

FENÔMENO DE CARREAMENTO NA PROPULSÃO HÍBRIDA: ESTUDO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DAS GOTÍCULAS

Pedro Henrique Fauza Sadocco
pedro_sadocco@hotmail.com

Resumo. O objetivo deste projeto é a análise da variação do diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em um motor a propulsão híbrida. Esta variação foi analisada em função dos seguintes parâmetros de um motor híbrido: viscosidade do combustível, espessura da camada líquida de combustível, velocidade do fluxo de oxidante gasoso, e perfil de velocidade do fluxo de oxidante gasoso. Para fazer isso, um código capaz de simular numericamente o fenômeno de *entrainment* foi desenvolvido para o programa *Gerris Flow Solver*. O desenvolvimento deste código foi dividido nas seguintes etapas: 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. Com as respostas obtidas das simulações do código, foi possível medir os diâmetros das gotículas para várias condições diferentes. Como resultado, observou-se que o diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment*: tende a diminuir com o aumento da viscosidade do combustível, tende a aumentar com o aumento da espessura da camada líquida de combustível, tende a diminuir com o aumento da velocidade do fluxo de oxidante gasoso, e varia para diferentes perfis de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

Palavras chave: *Entrainment*, Propulsão Híbrida, Gotículas, Diâmetro, *Gerris Flow Solver*.

1. Introdução

A propulsão híbrida se baseia em utilizar os reagentes da combustão em estados diferentes. Na configuração clássica de um motor híbrido, o combustível se encontra no estado sólido e o oxidante se encontra no estado líquido ou gasoso.

O grande interesse na propulsão híbrida se deve ao fato que esta apresenta segurança e flexibilidade de funcionamento, que são as principais vantagens da propulsão líquida, e custos baixos, que é a principal vantagem da propulsão sólida.

Contudo, a propulsão híbrida apresenta também uma grande desvantagem que impede o seu uso na principal aplicação propulsiva do setor aeroespacial que é o lançamento de foguetes. Esta grande desvantagem é a baixa velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido, que faz com que o empuxo gerado por motores de tipo híbrido seja baixo.

Uma das técnicas descobertas para aumentar a velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido em motores de tipo híbrido é o uso de combustíveis sólidos que possuem baixa temperatura de fusão pois estes formam uma camada líquida na superfície. Além disso, se a camada líquida de combustível tiver baixas viscosidade e tensão superficial, esta pode se instabilizar. Isto provoca o fenômeno de *entrainment* que é o desprendimento de gotículas de combustível da camada líquida, também conhecido como “carreamento”, como pode ser visto na Fig. (1).

A ocorrência do fenômeno de *entrainment* é observada principalmente quando são utilizados sólidos criogênicos ou alcanos como combustíveis sólidos. Além disso, a presença deste fenômeno na propulsão híbrida aumenta em uma ordem de grandeza a velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido.

O aumento da velocidade de regressão do bloco de combustível sólido causado pela ocorrência do fenômeno de *entrainment* depende das características das gotículas desprendidas, principalmente do diâmetro destas. Por esse motivo, decidiu-se analisar neste projeto a variação do diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em função dos seguintes parâmetros: viscosidade do combustível, espessura da camada líquida de combustível, velocidade do fluxo de oxidante gasoso, e perfil de velocidade do fluxo de oxidante gasoso.

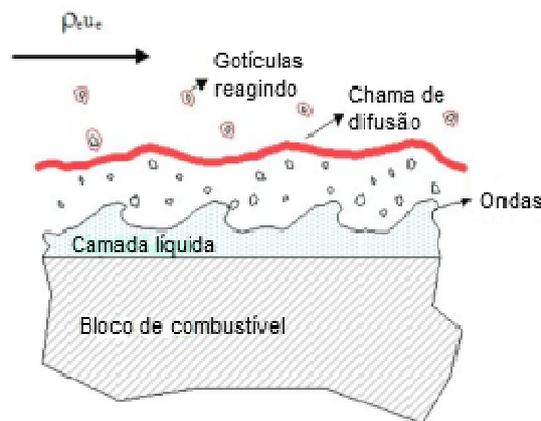


Figura 1. Ilustração do fenômeno de *entrainment* (retirado de Franchi (2009))

2. Metodologia

A obtenção dos resultados necessários para atingir os objetivos deste projeto foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu no desenvolvimento de um código capaz de simular numericamente o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver*. A segunda etapa, por sua vez, consistiu na medição dos diâmetros das gotículas obtidas nas simulações feitas com o código desenvolvido na primeira etapa.

2.1. Simulação do fenômeno de *entrainment*

O desenvolvimento do código para simular numericamente o fenômeno de *entrainment* com o programa *Gerris Flow Solver* foi 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.

2.1.1. Modelagem de geometria

Para simular o fenômeno de *entrainment* na propulsão híbrida, decidiu-se criar uma geometria que representasse bidimensionalmente a câmara de combustão de um motor de tipo híbrido. Dessa forma, esta geometria deve consistir na passagem do fluxo de oxidante gasoso 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 programa *Gerris Flow Solver*, 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 modelo 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 de oxidante gasoso 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.

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 ocorrência do fenômeno de *entrainment* na geometria criada é apresentada na Fig. (2).

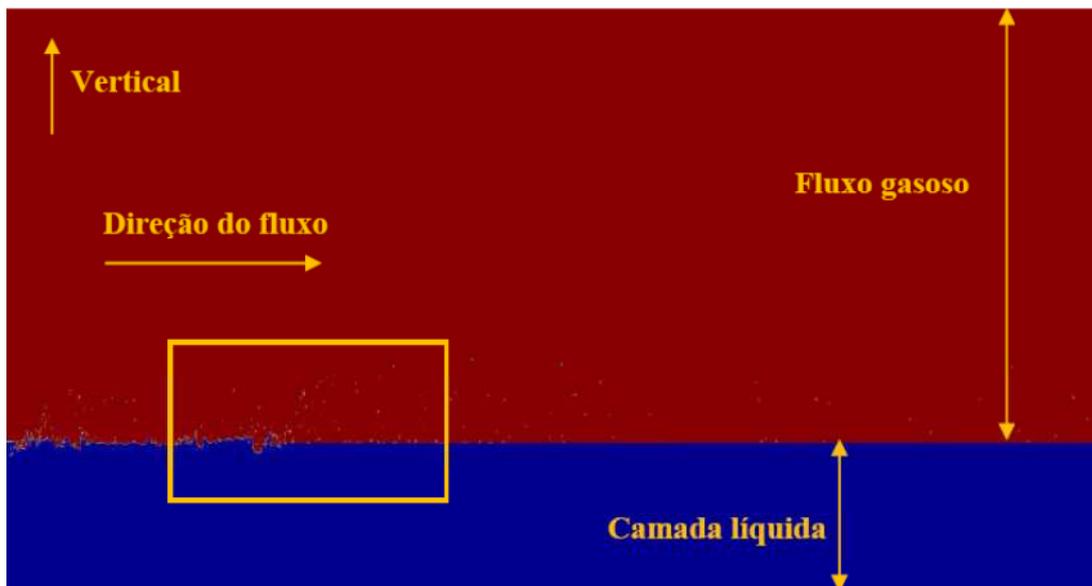


Figura 2. Ocorrência do fenômeno de *entrainment* na geometria criada com o código.

2.1.2. Definição das condições iniciais

As condições iniciais que devem ser impostas para que se possa executar as simulações com o programa *Gerris Flow Solver* são de dois tipos. O primeiro tipo fornece as velocidades dos fluidos no instante inicial. 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 na geometria criada 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 pois este é um dos parâmetros cujo efeito no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* se quer analisar. 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.

O segundo tipo de condição inicial que deve ser definido é a região de separação entre a fase líquida e a fase gasosa no instante inicial. Foi imposto que esta região 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.

2.1.3. Definição das condições de contorno

As condições de contorno foram definidas de acordo com o modelo descrito anteriormente. Dessa forma, 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. Para fazer isso, 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 pois este é um dos parâmetros cujo efeito no diâmetro das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* se quer analisar.

Por outro lado, 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*.

2.1.4. 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 de Karabeyoglu et al (2002). Os valores utilizados são apresentados na Tab. (1).

Como o programa *Gerris Flow Solver* trabalha com as equações de Navier-Stokes na forma adimensional, então 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 programa através da função específica utilizada para inserir este valor no código.

Tabela 1. Propriedades físicas do ar e da parafina

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

2.1.5. 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.

Além desses dois parâmetros, foi definido que a interface entre a fase líquida e a fase gasosa deveria ter um refinamento mais alto 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 mais alto 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.

2.1.6 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 Fig. (3) é apresentado um aumento da área destacada da Fig. (2) para que se possa visualizar melhor o fenômeno de *entrainment*. Pode-se observar na Fig. (3) a presença das gotículas formadas e a instabilização da camada líquida.

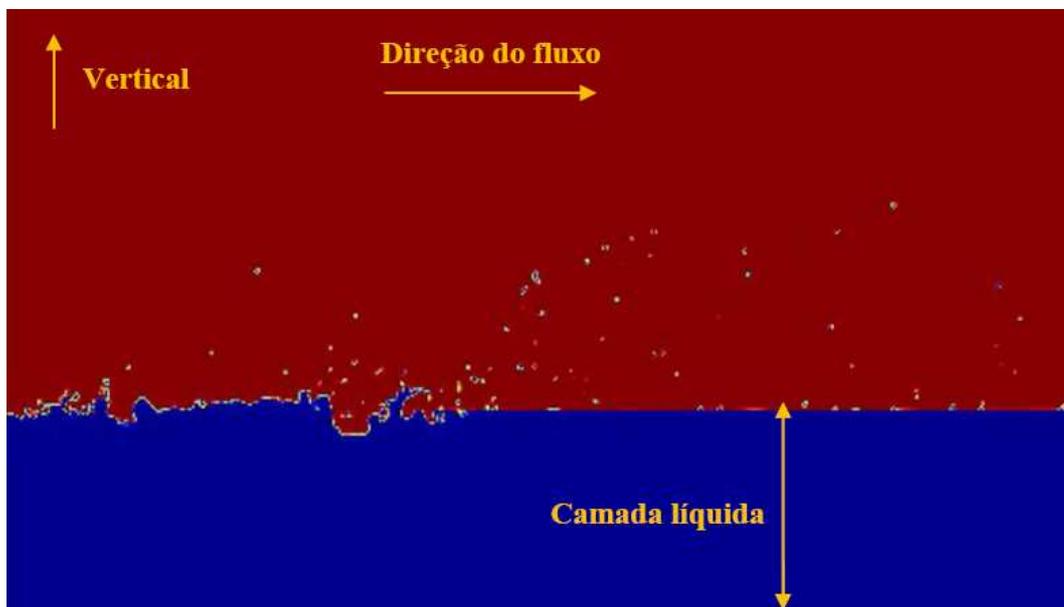


Figura 3. Aumento da área destacada da Fig. (2) para uma melhor visualização do fenômeno de *entrainment*

2.2. Medição do diâmetro das gotículas

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. Estes vídeos foram, então, fragmentados em imagens com o *software* livre *VirtualDub* de processamento de vídeos. Dessa forma, a medição dos diâmetros das gotículas pôde ser feita com um programa de processamento de imagens. O programa escolhido para esse fim foi o *software* livre *ImageJ*.

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 desprendida 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.

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.

3. Resultados

Os resultados relativos ao efeito da viscosidade do combustível, da espessura da camada líquida de combustível, da velocidade do fluxo de oxidante gasoso, e do perfil de velocidade do fluxo de oxidante gasoso nos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* são apresentados e analisados a seguir.

3.1. Descrição dos casos analisados

Os valores utilizados para cada parâmetro em cada caso analisado são apresentados na Tab. (2).

Tabela 2. Valores dos parâmetros utilizados em cada caso analisado.

| 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 | Dois seções lineares | 93 | 2,45 |

3.2. Efeito da viscosidade do combustível

Os diâmetros das gotículas e os relativos intervalos de confiança obtidos para os casos padrão, V1, V2, V3, e V4 que analisam o efeito da viscosidade do combustível no diâmetro das gotículas são apresentados na Tab. (3) e na Fig. (4).

Tabela 3. 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 |

Pode-se observar na Fig. (4) 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 Fig. (4) 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 Fig. (4). A equação desta linha de tendência e o seu coeficiente de correlação são apresentados na Eq. (1) e na Eq. (2), respectivamente.

$$D = -0,0007 * \mu + 5,0238 \quad (1)$$

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

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.

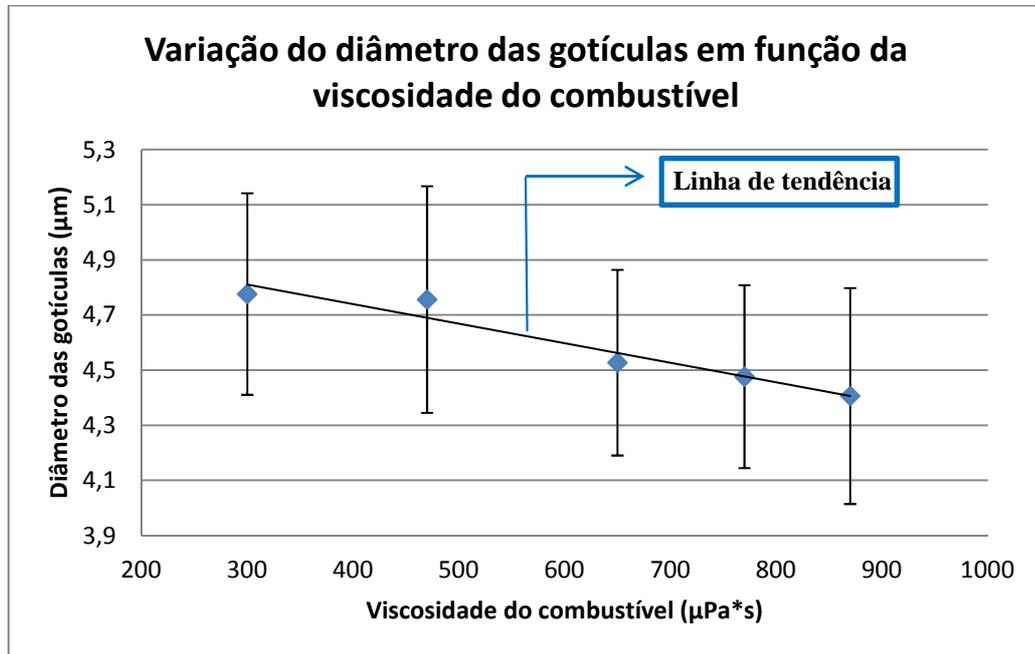


Figura 4. Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da viscosidade do combustível.

3.3. Efeito da espessura da camada líquida de combustível

Os diâmetros das gotículas e os relativos intervalos de confiança obtidos para os casos padrão, H1, H2, H3, e H4 que analisam o efeito da espessura da camada líquida de combustível no diâmetro das gotículas são apresentados na Tab. (4) e na Fig. (5).

Tabela 4. 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 Fig. (5) 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 Eq. (3) retirada de Karabeyoglu et all (2002) que fornece o equilíbrio da força de cisalhamento na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante:

$$c_f * P_d = \mu_l \frac{u_l}{h} \quad (3)$$

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 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$), 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).

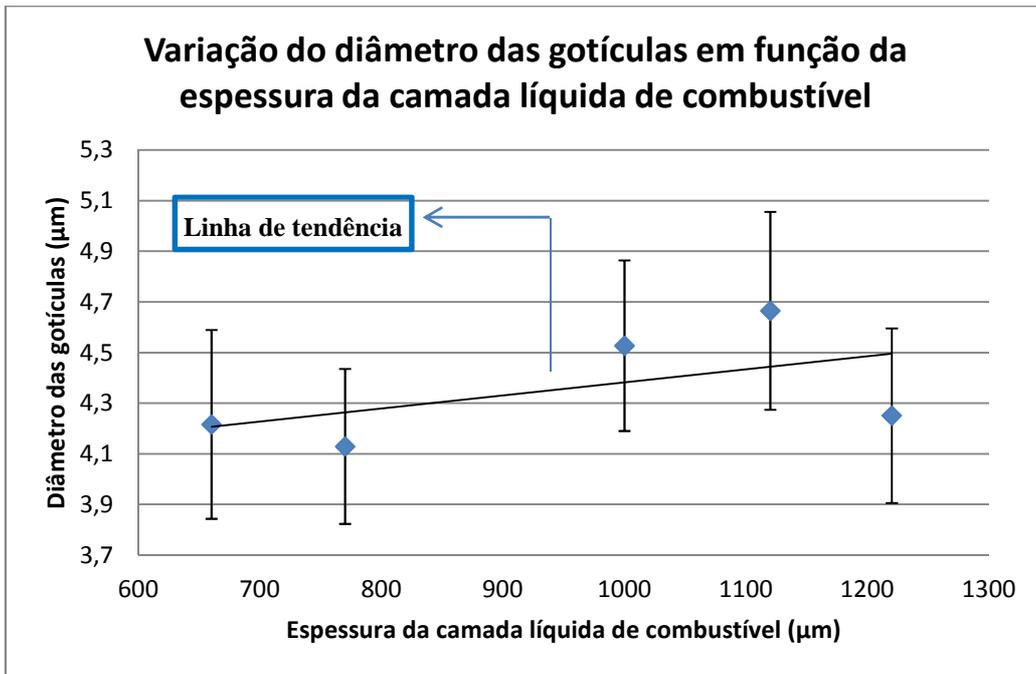


Figura 5. Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da espessura da camada líquida de combustível.

O aumento da espessura da camada líquida de combustível faz com que o termo a direita da igualdade na Eq. (3) 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 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 Fig. (5) é correto.

A equação da linha de tendência apresentada na Fig. (5) e o seu coeficiente de correlação são apresentados na Eq. (4) e na Eq. (5), respectivamente.

$$D = 0,005 * h + 3,8652 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,2854 \quad (5)$$

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.

3.4. Efeito da velocidade do fluxo de oxidante gasoso

Os diâmetros das gotículas e os relativos intervalos de confiança obtidos para os casos padrão, U1, U2, U3, e U4 que analisam o efeito da velocidade do fluxo de oxidante gasoso no diâmetro das gotículas são apresentados na Tab. (5) e na Fig. (6).

Pode-se observar na Fig. (6) 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 Eq. (6) retirada de Karabeyoglu et al (2002) que fornece o equilíbrio da força de cisalhamento na interface entre a camada líquida de combustível e o fluxo gasoso de oxidante, da Eq. (7) que representa a definição de pressão dinâmica, e da Eq. (8) que representa a definição da velocidade adimensional utilizada na Fig. (6).

$$c_f * P_d = \mu_l \frac{u_l}{h} \quad (6)$$

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho_g * u_g^2 \quad (7)$$

$$u = \frac{u_g}{u_{ref}} \quad (8)$$

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).

Tabela 5. 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 |

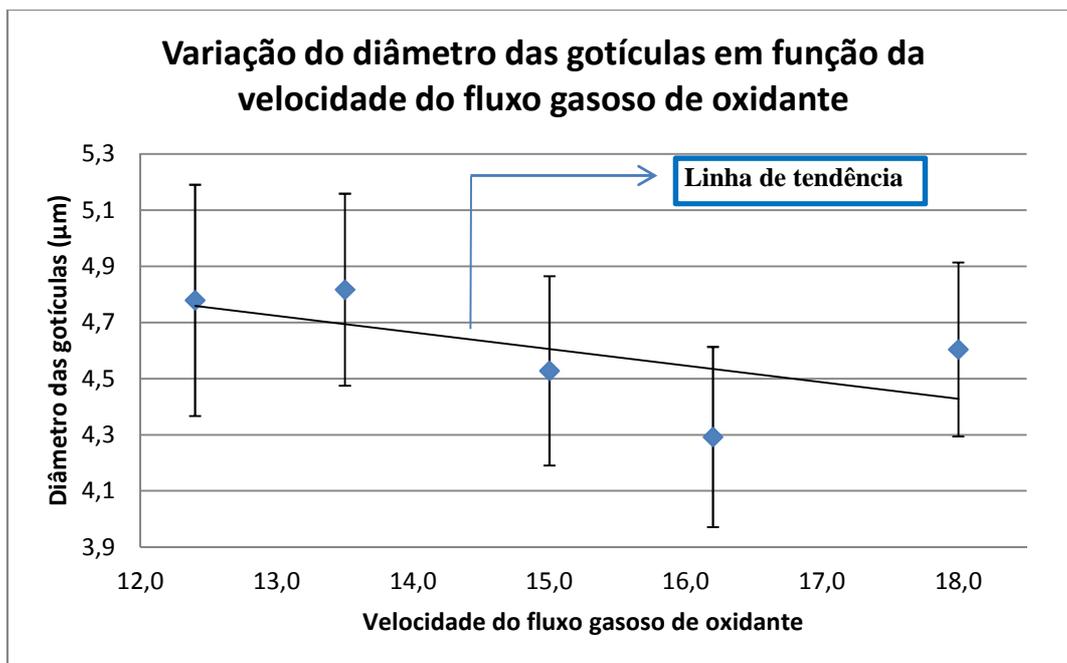


Figura 6. Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito da velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

Como o programa *Gerris Flow Solver* trabalha com variáveis adimensionais, então analisou-se o efeito da velocidade adimensional do fluxo gasoso de oxidante, cuja definição é dada na Eq. (8), 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 Eq. (6) 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 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 Fig. (6) é correto.

A equação da linha de tendência apresentada na Fig. (6) e o seu coeficiente de correlação são apresentados na Eq. (9) e na Eq. (10), respectivamente.

$$D = -0,0591 * u + 5,4913 \quad (9)$$

$$R^2 = 0,3789 \quad (10)$$

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.

3.5. Efeito do perfil de velocidade do fluxo de oxidante gasoso

Os diâmetros das gotículas e os relativos intervalos de confiança obtidos para os casos padrão, L, e DR que analisam o efeito do perfil de velocidade do fluxo de oxidante gasoso no diâmetro das gotículas são apresentados na Tab. (6) e na Fig. (7).

Tabela 6. 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 |

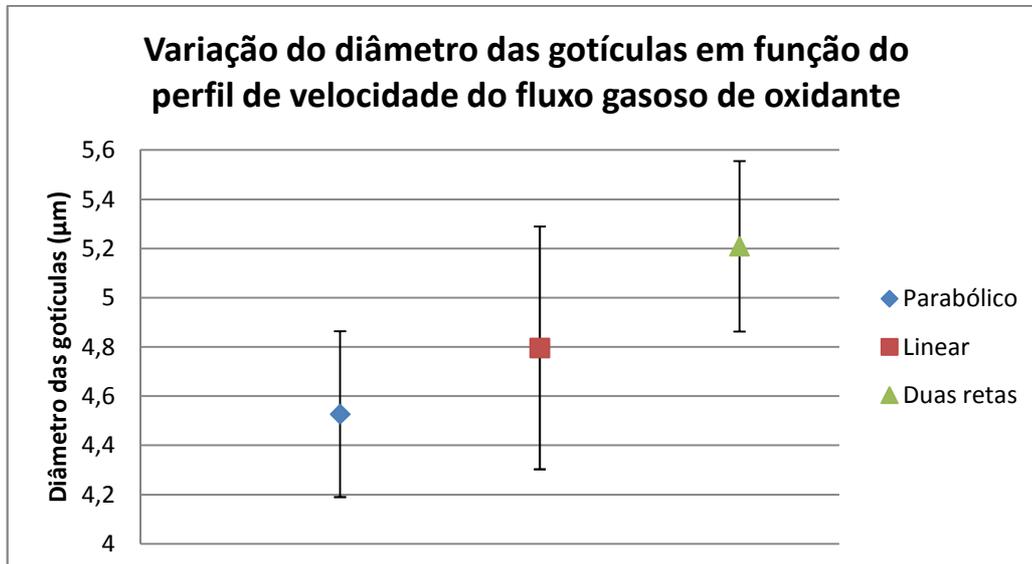


Figura 7. Representação gráfica dos diâmetros médios e dos intervalos de confiança dos casos utilizados na análise do efeito do perfil de velocidade do fluxo gasoso de oxidante.

Pode-se observar na Fig. (7) 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 Eq. (11).

$$\tau_{interface} = \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \quad \text{para } y = 0 \quad (11)$$

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).

Para cada um dos perfis considerados, a derivada presente na Eq. (11) 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*.

4. Conclusões

Neste projeto, foi feita a análise 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 de oxidante gasoso nos diâmetros das gotículas formadas pelo fenômeno de *entrainment* em um motor de tipo híbrido. Essa análise foi feita com os dados obtidos das simulações do fenômeno de *entrainment* feitas com o código desenvolvido neste projeto para o programa *Gerris Flow Solver*.

Como resultado desta análise, 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.

Os resultados obtidos neste projeto podem ser utilizados no projeto de um motor de tipo híbrido para obter a melhor velocidade de regressão da superfície do bloco de combustível sólido através do fenômeno de *entrainment*. Porém, os resultados deste projeto foram obtidos com simulações numéricas de um modelo simplificado da câmara de combustão de um motor híbrido. Por esse motivo, sugere-se como desenvolvimentos futuros a este projeto: a validação através de provas experimentais dos resultados encontrados; a análise de casos diferentes daqueles considerados neste projeto para descobrir se os resultados encontrados podem ser estendidos para uma faixa maior de condições de funcionamento; e o desenvolvimento de modelos mais precisos que representem os resultados encontrados.

5. Referências

- Franchi, F., 2009, "Studio della Stabilità del Film Liquido in Combustibili Paraffinici per Applicazioni Propulsive Aerospaziali" Milão: Politecnico di Milano. 117 p. Tese (Laurea Specialistica), Ingegneria Aeronautica, Milão.
- Karabeyoglu, M. A., Altman, D., Cantwell, B. J., 2002, "Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory", *Journal of Propulsion and Power*, v. 18, n. 3, p. 610-620.

DROPLET ENTRAINMENT IN HYBRID PROPULSION: STUDY OF THE VARIATION IN THE DIAMETER OF THE DROPLETS

Pedro Henrique Fauza Sadocco

pedro_sadocco@hotmail.com

Abstract. *The objective of this project is the analysis of the variation in the diameter of the droplets created by entrainment in a hybrid propulsion thruster. This variation was analyzed as a function of the following parameters: viscosity of the fuel, thickness of the liquid layer of the fuel, velocity of the oxidizer gas flow and velocity profile of the oxidizer gas flow. In order to do this, a code capable of simulating numerically the droplet entrainment was developed for the software Gerris Flow Solver. The development of this code was divided in the following steps: modeling of the geometry, definition of the initial conditions, definition of the boundary conditions, definition of the physical properties, definition of the control parameters and presentation of the results. With the results from the simulations of the code, it was possible to measure the diameters of the droplets for different conditions. As a result, it was observed that the diameter of the droplets created by entrainment: tends to decrease with the increase of the viscosity of the fuel, tends to increase with the increase of the thickness of the liquid layer of the fuel, tends to decrease with the increase of the velocity of the oxidizer gas flow, and varies for different profiles of the oxidizer gas flow.*

Keywords: *Entrainment, Hybrid Propulsion, Droplets, Diameter, Gerris Flow Solver.*