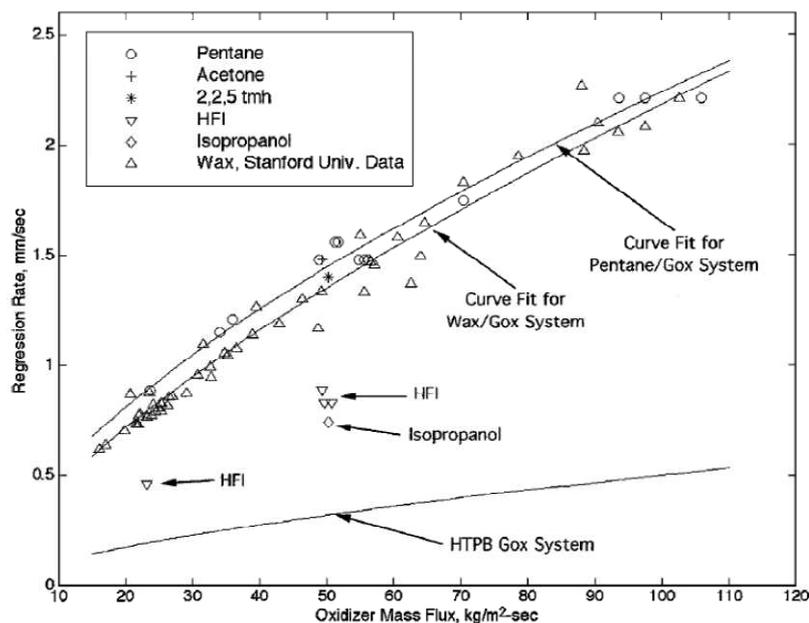


Figura 2.1.1: Velocidades de regressão da superfície do bloco de combustível sólido obtidas para vários combustíveis sólidos (retirado de Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3])

Para fazer essa generalização, foi necessário desenvolver expressões para dois parâmetros de grande importância no fenômeno de *entrainment*. Estes são a espessura da camada líquida formada e a vazão mássica de combustível líquido despreendido desta camada líquida através do fenômeno de *entrainment*. O desenvolvimento da expressão para a espessura da camada líquida foi feito através da análise térmica do modelo representado na figura 2.1.2.

Na literatura, já existia uma expressão para a vazão mássica de gotículas desprendidas de uma camada líquida sob o efeito de um forte fluxo gasoso. Esta expressão, porém, não levava em consideração a redução da espessura da camada líquida. Os autores deste artigo consideraram que esta simplificação poderia gerar erros não desprezíveis e, portanto, decidiram corrigir esta expressão para que esta levasse em consideração a redução da espessura da camada líquida.

Na literatura, existia também uma relação empírica que dava as condições críticas para que o fenômeno de *entrainment* ocorresse. Utilizando as

propriedades físicas de vários combustíveis sólidos, as curvas apresentadas na figura 2.1.3 foram geradas utilizando essa relação.

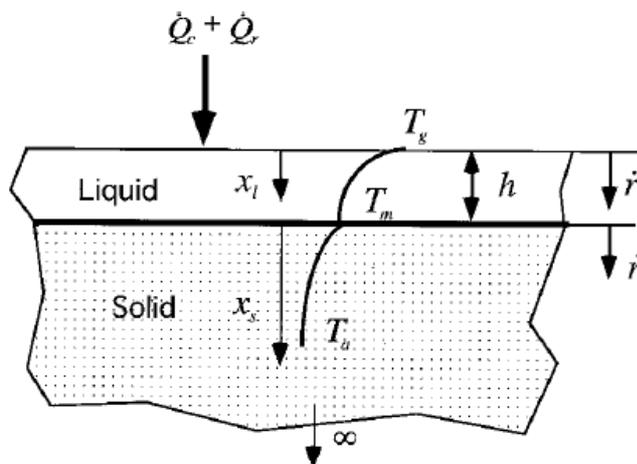


Figura 2.1.2: Modelo térmico utilizado para o desenvolvimento da expressão da espessura da camada líquida (retirado de Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3])

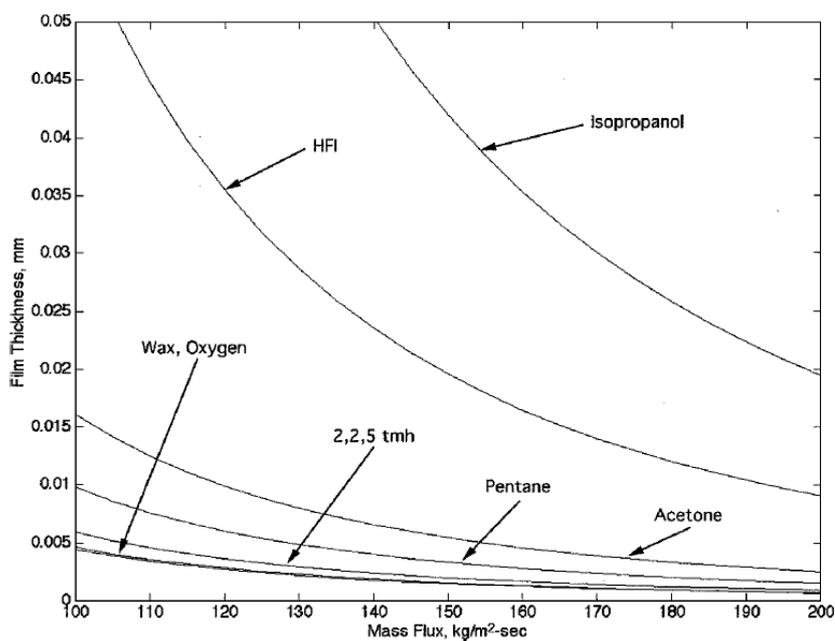


Figura 2.1.3: Condições críticas para a ocorrência do fenômeno de *entrainment* para cada combustível sólido (retirado de Karabeyoglu; Altman; Cantwell [3])

As curvas representam a condição crítica para o fenômeno de *entrainment* para cada combustível; em outras palavras, o fenômeno de *entrainment* só ocorre se o ponto de funcionamento do motor estiver acima da curva crítica do

respectivo combustível sólido. Observa-se que, para a parafina e para o pentano, a região onde o fenômeno de *entrainment* ocorre é grande comparada com outros combustíveis, o que mostra que ambos são boas opções de combustível sólido para haver a ocorrência do fenômeno de *entrainment*.

A generalização da teoria clássica da propulsão híbrida, para que esta levasse em conta a presença da fase líquida de combustível e o desprendimento de gotículas desta fase líquida através do fenômeno de *entrainment*, foi feita através de três modificações da teoria clássica original:

1. O calor de vaporização efetivo (calor por unidade de massa necessário para a transferência de combustível da superfície sólida para a chama de combustão) foi reduzido porque parte da transferência de massa de combustível ocorre através do fenômeno de *entrainment*. O combustível transferido através do desprendimento de gotículas não se transforma em vapor, o que faz com que o calor absorvido por este (calor de fusão) seja inferior ao calor absorvido pelo combustível gasoso (calor de vaporização).

2. O fator de bloqueio foi alterado porque a transferência de massa de combustível através do fenômeno de *entrainment* não causa um efeito de bloqueio. Este fator determina a diminuição do fluxo térmico convectivo para a superfície sólida causada pelo efeito de bloqueio da transferência gasosa de massa de combustível da superfície sólida para a chama de combustão. Como a transferência de massa através do fenômeno de *entrainment* ocorre na fase líquida, o efeito de bloqueio total gerado é reduzido.

3. As ondas formadas na camada líquida provocadas pela instabilização desta aumentam a rugosidade da superfície, o que aumenta também o fluxo térmico da chama de combustão para a superfície.

2.2) Revisão do artigo técnico Karabeyoglu; Cantwell [4]

Neste artigo técnico, os autores se propuseram a analisar a estabilidade de uma camada líquida sob o efeito de um forte fluxo gasoso. Esta análise é de

grande importância para a propulsão híbrida porque uma condição necessária para que o fenômeno de *entrainment* ocorra é a instabilização da camada líquida de combustível que se forma na superfície sólida de alguns combustíveis sólidos, como os sólidos criogênicos e as parafinas. Uma representação do modelo de estabilidade a ser estudado é apresentada na figura 2.2.1.

Considerando que a interface entre a camada líquida e o fluxo gasoso assume a forma de uma onda harmônica, as equações de Navier-Stokes foram derivadas. O resultado obtido desta derivação foi uma equação diferencial ordinária de quarto grau, conhecida como equação de Orr-Sommerfeld (2.2.1), que governa a estabilidade de uma camada líquida:

$$(\alpha \bar{U}_0 - \beta)(\phi^{IV} - \alpha^2 \phi) - \alpha \bar{U}_0'' \phi = -\left(\frac{i}{Re}\right)(\phi^{IV} - 2\alpha^2 \phi'' + \alpha^{IV} \phi) - b(\phi^{III} - \alpha^2 \phi') \quad (2.2.1)$$

onde α é o número de onda, U_0 é a velocidade média axial do líquido, β é o parâmetro de amplificação, ϕ é a componente vertical da função de corrente da fase líquida, i é a unidade imaginária, Re é o número de Reynolds da fase líquida, e b é o parâmetro da velocidade de regressão.

Para resolver a equação de Orr-Sommerfeld, foram definidas cinco condições de contorno e foram desenvolvidos dois tipos de solução. As condições de contorno definidas foram as seguintes:

1. Velocidade paralela ao fluxo gasoso nula na superfície sólida.
2. Velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido constante.
3. Condição cinemática na interface entre a camada líquida e o fluxo gasoso.
4. Equilíbrio das forças tangenciais.
5. Equilíbrio das forças normais.

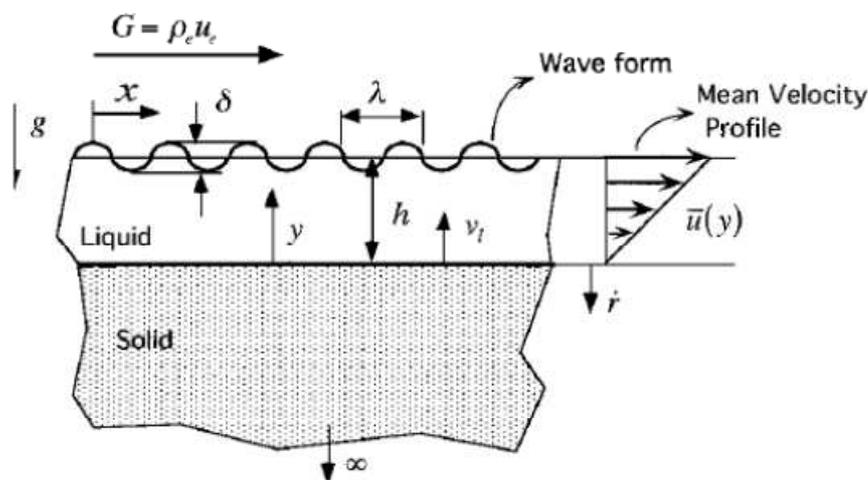


Figura 2.2.1: Modelo de estabilidade estudado (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4])

O primeiro tipo de solução desenvolvido foi uma solução em série de potência. Contudo, as condições de convergência desta solução limitam o seu uso para casos onde o número de Reynolds do fluxo gasoso é inferior a um. Esta grande limitação da solução em série de potência levou os autores a desenvolverem, também, uma solução exata para a equação de Orr-Sommerfeld pois pode-se utilizar esta solução para qualquer número de Reynolds do fluxo gasoso.

A resolução do problema da estabilidade da camada líquida de combustível requeria o conhecimento das propriedades do fluxo gasoso. Por esse motivo, foram apresentadas as equações e as aproximações, obtidas de outros trabalhos, para a determinação das propriedades necessárias do fluxo gasoso.

Dessa forma, com a equação de Orr-Sommerfeld, pode-se calcular a taxa de amplificação das instabilizações da camada líquida. Esta taxa de amplificação está diretamente ligada à ocorrência do fenômeno de *entrainment* porque quanto maior é a taxa de amplificação, maiores são as instabilizações e maior é o desprendimento de gotículas. Então, foram analisados os efeitos do número de Reynolds do fluxo gasoso, da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido, da viscosidade do combustível e da tensão superficial do combustível na taxa de amplificação. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 2.2.2, 2.2.3, e 2.2.4.

Na figura 2.2.2 observa-se que o aumento do número de Reynolds da fase gasosa aumenta a amplificação das instabilizações da fase líquida. Portanto, o aumento do número de Reynolds tende a instabilizar a camada líquida.

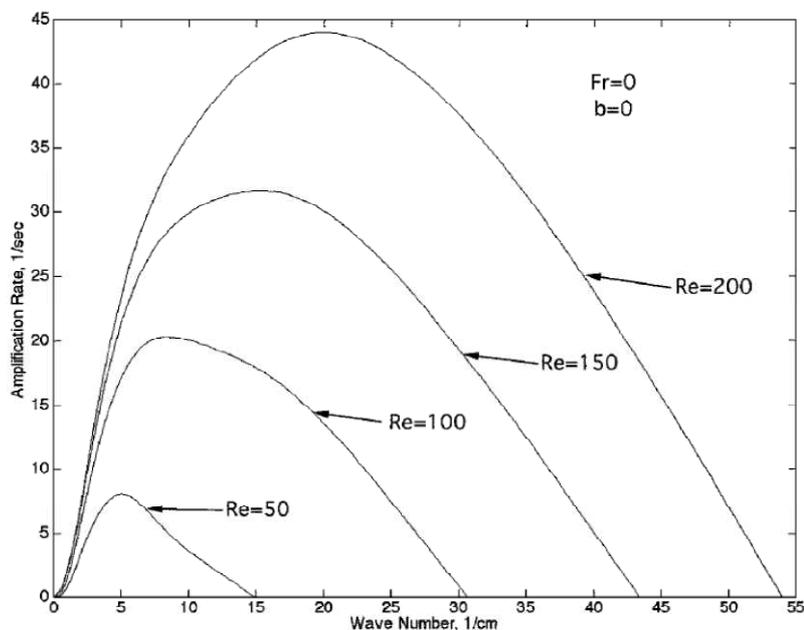


Figura 2.2.2: Efeito do número de Reynolds do fluxo gasoso na taxa de amplificação das instabilizações (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4])

Na figura 2.2.3 observa-se que o aumento do parâmetro da velocidade de regressão diminui a amplificação das instabilizações da fase líquida. Portanto, o aumento da velocidade de regressão tende a estabilizar a camada líquida.

E na figura 2.2.4 observa-se que o uso de combustíveis com altas viscosidade e tensão superficial diminui a amplificação das instabilizações da fase líquida. Portanto, esses combustíveis tendem a estabilizar a camada líquida.

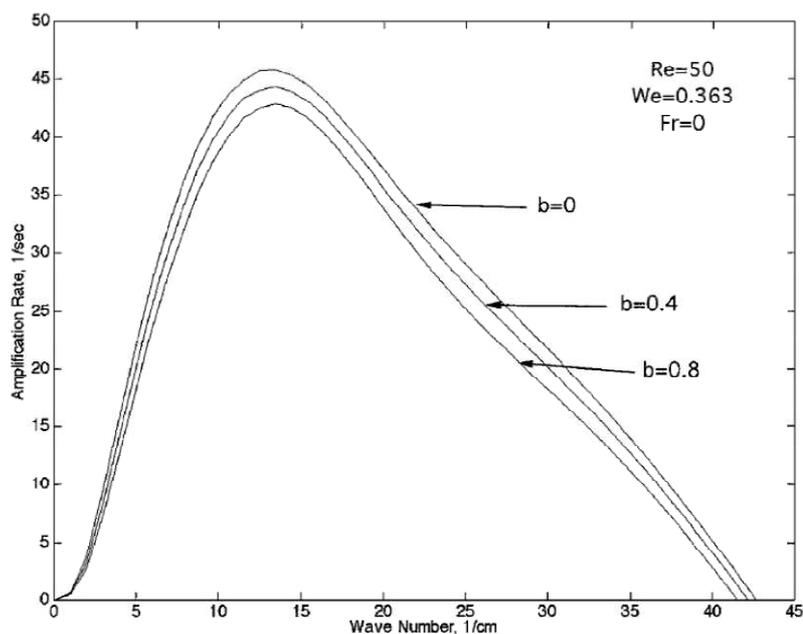


Figura 2.2.3: Efeito da velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido na taxa de amplificação das instabilizações (b é o parâmetro de velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido) (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4])

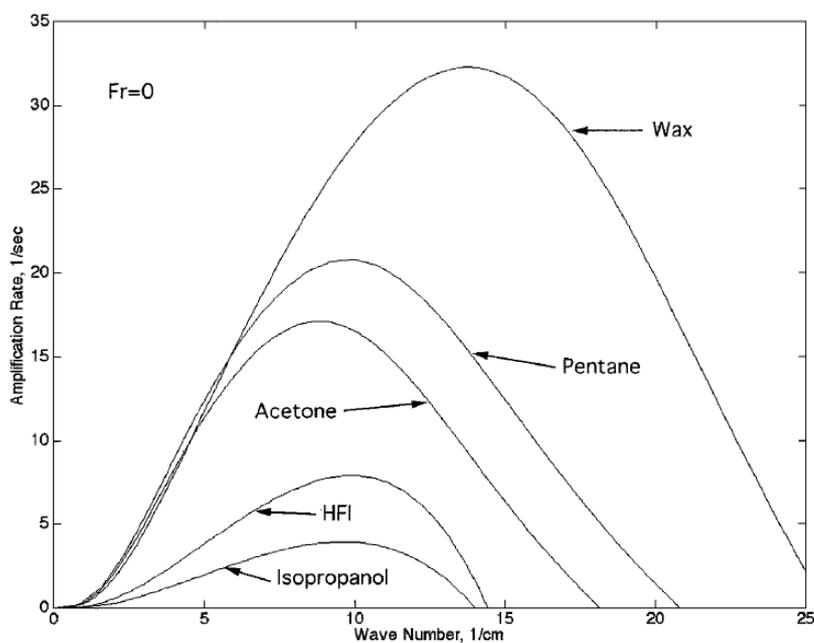


Figura 2.2.4: Efeito do combustível sólido na taxa de amplificação das instabilizações (retirado de Karabeyoglu; Cantwell [4])

3) METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados no desenvolvimento deste projeto. Na seção 3.1 é descrito o desenvolvimento do código utilizado para simular o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver*, e na seção 3.2 é descrito o método usado para medir, com o programa *ImageJ*, os diâmetros das gotículas obtidas nas simulações.

3.1) Simulação do fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver*

Nesta seção é apresentado o método utilizado para o desenvolvimento do código usado para simular o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver*. Além disso, no início da seção é apresentada também uma breve descrição do *software*.

O método utilizado para o desenvolvimento do código é dividido nas seguintes etapas principais: modelagem da geometria, definição das condições iniciais, definição das condições de contorno, definição das propriedades físicas, definição dos parâmetros de controle, e exibição da resposta. Estas etapas principais são explicadas em detalhe nesta seção enquanto que a sequência lógica dos passos feitos na elaboração do código é apresentada na figura 3.1.1. Para maiores detalhes, o código completo desenvolvido neste projeto é apresentado no apêndice A.

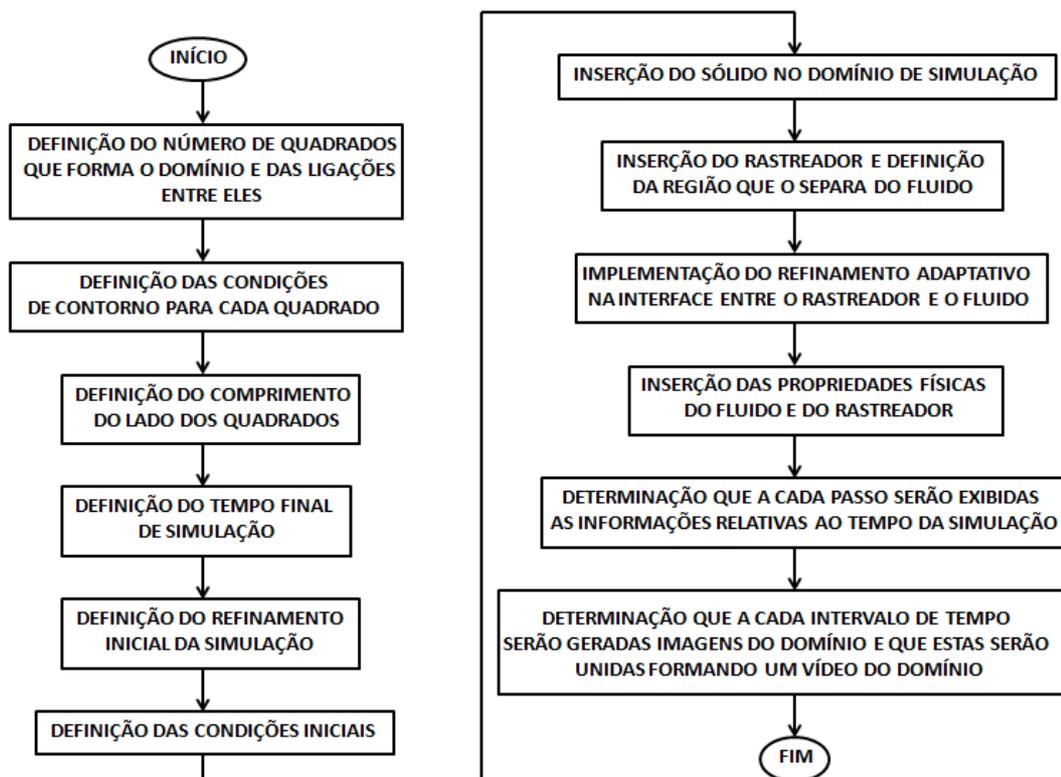


Figura 3.1.1: Descrição da sequência lógica utilizada no desenvolvimento do código para simular o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver*

3.1.1) Descrição do programa *Gerris Flow Solver*

O programa *Gerris Flow Solver* é um *software* livre desenvolvido para resolver as equações diferenciais parciais que descrevem os fluxos de fluidos. Este foi criado em 2001 por Stéphane Popinet para o uso em sistemas operacionais de tipo Linux, e foi batizado com o nome em latim e francês do inseto conhecido como *water strider* capaz de se locomover sobre a superfície da água. Na figura 3.1.1.1 é apresentado o logotipo do programa onde é representado o inseto *water strider*.

O *Gerris Flow Solver* resolve as equações incompressíveis e adimensionais de Navier-Stokes, tanto na forma bidimensional como na forma tridimensional. Para isso, o programa utiliza uma discretização do volume finito através de uma estrutura de dados *quadtree* no caso bidimensional e *octree* no caso

tridimensional. A vantagem destes tipos de discretização é que o refinamento da malha gerada é totalmente adaptável, tanto no tempo como no espaço, às características dinâmicas do fluxo. Isso proporciona ganhos tanto no custo como na precisão computacional.

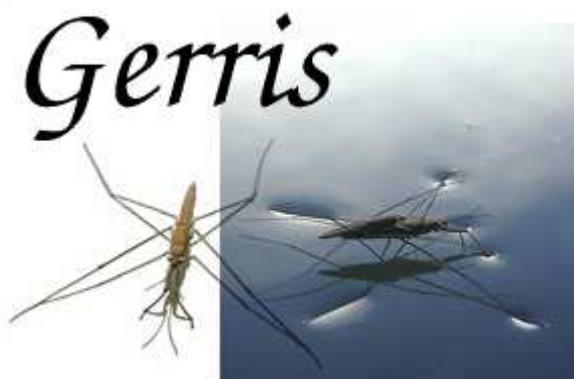


Figura 3.1.1.1: Logotipo do programa *Gerris Flow Solver* (retirado de Popinet [5])

Outras características importantes do *software* são: a capacidade de gerar malhas automaticamente para geometrias complexas, a possibilidade de utilizar um número ilimitado de rastreadores passivos de advecção ou difusão para acompanhar um fluxo, a possibilidade de modificar o código do programa conforme as necessidades do usuário, e a presença de várias condições de contorno já embutidas no *software*.

3.1.2) Modelagem da geometria

O passo inicial na elaboração do código utilizado para simular o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver* é a modelagem da geometria que representará a câmara de combustão de um motor híbrido. Aproximando esta para um caso bidimensional, deseja-se modelar uma geometria que consiste no fluxo gasoso de oxidante passando entre a parede da câmara de combustão e o bloco de combustível sólido, sendo que na superfície do bloco de combustível sólido há a presença de uma camada líquida de combustível.

No caso bidimensional do *software*, o domínio de simulação é criado a partir de quadrados idênticos, sendo que o número de quadrados e a posição destes devem ser definidos pelo código. Dessa forma, para representar o caso descrito anteriormente, foram utilizados oito quadrados: quatro formando uma linha horizontal superior e quatro formando uma linha horizontal inferior. A linha de quadrados superior representa a região onde está presente o fluxo gasoso de oxidante e a linha de quadrados inferior representa a região onde está presente a camada líquida de combustível.

Em um motor híbrido real, a espessura da camada líquida de combustível é menor que a altura da seção de passagem do fluxo gasoso. Para levar isso em consideração na geometria do código, um sólido retangular de comprimento igual ao da linha de quadrados foi colocado na parte inferior da linha de quadrados inferior. Assim, manipulando a altura do sólido pode-se controlar a espessura da camada líquida de combustível. O controle da espessura da camada líquida é essencial para este projeto pois conhecer o efeito da variação deste parâmetro no diâmetro das gotículas formadas é um dos objetivos a ser atingido neste projeto.

Além disso, no código deve-se impor que o combustível e o oxidante são fluidos diferentes. Isso foi feito considerando a camada líquida de combustível como um rastreador. Dessa forma, foram atribuídas cores diferentes para cada fluido, permitindo a visualização das gotículas no fluxo gasoso.

A geometria criada com o código desenvolvido é apresentada na figura 3.1.2.1, obtida através do próprio programa *Gerris Flow Solver*. O limite superior da figura corresponde ao limite superior da linha de quadrados superior e representa a parede da câmara de combustão. O limite inferior, por sua vez, corresponde à superfície superior do sólido retangular e representa a superfície do bloco sólido de combustível. O fluxo gasoso de oxidante é representado em vermelho e a camada líquida de combustível é representada em azul.



Figura 3.1.2.1: Geometria criada para representar bidimensionalmente a câmara de combustão de um motor híbrido (obtido com *Gerris Flow Solver* [6])

3.1.3) Definição das condições iniciais

As condições iniciais que foram impostas para que executar as simulações foram as seguintes:

1. Velocidade vertical da camada líquida.
2. Velocidade vertical do fluxo gasoso.
3. Velocidade horizontal da camada líquida.
4. Velocidade horizontal do fluxo gasoso.
5. Forma da interface inicial entre o fluxo gasoso e a camada líquida.

Na direção vertical, foi imposto que a velocidade é nula em todo o domínio. Isso foi feito porque, em motores de tipo híbrido, o fluxo ocorre predominantemente na direção paralela à parede da câmara de combustão, que no modelo definido no item anterior corresponde à direção horizontal.

Na direção horizontal, foi imposto que tanto o fluxo gasoso como o fluxo líquido estão completamente desenvolvidos no instante inicial em todo

o domínio. Isso foi feito porque deseja-se simular a ocorrência do fenômeno de *entrainment* em um motor híbrido em pleno funcionamento.

Para a fase líquida foi utilizado sempre um perfil de velocidade linear. Por outro lado, para a fase gasosa foram utilizados perfis de velocidade diferentes para cada caso estudado uma vez que conhecer o efeito da variação deste perfil no diâmetro das gotículas formadas é um dos objetivos a ser atingido neste projeto. Além disso, admitiu-se que a relação entre a velocidade da fase líquida na interface entre as duas fases e a velocidade da fase gasosa no mesmo local é 0,01, e que a relação entre a velocidade da fase gasosa na interface entre as duas fases e a velocidade da fase gasosa no centro da seção de passagem do fluxo gasoso também é 0,01.

Finalmente, foi imposto que a interface inicial entre o fluxo gasoso e a camada líquida tem a forma de uma reta horizontal e se localiza onde as duas linhas de quadrados que definem o domínio se encontram; ou seja, se localiza no centro do domínio de simulação. Decidiu-se utilizar uma reta horizontal para representar a região de separação inicial entre as duas fases pois deseja-se que as instabilizações da camada líquida se formem naturalmente durante a simulação.

3.1.4) Definição das condições de contorno

As condições de contorno foram definidas de acordo com o modelo descrito no item 3.1.2:

1. Velocidades vertical e horizontal nulas nos limites superior e inferior para representar as superfícies sólidas.
2. Condições de velocidade no limite esquerdo idênticas às adotadas nas condições iniciais.
3. Condição de saída do domínio no limite direito.

Como os limites superior e inferior devem ser modelados como superfícies sólidas pois representam a parede da câmara de combustão e a superfície do bloco de combustível sólido, respectivamente, foi imposto que em

ambos os limites tanto a velocidade na direção horizontal como a velocidade na direção vertical são nulas.

O limite esquerdo deve representar a entrada no domínio de simulação dos fluxos gasoso de oxidante e líquido de combustível. Para isso, foram impostas como condição de contorno as mesmas condições de velocidade utilizadas como condição inicial para o domínio. Isso foi feito porque deseja-se representar o motor híbrido em pleno funcionamento. Sendo assim, as velocidades na direção vertical são nulas, o perfil de velocidade na direção horizontal para a fase líquida é linear, e o perfil de velocidade na direção horizontal para a fase gasosa é diferente para cada caso estudado uma vez que conhecer o efeito da variação deste perfil no diâmetro das gotículas formadas é um dos objetivos a ser atingido neste projeto.

Por fim, o limite direito representa a saída do domínio de simulação dos fluxos gasoso de oxidante e líquido de combustível. Para fazer isso, foi imposta como condição de contorno uma condição de fluxo livre para as fases gasosa e líquida. Isso foi feito com uma função específica já embutida no programa *Gerris Flow Solver*.

3.1.5) Definição das propriedades físicas

Para simular o fenômeno de *entrainment*, é necessário inserir no código a densidade e a viscosidade do oxidante gasoso, e a densidade, a viscosidade e a tensão superficial do combustível líquido. A substância utilizada como oxidante foi o ar a 15 °C, enquanto que o material utilizado como combustível foi uma parafina, cujas propriedades foram obtidas da referência [3]. Os valores utilizados são apresentados na tabela 3.1.5.1.

Tabela 3.1.5.1: Propriedades físicas do ar e da parafina

	Ar (15 °C)	Parafina [3]
Densidade (kg/m³)	1,225	654,4
Viscosidade (μPa*s)	17,8	650
Tensão superficial (mN/m)	-	7,1

Como foi descrito no item 3.1.1, o programa *Gerris Flow Solver* trabalha com as equações de Navier-Stokes na forma adimensional. Por esse

motivo, os valores para a densidade e para a viscosidade devem ser adimensionalizados. Isso foi feito colocando no código a relação entre as densidades das duas substâncias e a relação entre as viscosidades das duas substâncias. A tensão superficial, por sua vez, foi adimensionalizada pelo *software* através da função específica utilizada para inserir este valor no código.

3.1.6) Definição dos parâmetros de controle

Existem dois parâmetros de controle da simulação que devem ser sempre definidos. Estes são o tempo final de simulação e o refinamento inicial da discretização do domínio de simulação. O tempo final de simulação foi escolhido para cada caso estudado de tal forma a haver um compromisso entre um tempo real de simulação não excessivamente longo e o desprendimento de um número razoável de gotículas.

Inicialmente, essa escolha foi feita de maneira subjetiva uma vez que o número de gotículas desprendidas ainda não havia sido contado. Posteriormente, o número de gotículas formadas em cada simulação foi contado durante a medição dos diâmetros e as simulações dos casos onde foram obtidas poucas gotículas foram refeitas com tempos de simulação mais longos. Além disso, como refinamento inicial foi utilizado um valor da mesma ordem dos usados pelo criador do programa *Gerris Flow Solver* em modelos bidimensionais [7].

Além desses dois parâmetros, foi definido que a interface entre a fase líquida e a fase gasosa deveria ter um refinamento maior durante toda a simulação. Isso foi feito porque a interface entre as duas fases corresponde à superfície da camada líquida e às superfícies das gotículas, que são as regiões de maior interesse para este projeto. Esse refinamento maior foi aplicado através de um refinamento adaptativo na interface entre as duas fases a cada passo da simulação; ou seja, a cada passo da simulação, o programa usa um refinamento maior para descrever as regiões onde há o encontro entre as duas fases.

3.1.7) Exibição da resposta

Para que fosse possível medir os diâmetros das gotículas formadas durante a simulação, foi necessário ter como resposta do programa *Gerris Flow Solver* uma representação visual do domínio de simulação ao longo do tempo de simulação. Por esse motivo, foi definido que, para intervalos regulares da simulação, serão geradas fotografias do domínio no instante específico. Além disso, foi especificado que o *software* deve juntar essas imagens e formar um vídeo do domínio de simulação.

Dessa forma, pode-se observar a ocorrência do fenômeno de *entrainment* e pode-se medir os diâmetros das gotículas com o auxílio de um programa de processamento de imagens. Na figura 3.1.7.1 é apresentada uma das imagens obtidas com o programa *Gerris Flow Solver* para o código elaborado neste projeto, enquanto que na figura 3.1.7.2 é apresentado um aumento da área destacada na figura 3.1.7.1 para melhor visualizar o fenômeno de *entrainment*. Pode-se observar nas figuras a presença das gotículas formadas e a instabilização da camada líquida, que é uma condição necessária para o desprendimento das gotículas.

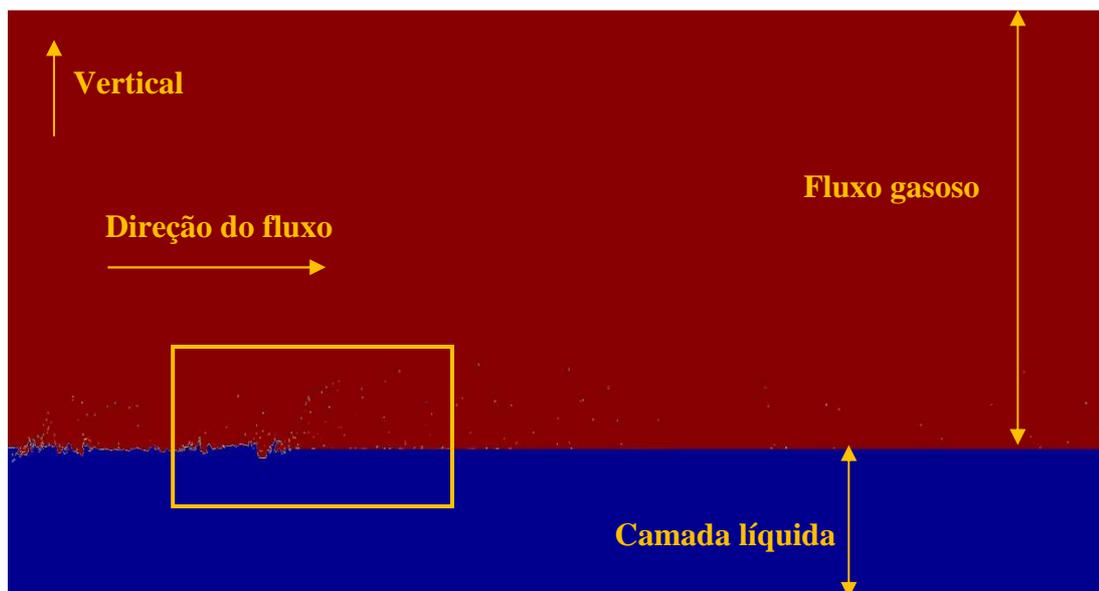


Figura 3.1.7.1: Ilustração do fenômeno de *entrainment* obtido com a simulação do código desenvolvido para o programa *Gerris Flow Solver* (obtido com *Gerris Flow Solver* [6])

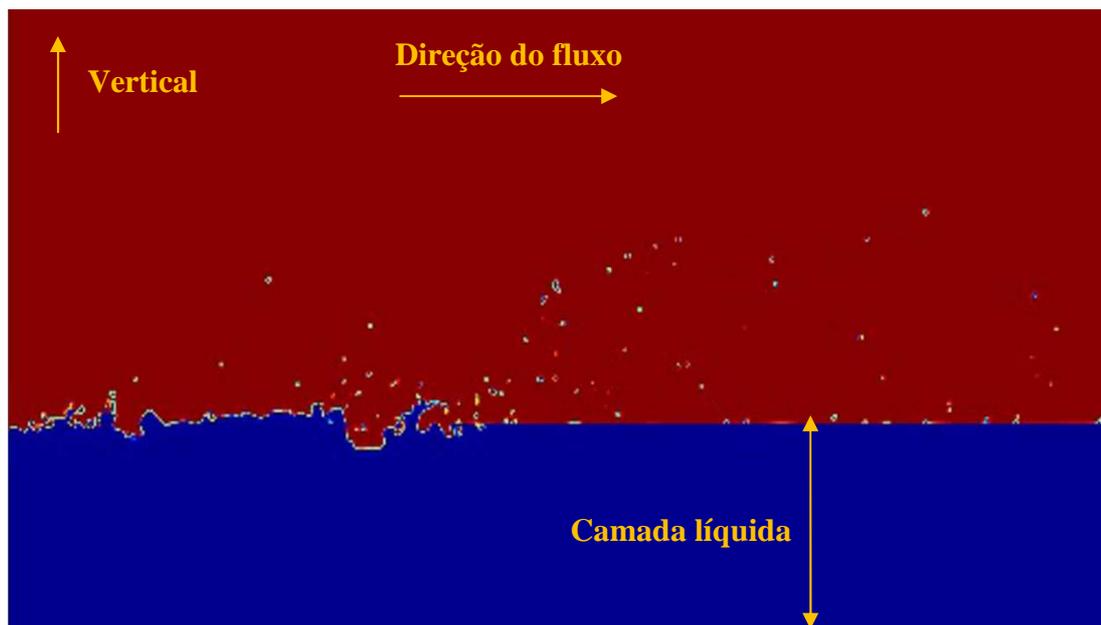


Figura 3.1.7.2: Aumento da área destacada da figura 3.1.7.1 (obtido com *Gerris Flow Solver* [6])

3.2) Medição dos diâmetros das gotículas com o programa *ImageJ*

Os resultados das simulações do fenômeno de *entrainment* feitas com o programa *Gerris Flow Solver* foram vídeos que mostram a evolução dos domínios de simulação ao longo do tempo. Dessa forma, a medição dos diâmetros das gotículas pode ser feita com um programa de processamento de imagens. O programa escolhido para esse fim foi o *software* livre *ImageJ*.

Para atingir os objetivos deste projeto, o programa *ImageJ* foi utilizado para medir, nas imagens obtidas das simulações feitas com o programa *Gerris Flow Solver*, o comprimento da região correspondente a uma gotícula despreendida da camada líquida de combustível. Admitindo que as gotículas apresentam uma forma razoavelmente circular nas imagens, pode-se aproximar o diâmetro das gotículas a esse comprimento medido. Na figura 3.2.1 é apresentada uma ilustração de uma medição do diâmetro de uma gotícula sendo feita com o programa *ImageJ*. A linha amarela dividindo a gotícula ao meio representa o

comprimento medido com o programa *ImageJ*. É importante notar que um aumento exagerado da imagem foi utilizado para facilitar a visualização neste relatório.

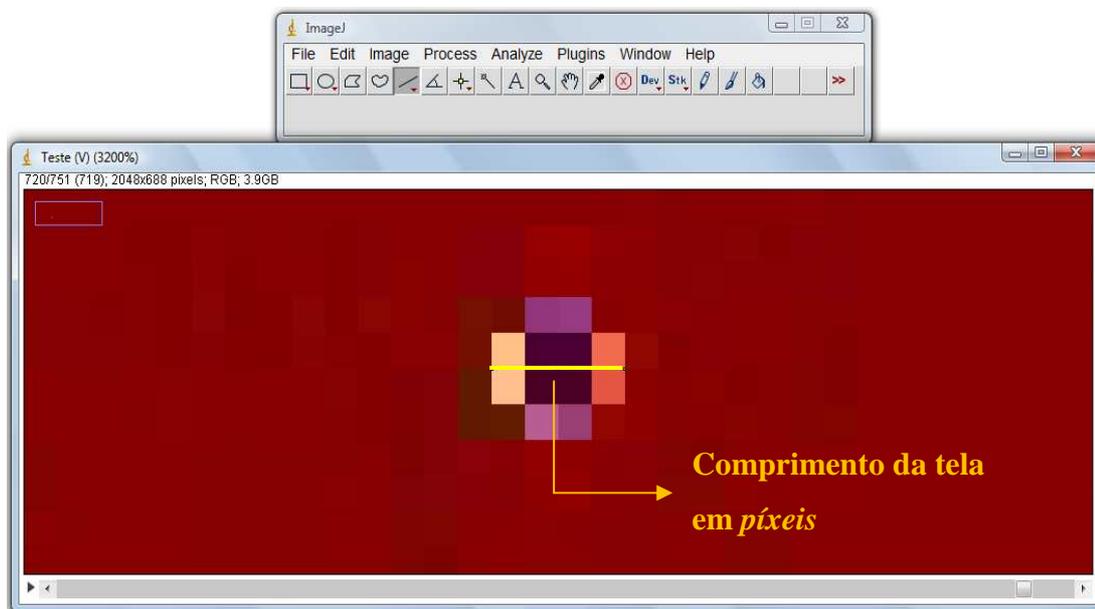


Figura 3.2.1: Ilustração da medição do diâmetro de uma gotícula com o programa *ImageJ* (obtido com *ImageJ* [8])

Dessa forma, a medição do diâmetro das gotículas não passa de uma medição de um comprimento da tela do computador. Portanto, os resultados obtidos são dados em píxeis, e estes devem ser convertidos para o Sistema Internacional de Unidades. Isso foi feito medindo um comprimento das imagens cujo valor é conhecido no Sistema Internacional de Unidades. Para isso, foi utilizado a espessura da camada líquida pois esse valor é um dos parâmetros da simulação e, portanto, é fornecido pelo usuário do código.

O programa *ImageJ* é um *software* de processamento de imagens e, portanto, os vídeos obtidos das simulações feitas com o código desenvolvido na seção 3.1 devem ser fragmentados em imagens para que o programa *ImageJ* possa ser utilizado. Essa fragmentação dos vídeos foi feita com o *software* livre *VirtualDub* de processamento de vídeos. Os fragmentos dos vídeos foram, então, empilhados no programa *ImageJ* formando uma sequência de imagens. Dessa forma, para cada simulação feita, todos os diâmetros medidos são colocados no mesmo arquivo automaticamente pelo próprio *software*.

4) RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste projeto e são feitas as análises relativas a esses resultados. Inicialmente são descritos os casos que foram simulados com o código desenvolvido e é apresentado o procedimento utilizado na análise estatística dos valores medidos para os diâmetros das gotículas formadas nessas simulações. Em seguida, são apresentados os resultados e análises relativos aos efeitos da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, e do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

4.1) Descrição dos casos

O objetivo principal deste projeto é analisar os efeitos da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, e do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante nos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em motores de tipo híbrido.

Para fazer isso, foram feitas simulações do código desenvolvido com três perfis diferentes de velocidade do fluxo gasoso de oxidante e cinco valores diferentes para os outros parâmetros. Na tabela 4.1.1 são apresentados os valores dos parâmetros utilizados em cada um dos casos analisados, além do número de gotículas medidas em cada simulação e do tempo final utilizado para cada caso. É importante notar que a velocidade apresentada na tabela 4.1.1 é adimensional pois representa a relação entre as velocidades real e de referência do fluxo gasoso de oxidante.

Tabela 4.1.1: Valores dos parâmetros utilizados em cada caso

Caso	Viscosidade ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Espessura (mm)	Velocidade	Perfil de velocidade	Número de gotículas	Tempo de simulação (s)
Padrão	650	1,00	15,0	Parabólica	85	3,75
V1	300	1,00	15,0	Parabólica	73	2,60
V2	470	1,00	15,0	Parabólica	65	3,25
V3	770	1,00	15,0	Parabólica	76	3,75
V4	870	1,00	15,0	Parabólica	47	3,15
H1	650	0,66	15,0	Parabólica	63	3,40
H2	650	0,77	15,0	Parabólica	84	3,75
H3	650	1,12	15,0	Parabólica	40	3,25
H4	650	1,22	15,0	Parabólica	65	3,30
U1	650	1,00	12,4	Parabólica	40	4,10
U2	650	1,00	13,5	Parabólica	81	3,20
U3	650	1,00	16,2	Parabólica	73	3,45
U4	650	1,00	18,0	Parabólica	77	2,10
L	650	1,00	15,0	Linear	44	4,85
DR	650	1,00	15,0	Duas seções lineares	93	2,45

4.2) Descrição da análise estatística

A medição dos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* nas simulações foi feita com um programa de processamento de imagens. Por esse motivo, como foi explicado no capítulo 3, este *software* fornece os valores dessas medições em píxeis, e estes devem ser convertidos para o Sistema Internacional de Unidades. Isso foi feito utilizando a espessura da camada líquida de combustível como referência pois este parâmetro é um dado fornecido pelo usuário do código.

Dessa forma, foram obtidos os valores dos diâmetros medidos em microns, o que possibilitou iniciar a análise estatística dos dados obtidos. O primeiro passo desta análise foi a construção dos histogramas dos diâmetros das gotículas para cada simulação. Isso foi feito para conhecer o comportamento da distribuição desses diâmetros para cada caso analisado.

O segundo passo da análise estatística foi o cálculo do diâmetro médio das gotículas e do intervalo de confiança para cada simulação. O diâmetro médio foi calculado utilizando uma média aritmética. Por sua vez, o intervalo de confiança foi obtido multiplicando o desvio padrão da média pelo valor da distribuição t de Student com 95% de probabilidade.

Com os valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança, foi possível construir os gráficos que representam a variação do diâmetro das gotículas em função da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, e do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante. Além disso, foi traçada a linha de tendência dos pontos dos gráficos para melhor observar o comportamento dos diâmetros das gotículas em função dos parâmetros elencados anteriormente.

Com essa análise estatística, foi possível fazer a análise das simulações feitas e, assim, tirar as conclusões possíveis a respeito do efeito dos parâmetros no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*.

4.3) Efeito da viscosidade do combustível

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise do efeito da viscosidade do combustível no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*. Nesta análise foram considerados os casos padrão, V1, V2, V3, e V4.

Os histogramas dos diâmetros das gotículas obtidos para os casos mencionados anteriormente são apresentados no apêndice B. Observa-se que os histogramas obtidos lembram uma distribuição de probabilidade normal, sendo que os histogramas dos casos onde foi medido um número maior de gotículas se aproximam mais a este tipo de distribuição. Isto confirma o Teorema do Limite Central que diz que a distribuição de uma amostra tende a uma distribuição normal com o aumento da própria amostra. Como resultado disso, as medições feitas para obter os diâmetros das gotículas são válidas.

Os diâmetros médios e os intervalos de confiança obtidos para os casos analisados são apresentados na tabela 4.3.1. A representação gráfica desses valores é apresentada na figura 4.3.1.

Tabela 4.3.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da viscosidade do combustível

Caso	Diâmetro médio (μm)	Intervalo de confiança (μm)
Padrão	4,528	+/- 0,337
V1	4,777	+/- 0,366
V2	4,757	+/- 0,411
V3	4,477	+/- 0,332
V4	4,407	+/- 0,392

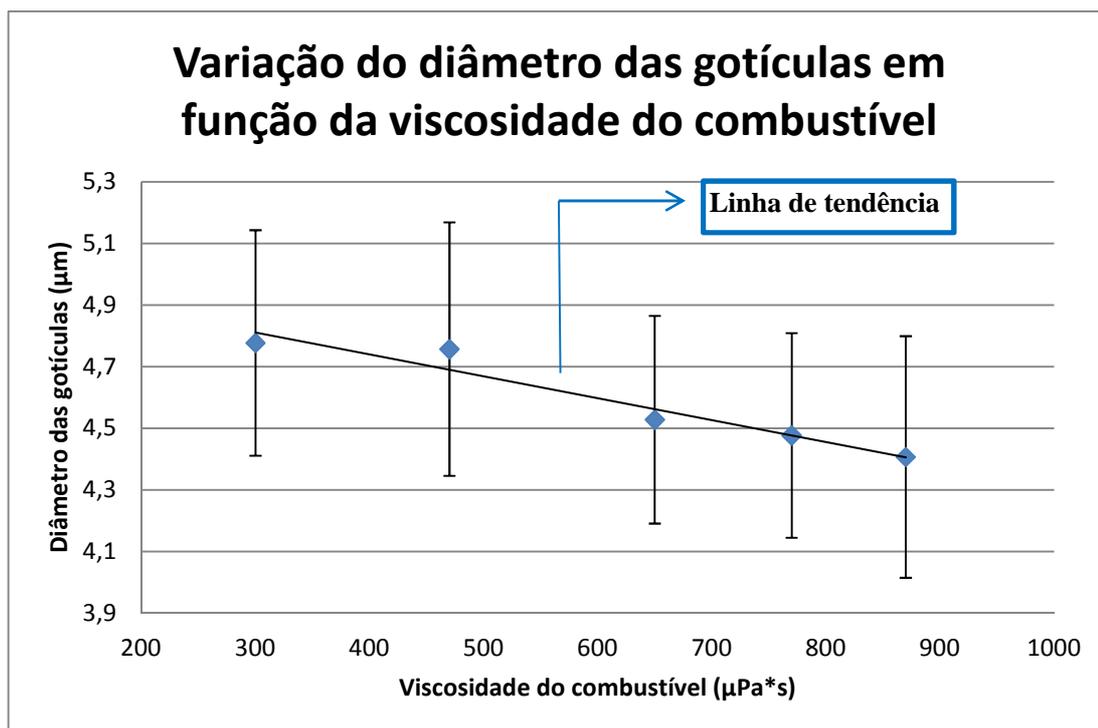


Figura 4.3.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da viscosidade do combustível

Pode-se observar na figura 4.3.1 que o diâmetro médio das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* tende a diminuir com o aumento da viscosidade do combustível. Esta representa a resistência do combustível ao fluxo de

oxidante gasoso. Portanto, a resistência das gotículas ao desprendimento é menor quando a viscosidade é menor.

Por outro lado, as gotículas de diâmetro maior possuem uma resistência maior ao desprendimento pois estas têm uma superfície de contato maior com a camada líquida de combustível. Dessa forma, a diminuição da resistência das gotículas ao desprendimento pelo efeito da diminuição da viscosidade do combustível faz com que as gotículas de diâmetro maior se desprendam com mais facilidade, aumentando o diâmetro médio das gotículas formadas. Portanto, o comportamento observado na figura 4.3.1 é correto.

Além disso, a diminuição do diâmetro das gotículas devido ao aumento da viscosidade do combustível ocorre de forma linear, como sugere a linha de tendência da figura 4.3.1. A equação desta linha de tendência é dada a seguir junto com o seu coeficiente de correlação:

$$D = -0,0007 * \mu + 5,0238 \quad (4.3.1)$$

$$R^2 = 0,9398 \quad (4.3.2)$$

onde D é o diâmetro médio das gotículas (μm), μ é a viscosidade do combustível ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$) e R^2 é o coeficiente de correlação.

O fato do coeficiente de correlação ser superior a 0,9 prova que a representação da diminuição do diâmetro das gotículas devido ao aumento da viscosidade do combustível com um modelo linear é uma boa aproximação.

4.4) Efeito da espessura da camada líquida de combustível

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise do efeito da espessura da camada líquida de combustível no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*. Nesta análise foram considerados os casos padrão, H1, H2, H3, e H4.

Os histogramas dos diâmetros das gotículas obtidos para os casos mencionados anteriormente são apresentados no apêndice B. Assim como na seção

4.3, observa-se que os histogramas obtidos lembram uma distribuição de probabilidade normal, sendo que os histogramas dos casos onde foi medido um número maior de gotículas se aproximam mais a este tipo de distribuição. Isto confirma o Teorema do Limite Central que diz que a distribuição de uma amostra tende a uma distribuição normal com o aumento da própria amostra. Como resultado disso, as medições feitas para obter os diâmetros das gotículas são válidas.

Os diâmetros médios e os intervalos de confiança obtidos para os casos analisados são apresentados na tabela 4.4.1. A representação gráfica desses valores é apresentada na figura 4.4.1.

Tabela 4.4.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da espessura da camada líquida de combustível

Caso	Diâmetro médio (μm)	Intervalo de confiança (μm)
Padrão	4,528	+/- 0,337
H1	4,217	+/- 0,373
H2	4,130	+/- 0,306
H3	4,666	+/- 0,391
H4	4,252	+/- 0,345

Pode-se observar na figura 4.4.1 que o diâmetro médio das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* tende a aumentar com o aumento da espessura da camada líquida de combustível. Este comportamento é explicado pela seguinte expressão retirada de [3] que fornece o equilíbrio da força de cisalhamento na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante:

$$c_f * P_d = \mu_l \frac{u_l}{h} \quad (4.4.1)$$

onde c_f é o coeficiente de fricção, P_d é a pressão dinâmica do fluxo gasoso (Pa), μ_l é a viscosidade do combustível líquido (mPa*s), u_l é a velocidade do combustível líquido na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante (m/s), e h é a espessura da camada líquida de combustível (mm).

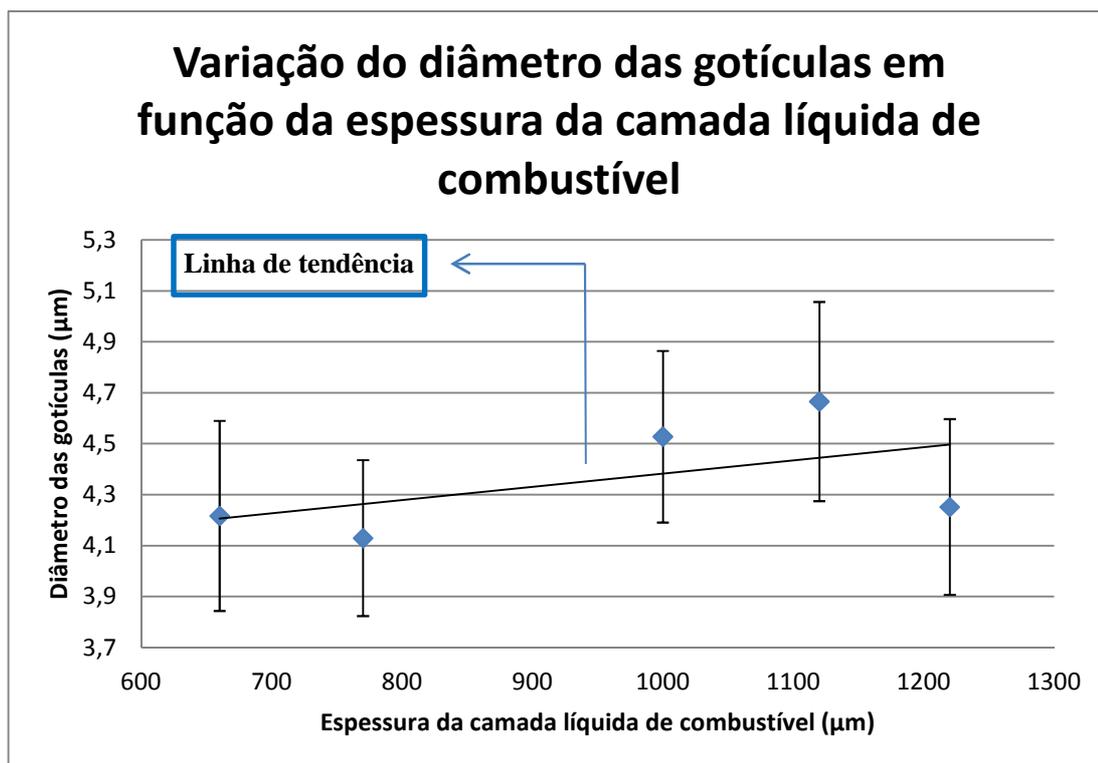


Figura 4.4.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da espessura da camada líquida de combustível

O aumento da espessura da camada líquida de combustível faz com que o termo a direita da igualdade na expressão 4.4.1 se reduza, o que significa que a força de cisalhamento na interface é menor. Em outras palavras, o aumento da espessura da camada líquida de combustível reduz a resistência do combustível ao fluxo de oxidante gasoso. Portanto, a resistência das gotículas ao desprendimento é menor quando a espessura da camada líquida de combustível é maior.

Desse ponto em diante, a análise é idêntica àquela feita na seção 4.3 para a viscosidade do combustível líquido. As gotículas de diâmetro maior possuem uma resistência maior ao desprendimento pois estas têm uma superfície de contato maior com a camada líquida de combustível. Dessa forma, a diminuição da resistência das gotículas ao desprendimento pelo efeito do aumento da espessura da camada líquida de combustível faz com que as gotículas de diâmetro maior se desprendam com mais facilidade, aumentando o diâmetro médio das gotículas formadas. Portanto, o comportamento observado na figura 4.4.1 é correto.

A equação da linha de tendência apresentada na figura 4.4.1 e o seu coeficiente de correlação são dados a seguir:

$$D = 0,005 * h + 3,8652 \quad (4.4.2)$$

$$R^2 = 0,2854 \quad (4.4.3)$$

onde D é o diâmetro médio das gotículas (μm), h é a espessura da camada líquida de combustível (μm) e R^2 é o coeficiente de correlação.

Pode-se observar que o coeficiente de correlação é muito inferior a 0,9, o que significa que representar a variação do diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em função da espessura da camada líquida de combustível com um modelo linear não é uma boa aproximação. Mesmo assim, este modelo serve para ilustrar de maneira clara que o diâmetro das gotículas aumenta com o aumento da espessura da camada líquida de combustível.

4.5) Efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise do efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*. Nesta análise foram considerados os casos padrão, U1, U2, U3, e U4.

Os histogramas dos diâmetros das gotículas obtidos para os casos mencionados anteriormente são apresentados no apêndice B. Assim como nas seções 4.3 e 4.4, observa-se que os histogramas obtidos lembram uma distribuição de probabilidade normal, sendo que os histogramas dos casos onde foi medido um número maior de gotículas se aproximam mais a este tipo de distribuição. Isto confirma o Teorema do Limite Central que diz que a distribuição de uma amostra tende a uma distribuição normal com o aumento da própria amostra. Como resultado disso, as medições feitas para obter os diâmetros das gotículas são válidas.

Os diâmetros médios e os intervalos de confiança obtidos para os casos analisados são apresentados na tabela 4.5.1. A representação gráfica desses valores é apresentada na figura 4.5.1.

Tabela 4.5.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante

Caso	Diâmetro médio (μm)	Intervalo de confiança (μm)
Padrão	4,528	+/- 0,337
U1	4,779	+/- 0,412
U2	4,817	+/- 0,342
U3	4,292	+/- 0,321
U4	4,604	+/- 0,310

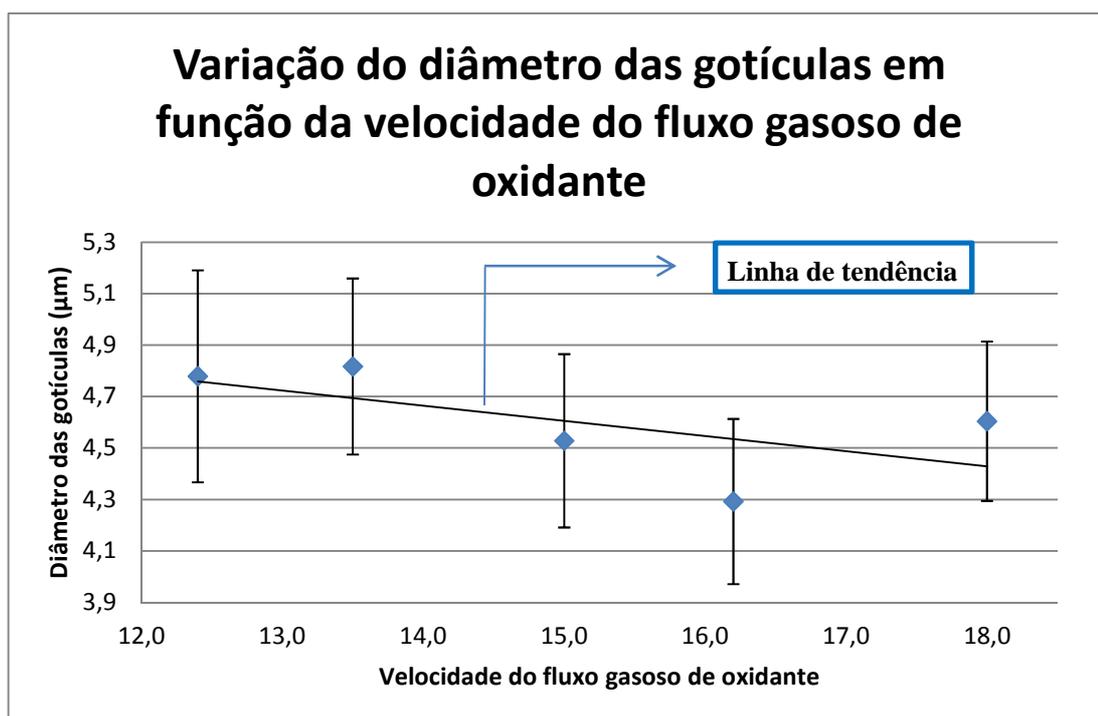


Figura 4.5.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante

Pode-se observar na figura 4.5.1 que o diâmetro médio das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* tende a diminuir com o aumento da

velocidade do fluxo gasoso de oxidante. Este comportamento é explicado pelo uso em conjunto da expressão 4.5.1 retirada de [3] que fornece o equilíbrio da força de cisalhamento na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante, da expressão 4.5.2 que representa a definição de pressão dinâmica, e da expressão 4.5.3 que representa a definição da velocidade adimensional utilizada na figura 4.5.1:

$$c_f * P_d = \mu_l \frac{u_l}{h} \quad (4.5.1)$$

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho_g * u_g^2 \quad (4.5.2)$$

$$u = \frac{u_g}{u_{ref}} \quad (4.5.3)$$

onde c_f é o coeficiente de fricção, P_d é a pressão dinâmica do fluxo gasoso (Pa), μ_l é viscosidade do combustível líquido (mPa*s), u_l é a velocidade do combustível líquido na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante (m/s), h é a espessura da camada líquida de combustível (mm), ρ_g é a densidade do oxidante gasoso (kg/m³), u_g é a velocidade real do fluxo gasoso de oxidante (m/s), u é a velocidade adimensional do fluxo gasoso de oxidante, e u_{ref} é a velocidade de referência do fluxo gasoso de oxidante (m/s).

Como foi explicado no capítulo 3, o programa *Gerris Flow Solver* trabalha com variáveis adimensionais. Por esse motivo, foi analisado o efeito da velocidade adimensional do fluxo gasoso de oxidante, cuja definição é dada na equação 4.5.3, nos diâmetros das gotículas formadas pelo efeito de *entrainment*.

O aumento da velocidade adimensional do fluxo gasoso de oxidante corresponde a um aumento da velocidade real do fluxo gasoso de oxidante pois a velocidade de referência é constante. Dessa forma, o aumento da velocidade adimensional causa um aumento da pressão dinâmica do fluxo gasoso, que por sua vez faz com que o termo a esquerda da igualdade na expressão 4.5.1 aumente, o que significa que a força de cisalhamento na interface é maior. Em outras palavras, o aumento da velocidade do fluxo gasoso de oxidante aumenta a resistência do combustível ao fluxo de oxidante gasoso. Portanto, a resistência das gotículas ao desprendimento é menor quando a velocidade do fluxo gasoso de oxidante é menor.

Desse ponto em diante, a análise é idêntica àquela feita nas seções 4.3 e 4.4 para a viscosidade do combustível líquido e para a espessura da camada líquida de combustível. As gotículas de diâmetro maior possuem uma resistência maior ao desprendimento pois estas têm uma superfície de contato maior com a camada líquida de combustível. Dessa forma, a diminuição da resistência das gotículas ao desprendimento pelo efeito da diminuição da velocidade do fluxo gasoso de oxidante faz com que as gotículas de diâmetro maior se desprendam com mais facilidade, aumentando o diâmetro médio das gotículas formadas. Portanto, o comportamento observado na figura 4.5.1 é correto.

A equação da linha de tendência apresentada na figura 4.5.1 e o seu coeficiente de correlação são dados a seguir:

$$D = -0,0591 * u + 5,4913 \quad (4.5.4)$$

$$R^2 = 0,3789 \quad (4.5.5)$$

onde D é o diâmetro médio das gotículas (μm), u é a velocidade adimensional do fluxo de oxidante gasoso e R^2 é o coeficiente de correlação.

Pode-se observar que o coeficiente de correlação é muito inferior a 0,9, o que significa que representar a variação do diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em função da velocidade do fluxo gasoso de oxidante com um modelo linear não é uma boa aproximação. Mesmo assim, este modelo serve para ilustrar de maneira clara que o diâmetro das gotículas diminui com o aumento da velocidade do fluxo de oxidante gasoso.

4.6) Efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise do efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*. Nesta análise foram considerados os casos padrão, L e DR.

Os histogramas dos diâmetros das gotículas obtidos para os casos mencionados anteriormente são apresentados no apêndice B. Assim como nas seções 4.3, 4.4 e 4.5, observa-se que os histogramas obtidos lembram uma distribuição de probabilidade normal, sendo que os histogramas dos casos onde foi medido um número maior de gotículas se aproximam mais a este tipo de distribuição. Isto confirma o Teorema do Limite Central que diz que a distribuição de uma amostra tende a uma distribuição normal com o aumento da própria amostra. Como resultado disso, as medições feitas para obter os diâmetros das gotículas são válidas.

Os diâmetros médios e os intervalos de confiança obtidos para os casos analisados são apresentados na tabela 4.6.1. A representação gráfica desses valores é apresentada na figura 4.6.1.

Tabela 4.6.1: Valores dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante

Caso	Diâmetro médio (μm)	Intervalo de confiança (μm)
Padrão	4,528	+/- 0,337
L	4,797	+/- 0,493
DR	5,210	+/- 0,346

Pode-se observar na figura 4.6.1 que o diâmetro médio das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* se altera bastante para os três perfis de velocidade do fluxo gasoso de oxidante considerados.

Considerando o oxidante gasoso como um fluido newtoniano, a tensão de cisalhamento na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo de oxidante gasoso é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_{interface} = \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \quad \text{para } y = 0 \quad (4.6.1)$$

onde $\tau_{interface}$ é a tensão de cisalhamento na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante (Pa), μ_g é a viscosidade do oxidante gasoso (Pa*s), u_g é a velocidade do fluxo gasoso de oxidante (m/s), e y é a posição na direção normal à superfície da camada líquida de combustível (m).

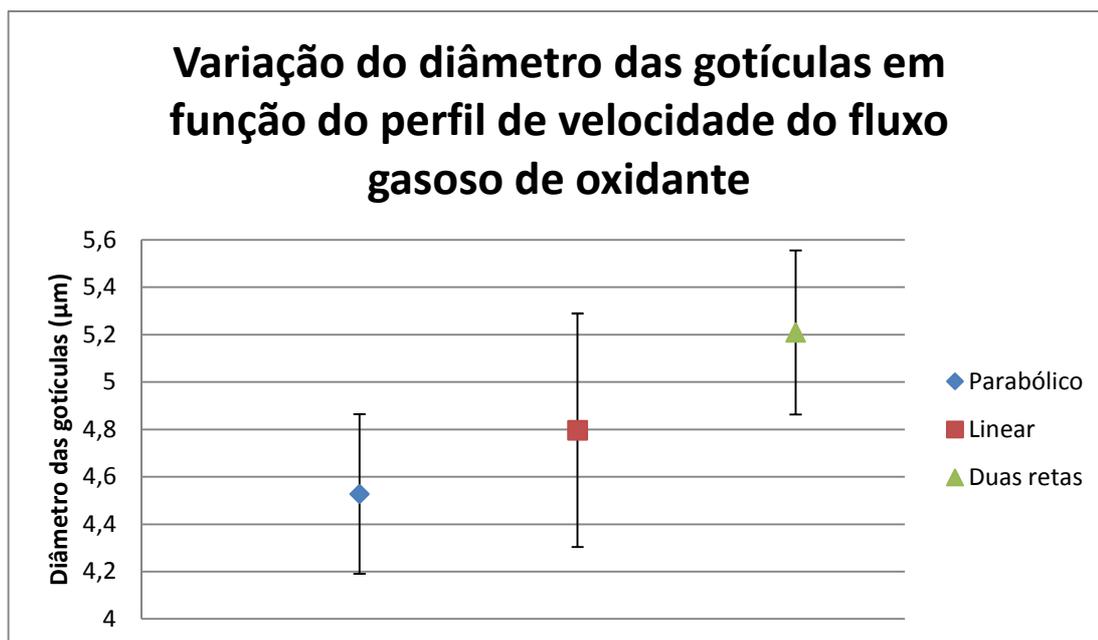


Figura 4.6.1: Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante

Para cada um dos perfis considerados, a derivada presente na equação 4.6.1 calculada na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo de oxidante gasoso é diferente. Dessa forma, a tensão de cisalhamento na interface também é diversa para os três perfis. Portanto, a resistência das gotículas ao desprendimento depende também do perfil de velocidade do fluxo de oxidante gasoso.

As gotículas de diâmetro maior possuem uma resistência maior ao desprendimento pois estas têm uma superfície de contato maior com a camada líquida de combustível. Portanto, a variação da resistência das gotículas ao desprendimento causada pela mudança do perfil de velocidade do fluxo gasoso provoca uma variação do diâmetro médio das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*.

5) CONCLUSÕES

Este projeto teve como objetivo analisar os efeitos da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, e do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante nos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em um motor de tipo híbrido. Os dados necessários para fazer essa análise foram obtidos através de simulações numéricas do fenômeno de *entrainment* que foram feitas com o programa *Gerris Flow Solver*.

O início do projeto consistiu no estudo do material disponível na literatura a respeito do fenômeno de *entrainment* na propulsão híbrida. Além disso, também foi necessário estudar o funcionamento do *software* escolhido para fazer as simulações numéricas do fenômeno de *entrainment*.

Com os conhecimentos adquiridos a respeito do fenômeno de *entrainment* e a respeito do programa *Gerris Flow Solver* foi possível criar um código capaz de representar o fenômeno no *software*. Dessa forma, foram obtidos os dados necessários a respeito dos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*, o que possibilitou fazer a análise definida como objetivo deste projeto.

Como resultado da análise dos dados, verificou-se que o diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* tende a diminuir com o aumento da viscosidade do combustível e com o aumento da velocidade do fluxo gasoso de oxidante, e tende a aumentar com o aumento da espessura da camada líquida de combustível. Observou-se também que o diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* varia para diferentes perfis de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

Além disso, foi possível concluir que a diminuição do diâmetro das gotículas provocada pelo aumento da viscosidade do combustível segue um modelo linear. Contudo, não foi possível encontrar modelos que representassem satisfatoriamente o aumento do diâmetro das gotículas provocado pelo aumento da espessura da camada líquida de combustível e a diminuição do diâmetro das gotículas causada pelo aumento da velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

Como desenvolvimentos futuros a este projeto sugere-se a validação através de provas experimentais dos efeitos da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo gasoso de oxidante e do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante nos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*. Também é sugerida a análise de casos diferentes daqueles considerados neste projeto para verificar se os resultados encontrados podem ser estendidos para uma faixa maior de condições de funcionamento. E, por fim, sugere-se que sejam desenvolvidos modelos que representem com precisão os efeitos nos diâmetros das gotículas dos parâmetros considerados neste projeto.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- [1] DE LUCA, Luigi T. Endoreattori a Propellente Ibrido. In: _____. **Problemi Energetici in Propulsione Aerospaziale**: Appunti per Studenti. [S.I]: [s.n.], [ca. 1998]. Cap. 12, Paginação irregular.
- [2] FRANCHI, Filippo. **Studio della Stabilità del Film Liquido in Combustibili Paraffinici per Applicazioni Propulsive Aerospaziali**. Milão: Politecnico di Milano, 2009. 117 p. Tese (Laurea Specialistica), Ingegneria Aeronautica, Milão, 2009.
- [3] KARABEYOGLU, M. A.; ALTMAN, D.; CANTWELL, B. J. Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory. **Journal of Propulsion and Power**, [S.I.], v. 18, n. 3, p. 610-620, maio/junho 2002.
- [4] KARABEYOGLU, M. A; CANTWELL, B. J. Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 2, Stability of Liquid Films. **Journal of Propulsion and Power**, [S.I.], v. 18, n. 3, p. 621-630, maio/junho 2002.
- [5] POPINET, Stéphane. **Gerris_logo.png**. Disponível em: <http://gfs.sourceforge.net/wiki/images/4/40/Gerris_logo.png>. Acesso em: 23 set. 2011.
- [6] POPINET, Stéphane. **Gerris Flow Solver**. Disponível em: <http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page>. Acesso em: 23 set. 2011.
- [7] POPINET, Stéphane. **Atomisation.gfs**. Disponível em: <<http://gfs.sourceforge.net/examples/examples/atomisation/atomisation.gfs>>. Acesso em: 23 set. 2011.
- [8] NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. **ImageJ**. Disponível em: <<http://rsbweb.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 02 dez. 2011.

- [9] POPINET, Stéphane. **Tutorial.pdf**. Disponível em: <<http://gfs.sourceforge.net/tutorial/tutorial.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2011.
- [10] POPINET, Stéphane. **Gerris Examples**. Disponível em: <<http://gfs.sourceforge.net/examples/examples/>>. Acesso em: 23 set. 2011.
- [11] POPINET, Stéphane. **Gerris FAQ**. Disponível em: <<http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/FAQ>>. Acesso em: 23 set. 2011.
- [12] POPINET, Stéphane. **Gerris Object Hierarchy**. Disponível em: <http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/Object_hierarchy>. Acesso em: 23 set. 2011.

APÊNDICE A

Neste apêndice é apresentado o código completo desenvolvido neste projeto para simular o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver*. O código é apresentado em negrito e algumas explicações a respeito deste são apresentadas em itálico.

Definição do domínio de simulação através do número de quadrados e número de ligações entre eles

8 7 GfsSimulation GfsBox GfsGEdge {} {

Definição das variáveis da simulação

Global {

Definição do diâmetro da seção de passagem do fluxo gasoso

#define R 3.0

Definição da espessura da camada líquida de combustível

#define h 1.0

Definição da densidade do ar

#define rho_air 1.225

Definição da densidade da parafina

#define rho_wax 654.4

Definição da relação entre as densidades

#define rho(T3) (T3*rho_air + (1.0 - T3)*rho_wax)

Definição da viscosidade do ar

#define mu_air 0.0000178

Definição da viscosidade da parafina

#define mu_wax 0.00065

Definição da relação entre as viscosidades

#define mu(T3) (T3*mu_air + (1.0 - T3)*mu_wax)

Definição da tensão superficial da parafina líquida

#define surface_tension 0.0071

Definição da velocidade do fluxo gasoso no centro da seção de passagem

#define Ug 15.0

Definição da velocidade do fluxo gasoso na interface entre as duas fases

#define Ugl 0.01*Ug

Definição da velocidade do fluxo líquido na interface entre as duas fases

#define Ulg 0.01*Ugl

Definição dos parâmetros que determinam o perfil de velocidade do fluxo gasoso

#define ag (-4*Ug/(R*R) + 4*Ugl/(R*R))

#define bg (8*Ug/R - 8*Ugl/R)

#define cg (-3*Ug + 4*Ugl)

Definição dos parâmetros que determinam o perfil de velocidade do fluxo líquido

#define al (Ulg/h)

#define bl (-Ulg*R/(2*h) + Ulg)

}

Definição do lado dos quadrados que formam o domínio de simulação

PhysicalParams { L = R }

Definição do tempo final de simulação

Time { end = 3.75 }

Definição do refinamento inicial

Refine 6

Definição das condições iniciais de velocidade

Init { start = 0 } {

U = (y > (R/2) ? (ag*y*y + bg*y + cg) : (al*y + bl))

V = 0

}

Definição da posição do sólido retangular

Solid (y - R/2 + h)

Implementação do combustível como um rastreador

VariableTracerVOF T3

Definição da condição inicial de separação entre o combustível e o oxidante

InitFraction T3 (y - R/2)

Implementação de um refinamento adaptativo na interface entre as duas fases

AdaptFunction { istep = 1 } { maxlevel = 9 } (T3 > 0 && T3 < 1)

Definição da curvatura média da curva de separação entre o combustível e o oxidante

VariableCurvature K3 T3

Implementação da tensão superficial

SourceTension T3 surface_tension K3

Implementação das viscosidades

SourceViscosity mu(T3)

Implementação das densidades

PhysicalParams { alpha = 1.0/rho(T3) }

Exibição do tempo de simulação a cada passo

OutputTime { istep = 1 } stdout

Definição da resposta como um vídeo formado pelas imagens do domínio de simulação obtidas a cada 0,005 segundos

OutputPPM { step = 0.005 } { ppm2mpeg > T3.mpg } { v = T3 }

}

Definição das condições de contorno para cada quadrado que forma o domínio de simulação

GfsBox {

left = Boundary {
BcDirichlet U (al*y + bl)
BcDirichlet V 0

}

bottom = Boundary {
BcDirichlet U 0
BcDirichlet V 0

}

}

GfsBox {

left = Boundary {
BcDirichlet U (ag*y*y + bg*y + cg)
BcDirichlet V 0

}

top = Boundary {
BcDirichlet U 0
BcDirichlet V 0

}

}

```

GfsBox {
    bottom = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}
GfsBox {
    top = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}
GfsBox {
    bottom = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}
GfsBox {
    top = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}
GfsBox {
    right = BoundaryOutflow
    bottom = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}
GfsBox {
    right = BoundaryOutflow
    top = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}

```

Definição da posição dos quadrados que formam o domínio de simulação

```

1 2 top
1 3 right
2 4 right
3 5 right
4 6 right
5 7 right
6 8 right

```

APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentados os histogramas obtidos na análise estatística dos diâmetros medidos das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* nas simulações feitas.

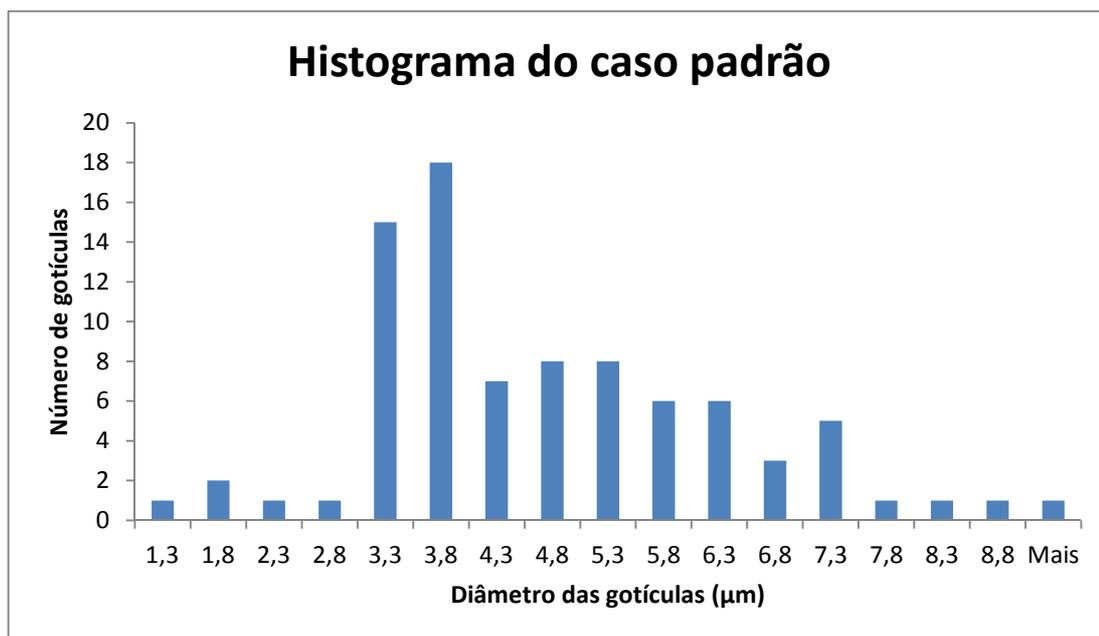


Figura B.1: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso padrão

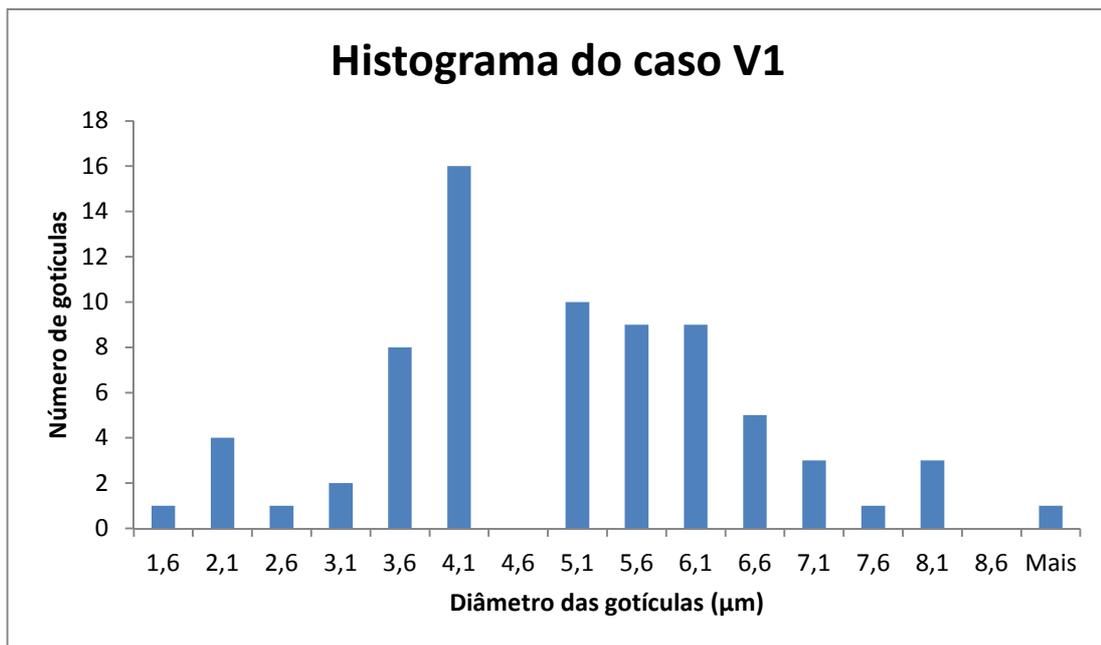


Figura B.2: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V1

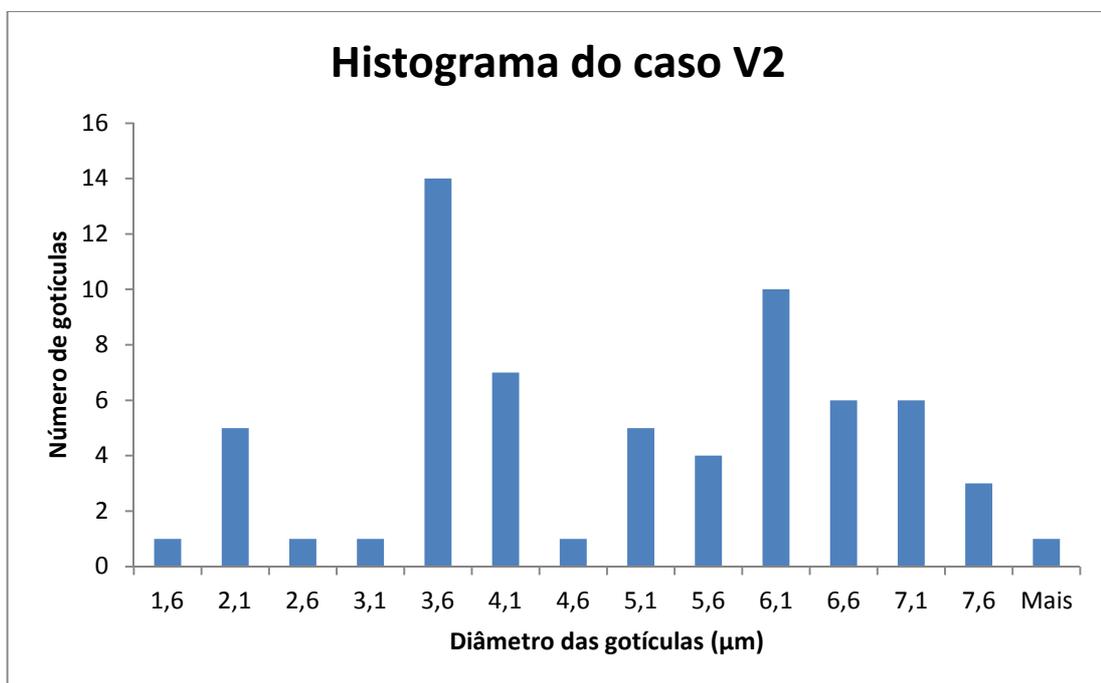


Figura B.3: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V2

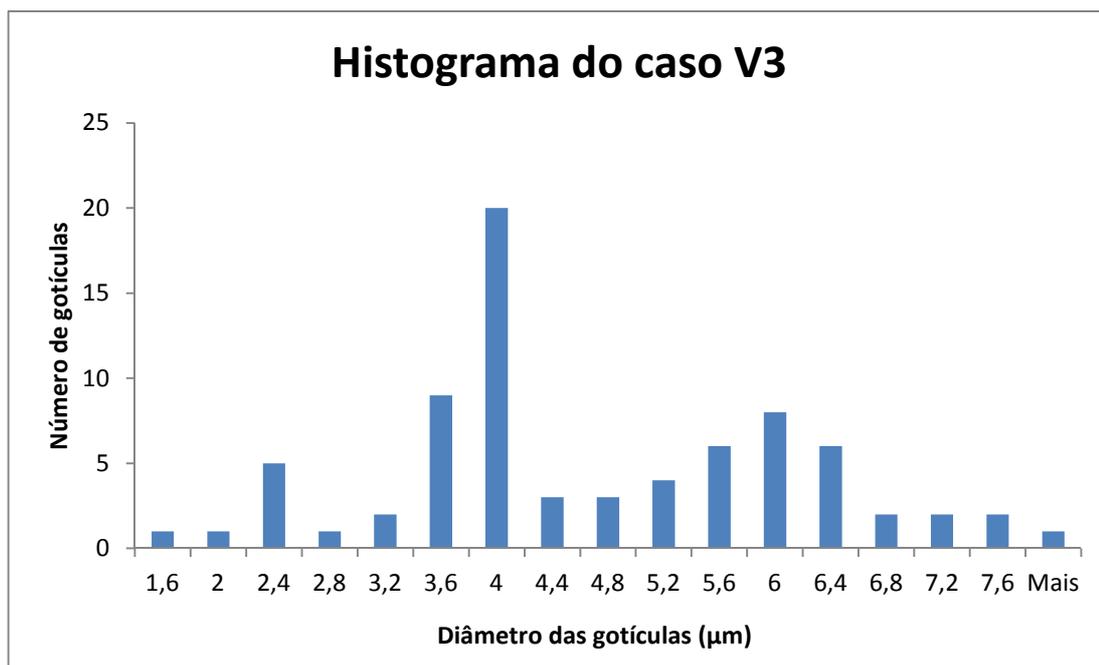


Figura B.4: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V3

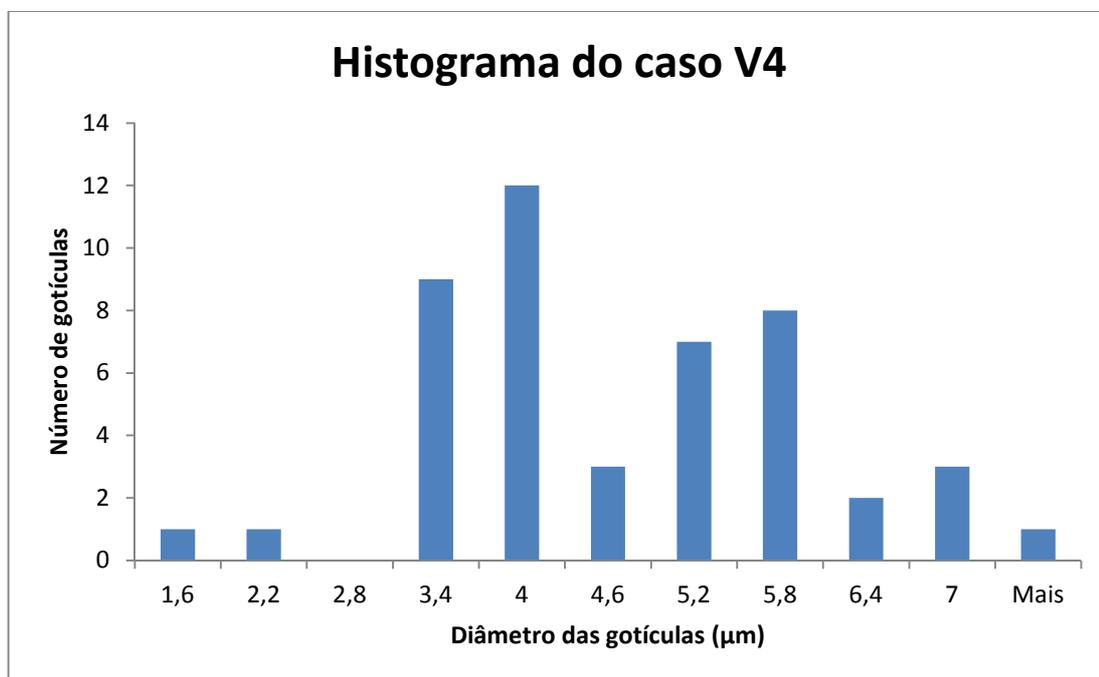


Figura B.5: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso V4

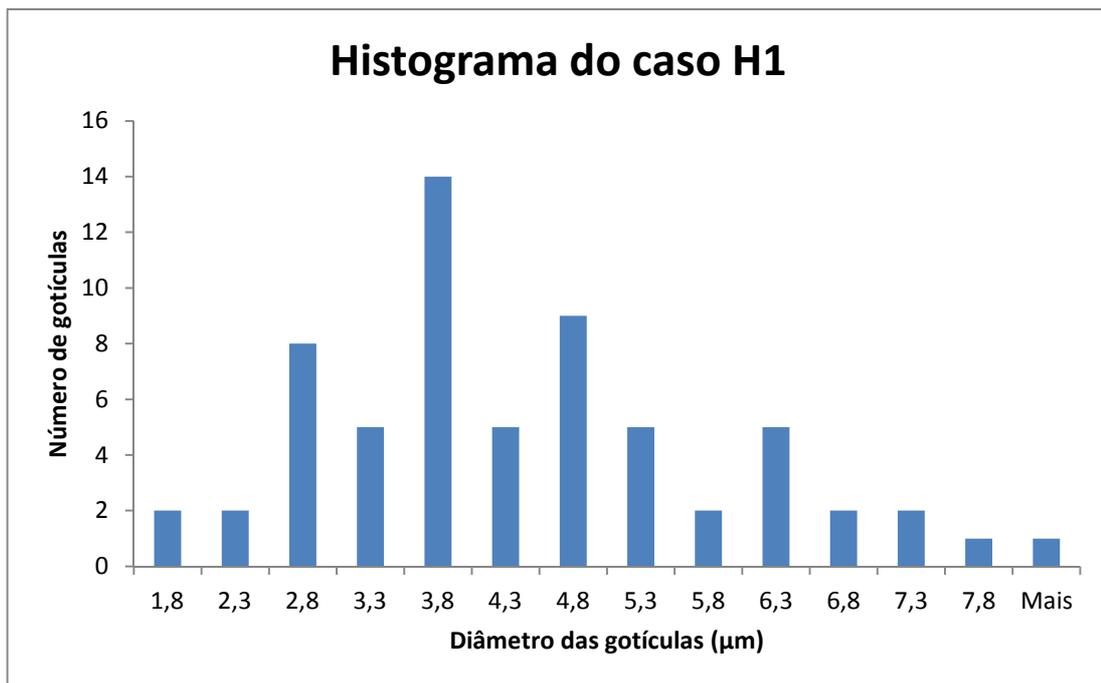


Figura B.6: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H1

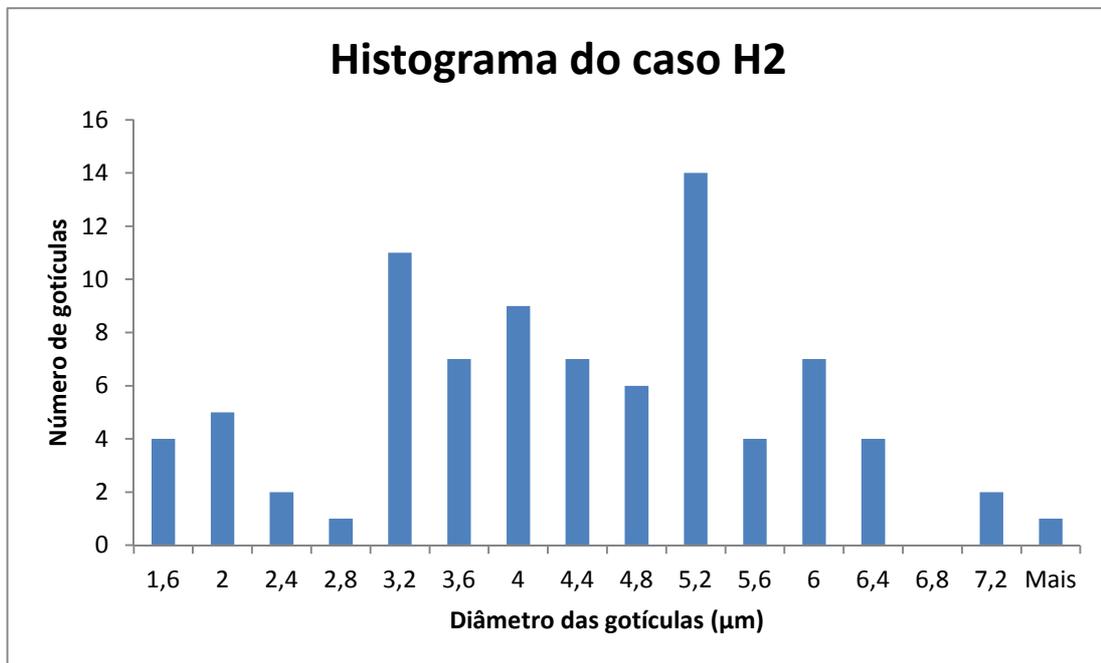


Figura B.7: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H2

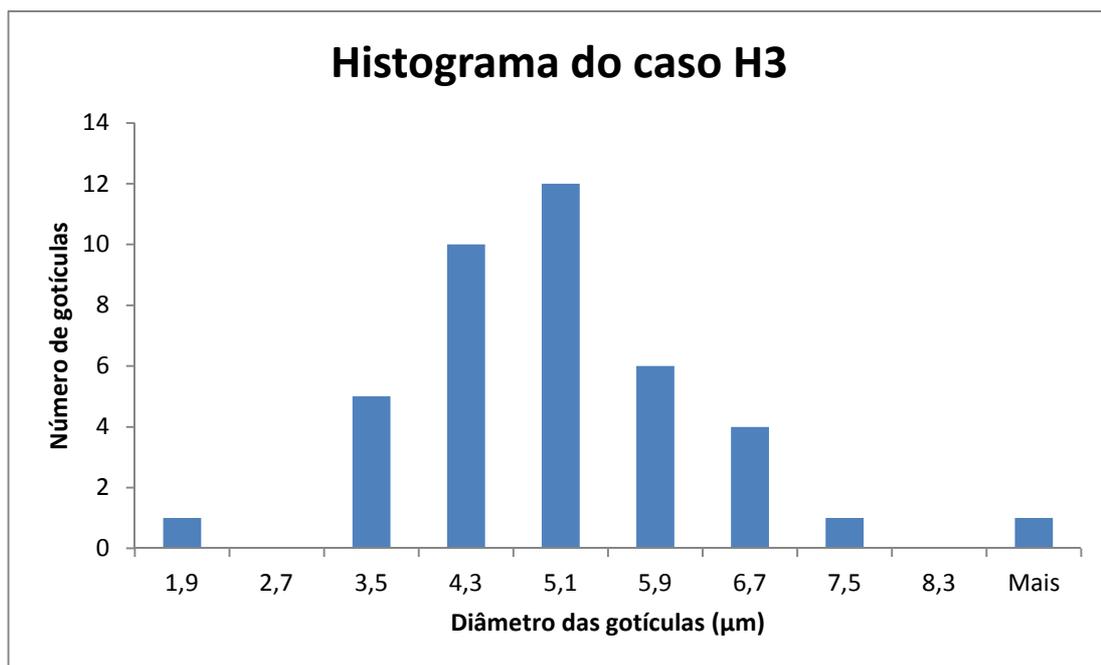


Figura B.8: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H3

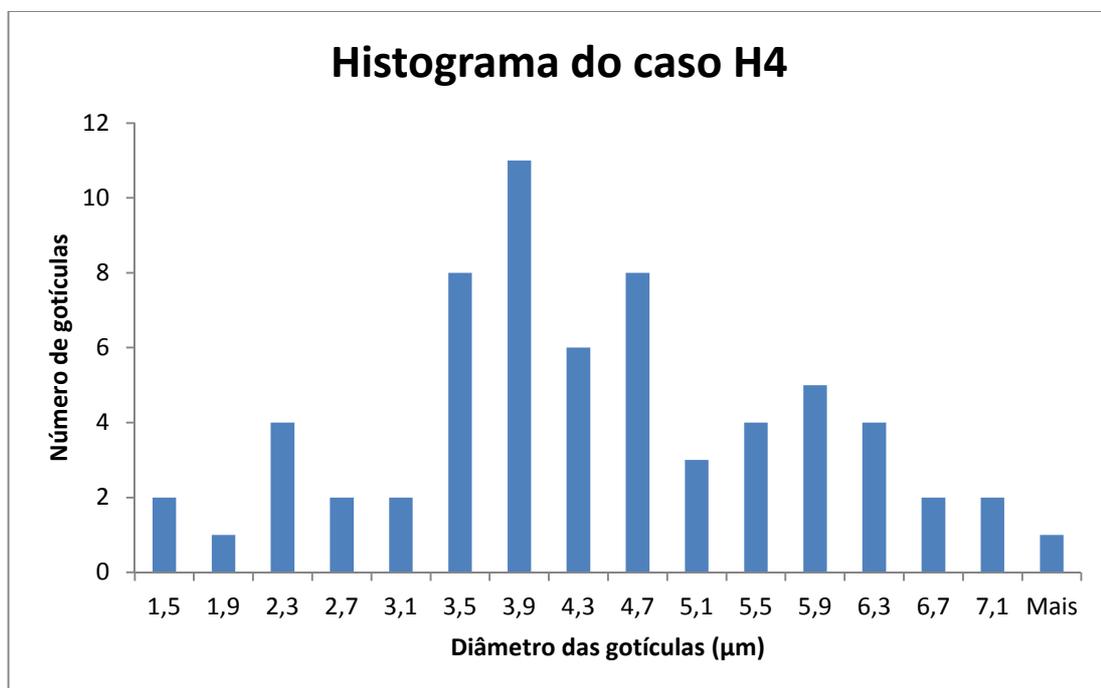


Figura B.9: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso H4

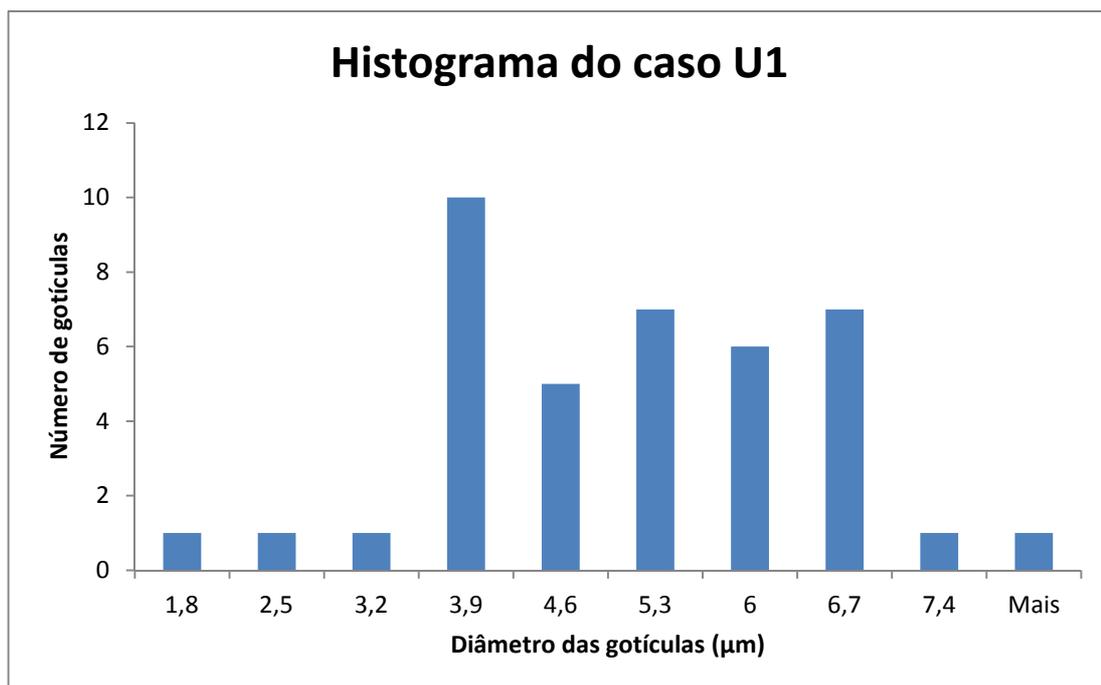


Figura B.10: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U1

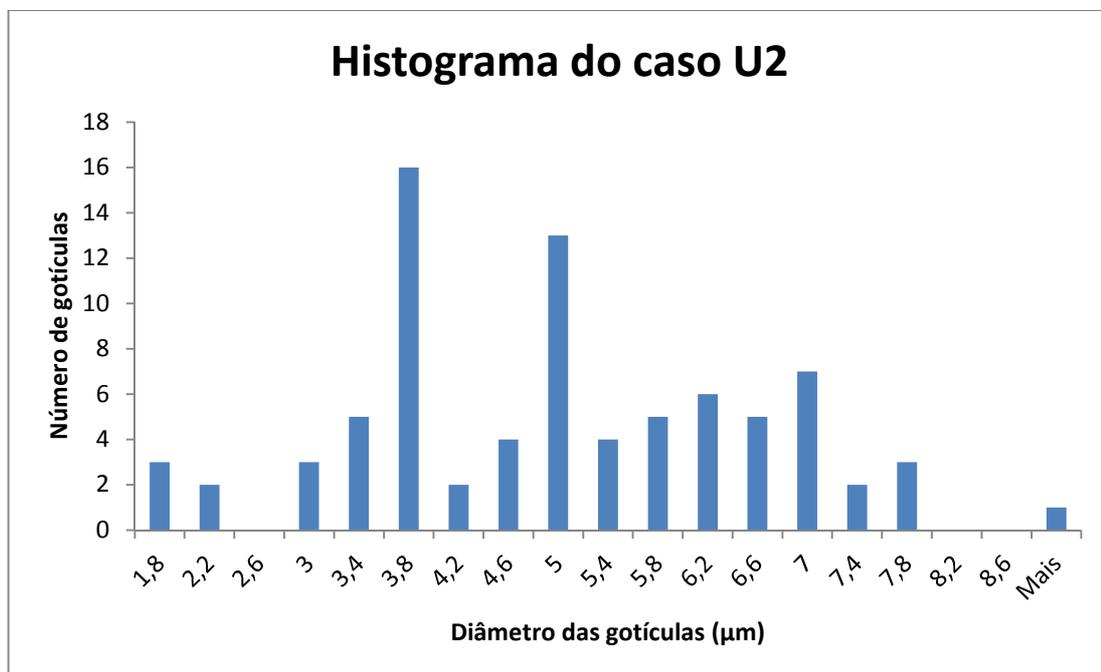


Figura B.11: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U2

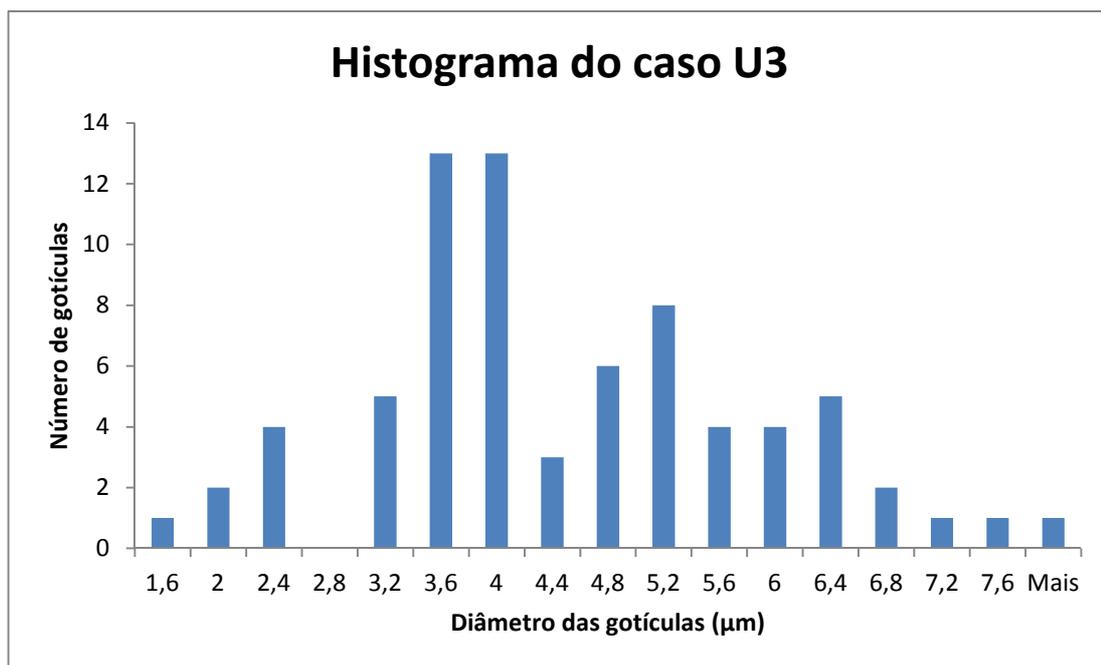


Figura B.12: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U3

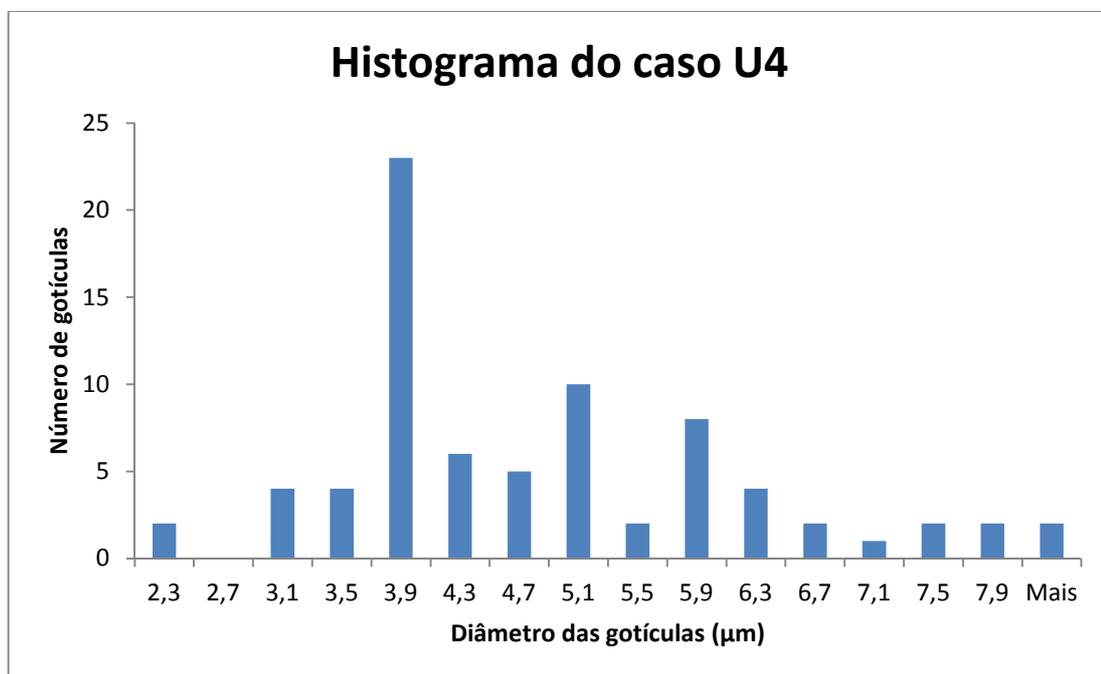


Figura B.13: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso U4

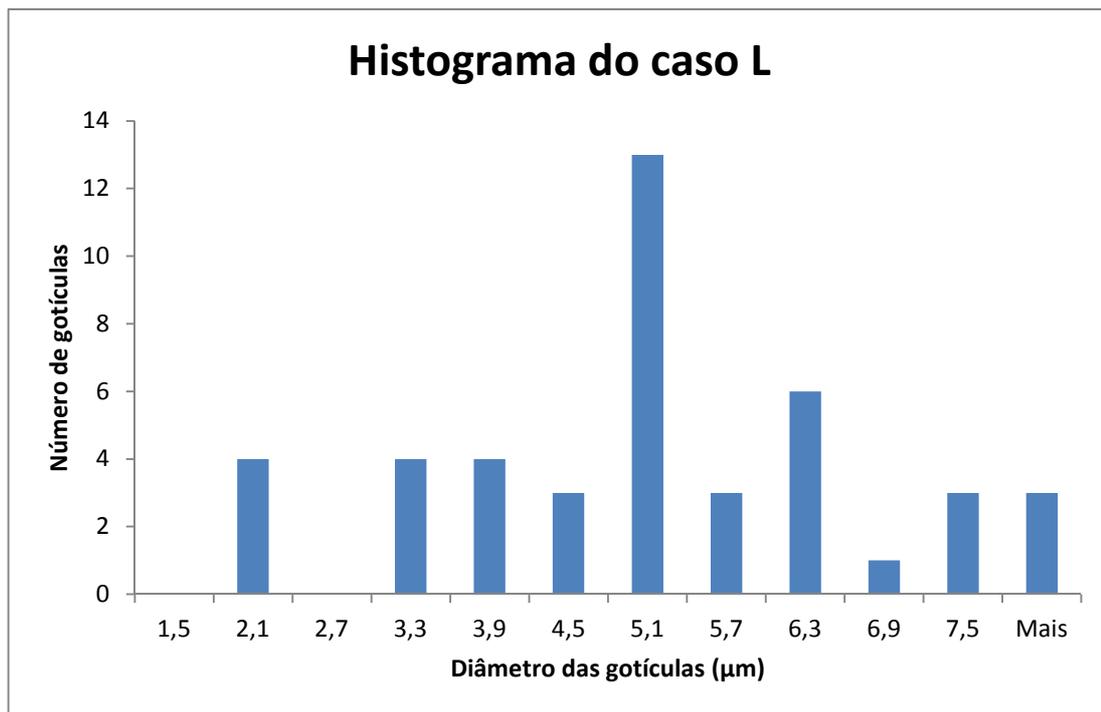


Figura B.14: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso L

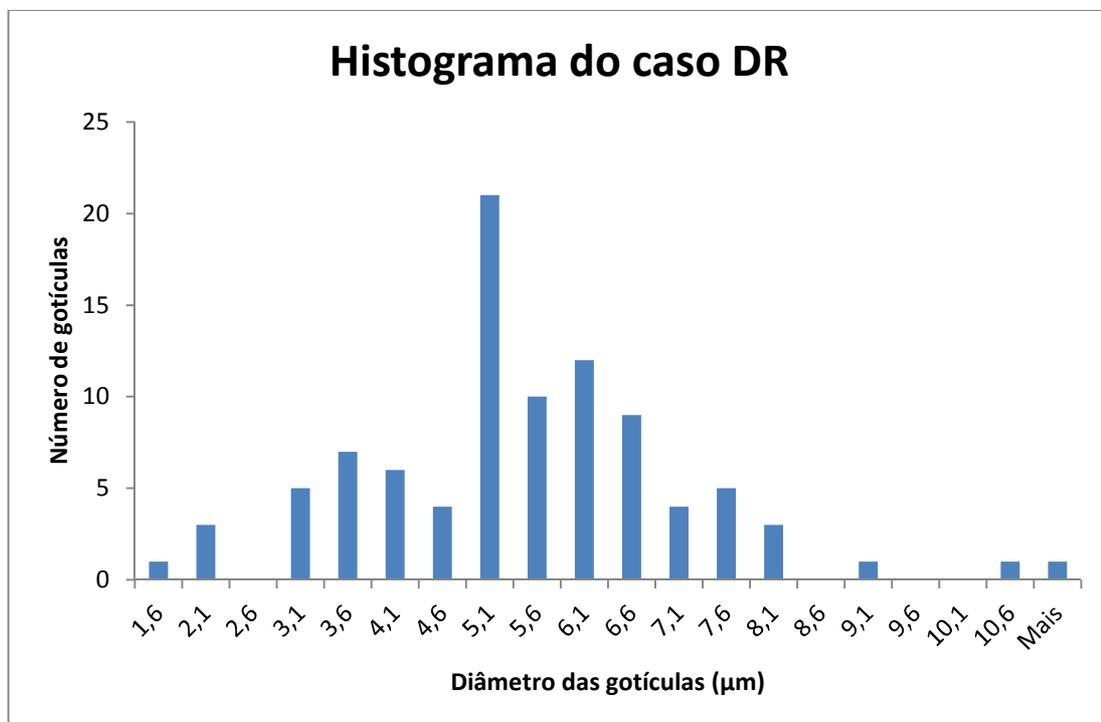


Figura B.15: Histograma dos diâmetros das gotículas do caso DR