

Thiago Fabricius Konopka

Iniciação Científica PIBIQ/CNPq / 2006-2007

Simulação numérica de escoamento reativo bidimensional em tubeira

Relatório apresentado à
Coordenadoria de Iniciação Científica
e Integração Acadêmica da
Universidade Federal do Paraná por
ocasião da conclusão das atividades
de Iniciação Científica - Edital 2006-
2007.

Orientador: Prof. Carlos Henrique Marchi, Depto. Engenharia Mecânica, UFPR
Co-orientador: Prof. Luciano Kiyoshi Araki, Depto. Engenharia Mecânica, UFPR

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO REATIVO EM MOTOR-FOGUETE
COM REFRIGERAÇÃO REGENERATIVA / 2005017787

Curitiba
Agosto, 2007

Sumário

1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVOS	4
3 MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	5
3.2 VARIÁVEIS DE INTERESSE ANALISADAS	7
3.3 MODELO FÍSICO	7
3.4 MODELOS MATEMÁTICOS	8
3.5 MODELOS QUÍMICOS	9
3.6 MODELO NUMÉRICO	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
4.1 ESCOAMENTO MONOESPÉCIE	11
4.2 ESCOAMENTO MONOESPÉCIE COM PROPRIEDADES VARIÁVEIS	13
4.3 ESCOAMENTO CONGELADO	13
4.4 ESCOAMENTO EM EQUILÍBRIO QUÍMICO LOCAL	15
5 CONCLUSÃO	18
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito de diversos modelos físicos e químicos sobre a previsão do empuxo de um motor-foguete. Para tanto, resolve-se o escoamento bidimensional no interior de um bocal convergente-divergente. O modelo matemático é composto por duas equações de Euler, conservação da massa, conservação da energia térmica e equação de estado dos gases perfeitos. Os modelos físicos considerados são: escoamento de um gás com propriedades (1) constantes e (2) variáveis; e escoamento de uma mistura de gases (3) congelados e em (4) equilíbrio químico local. São considerados dois modelos químicos envolvendo a reação entre hidrogênio e oxigênio, com seis e oito espécies químicas. O modelo matemático é resolvido através de simulação empregando o seguinte modelo numérico: método de volumes finitos; as incógnitas são as duas componentes do vetor velocidade, a pressão estática, a temperatura estática e a massa específica dos gases; sistema de coordenadas não-ortogonais ajustadas aos contornos; aproximações numéricas de segunda ordem de acurácia; arranjo co-localizado de variáveis; esquema adequado a qualquer regime de velocidade; método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade; aplicação das condições de contorno por meio de volumes fictícios; e método MSI (Modified Strongly Implicit procedure) para resolver os quatro sistemas de equações. A tubeira usada tem 0,5 m de comprimento, 0,08 m de diâmetro na garganta, 6,25 de razão de expansão de área e é do tipo parabólica. Na câmara de combustão o estado é: pressão = 20 bar; temperatura = 3420 K; e razão de mistura oxidante/combustível em massa = estequiométrica. O problema é resolvido para cada modelo físico e químico em três malhas diferentes, geradas algebricamente, com número de volumes (longitudinal x radial): 80x24, 160x48 e 320x96. São apresentados resultados do empuxo e sua incerteza numérica associada obtidos com o código computacional Mach2D 6.0. Verificou-se que: (1) o tempo de CPU necessário para resolver o problema é praticamente o mesmo nos vários modelos físicos, exceto para equilíbrio químico que é muito maior; (2) os modelos químicos de seis e oito espécies resultam praticamente no mesmo empuxo, para escoamento congelado e em equilíbrio; (3) a incerteza do empuxo é muito menor do que o efeito dos modelos físicos; e (4) recomenda-se usar o modelo de propriedades constantes para prever o empuxo, por ser mais rápido, mais simples e fornecer resultado similar aos outros modelos que são mais complexos.

1 Introdução

Hoje em dia muitas das facilidades proporcionadas pela comunicação via satélite, sistemas de navegação, previsões climáticas entre outras tantas, decorreram da exploração espacial. A exploração espacial utiliza foguetes para colocar esses equipamentos em órbita, ou seja, lançados para outros planetas. Existem atualmente três formas de se colocar um foguete em movimento. Temos uma fonte de energia e um conversor de energia, para que seja gerada a propulsão que leve à modificação da condição de inércia do corpo, neste caso o foguete.

Para isso utiliza-se uma fonte de energia, que hoje em dia destacam-se a propulsão química, propulsão nuclear e propulsão solar, e um conversor desta forma de energia, que para o caso em estudo são os bocais convergentes divergente, que é denominada tubeira. Que são os motores-foguetes. Das três fontes energéticas citadas, a mais utilizada é a de propulsão química (SUTTON e BIBLARZ, 2001). Com esse sistema a energia resultante das reações químicas aquece os gases a altas temperaturas. Esses gases superaquecidos são expandidos no bocal divergente, originando altas acelerações de velocidades, conseqüentemente uma grande quantidade de movimento. Os propelentes se dividem em duas classes distintas, os propelentes sólidos e líquidos. O objeto de estudo será o propelente líquido mais especificamente a mistura de hidrogênio com oxigênio. Os propelentes líquidos são os principais sistemas de propulsão espacial. Essa mistura tem como característica um alto poder energético, o que aumenta a eficiência do sistema em relação aos demais propelentes líquidos e sólidos (BROWN, 1996).

2 Objetivos

A determinação de soluções numéricas de escoamentos bidimensionais, reativos ou não, é o tema deste trabalho. São considerados quatro modelos físicos distintos (monoespécie constante, monoespécie variável, congelado e em equilíbrio químico local), três modelos químicos de dissociação, variando o número de espécies entre três e oito e o número de reações de dissociação entre zero e seis.

Para se obter um resultado numérico confiável deve-se fazer uma verificação numérica, para que sejam estimados os erros associados à solução numérica. Para ser feita essa estimativa será utilizado o estimador GCI (ROACHE, 1994).

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os modelos matemáticos, físicos numéricos e químicos para descrever o escoamento bidimensional em motores-foguete.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A figura 3.1 mostra o perfil de uma tubeira, que é dada por uma equação parabólica.

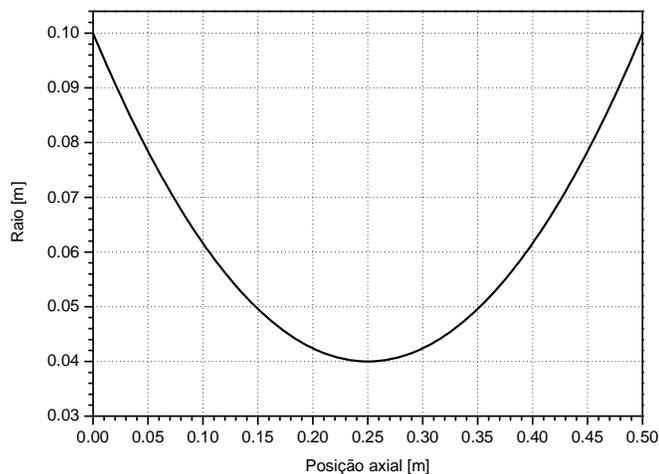


Figura 3.1: Parâmetros geométricos da tubeira parabólica.

Esse perfil parabólico é definido pela equação

$$r = 0,1 - 0,48x + 0,96x^2, \quad (3.1)$$

sendo r o raio da tubeira e x a posição axial na tubeira.

Na tabela 3.1, mostra os principais parâmetros geométricos, físicos e microcomputador utilizado nos estudos empregando-se a geometria parabólica.

Parâmetros geométricos	Raio de entrada	0,100 m
	Raio na garganta	0,040 m
	Raio na saída	0,100 m
	Razão de expansão de áreas	6,25
	Comprimento total	0,500 m
	Posição da garganta	0,250 m
Parâmetros físicos (modelo H₂O)	Temperatura de estagnação (T_0)	3420,33 K
	Pressão de estagnação (P_0)	2,0x10 ⁶ Pa
	Razão entre calores específicos (γ)	1,1956
	Constante do gás (R)	526,97 J/kg·K
Microcomputador	Processador	Pentium IV, 3,40 GHz
	Memória RAM	4 GB
	Sistema operacional	Windows XP

Tabela 3.1: Parâmetros geométricos, físicos e microcomputador utilizado nos estudos empregando-se a geometria parabólica.

Para a definição o problema será apresentado às condições de contorno, conforme mostrado a figura 3.2:

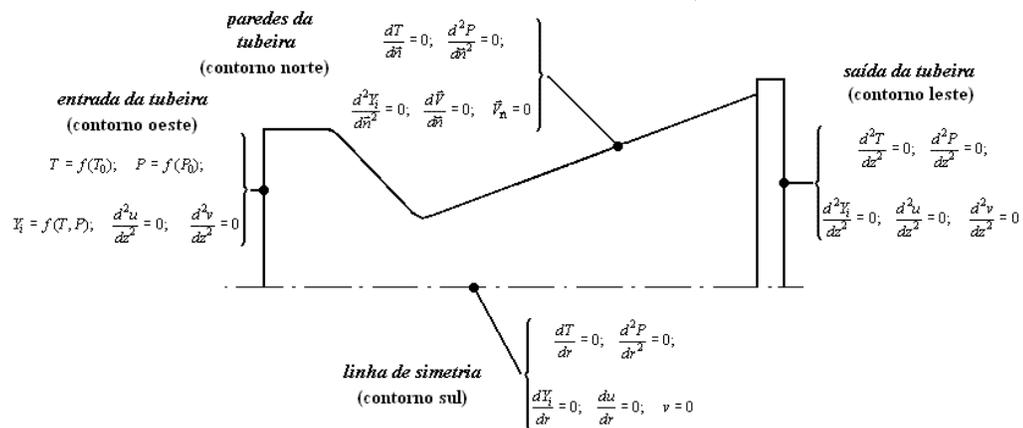


Figura 3.2. Condições de contorno aplicadas à tubeira.

- Condições de entrada: A temperatura (T) e pressão (P) são funções das condições de estagnação. A composição química é calculada a partir da temperatura e pressão local. A velocidade radial (v) e axial (u) na entrada são extrapoladas linearmente.

- Condições na parede: impermeável e adiabática.
- Condições na linha de simetria: impermeável e adiabática.
- Condições na saída: A solução do escoamento em tubeiras não requer condições de contorno na saída quando o escoamento é supersônico (nessa região). Contudo, para implementação de um modelo numérico, há necessidade da especificação das condições de contorno para tal região. Sendo assim, as condições de contorno na saída da tubeira para temperatura (T), pressão (P), velocidades axial (u) e radial (v) e frações mássicas (Y_i) são tomadas como extrapolações lineares dessas propriedades para os valores encontrados no interior da câmara de combustão.

3.2 VARIÁVEIS DE INTERESSE ANALISADAS

O programa Mach2D versão 6.0 fornece as seguintes variáveis de estudo: empuxo, coeficiente de descarga, empuxo específico, coeficiente de empuxo, empuxo dinâmico adimensional, velocidade característica, pressão estática, temperatura, velocidade radial, velocidade axial, número de Mach, massa específica, fração mássica das espécies.

De todas essas variáveis serão apresentados os resultados de algumas delas, que estão citadas abaixo e divididas em dois subgrupos:

Variáveis de interesse globais: empuxo (F), ao nível do mar e no vácuo, e coeficiente de descarga (Cd). São assim chamadas, pois o seu valor tem significado quando analisado sob uma forma global sobre o sistema, ou seja, sua avaliação é feita sobre uma área desse sistema.

Variáveis de interesse locais: Temperatura, pressão, velocidade axial, velocidade radial. São assim chamadas, pois os seus resultados são obtidos e têm importância em cada local da superfície de controle, ou seja, sua importância pode mudar de acordo com a posição dentro do sistema.

3.3 MODELO FÍSICO

Foram feitas as seguintes considerações: Ausência de viscosidade, sistema adiabático e os gases envolvidos no processo são considerados gases perfeitos.

Foram estudados os seguintes modelos físicos:

Escoamento Monoespécie com propriedades constantes: Consideram-se os gases da combustão como sendo o vapor de água.

Escoamento Monoespécie com propriedades variáveis: O gás analisado no escoamento é o vapor de água, mas neste caso as propriedades do gás variam com a temperatura.

Escoamento Congelado: É a situação em que as taxas de reações químicas são iguais à zero, ou seja, a reação ocorre apenas uma vez e as frações químicas permanecem constantes durante todo o escoamento.

Escoamento em equilíbrio: É quando a composição química em cada volume é ditada pela temperatura, pressão e razão de mistura oxidante/combustível via reações químicas de equilíbrio nos mesmos.

Esses dois últimos modelos foram escolhidos, porque eles representam duas situações ideais para um escoamento reativo. No escoamento congelado como a reação ocorre uma só vez, têm-se menos gastos energéticos, pois não ocorreriam reações ao longo do escoamento. No escoamento em equilíbrio químico ocorreriam reações de dissociação e formação em todos os pontos, tendo um gasto demasiado de energia. Como esses dois casos são extremos opostos, o caso mais próximo do real estaria em um intervalo entre os valores estimados, por isso da importância da análise desses dois modelos, pois com eles têm um intervalo no qual estaria compreendida a solução real ao problema.

3.4 MODELOS MATEMÁTICOS

Para a modelagem matemática do problema, utilizam-se as equações de conservação da massa (3.2), da conservação de quantidade movimento linear nas direções axial (3.3) e radial (3.4), equação da energia (3.5) e equação de estado (3.6), dadas nesta ordem, para o regime permanente (KUNDU, 1990):

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v u) = -\frac{\partial P}{\partial z}, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) = -\frac{\partial P}{\partial r}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v T) = + \frac{1}{c_p} [\nabla(P\vec{V}) - P\nabla\vec{V}] + S_{eq/lf}, \quad (3.5)$$

$$P = \rho RT, \quad (3.6)$$

sendo: ρ , u , v , P e T as cinco variáveis dependentes, representando a massa específica, a velocidade axial, a velocidade radial, a pressão e a temperatura, respectivamente; z e r as direções axial e radial, respectivamente; c_p o calor específico à pressão constante; R a constante da mistura de gases no interior da tubeira e; \vec{V} o vetor velocidade; e $S_{eq/uf}$ o termo-fonte relacionado ao modelo físico de escoamento em equilíbrio químico local dado por (KUO, 1986):

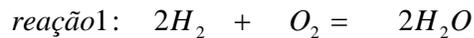
$$S_{eq/uf} = -\frac{1}{c_p} \left[\sum_{i=1}^N h_i \frac{\partial}{\partial z} (\rho u Y_i) - \sum_{i=1}^N h_i \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v Y_i) \right], \quad (3.7)$$

3.5 MODELOS QUÍMICOS

Foram adotadas as seguintes espécies químicas para as simulações: H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H , HO_2 , H_2O_2 .

Para as simulações distribuíram-se as reações químicas nos seguintes modelos:

Modelo 0: Equação da reação global sem dissociação. Este é o modelo mais simples possível, sem qualquer reação de dissociação e, portanto, é o modelo mais distante da realidade. Este serve como referência ideal para os demais. Este modelo apresenta três espécies químicas: H_2 , O_2 e H_2O .



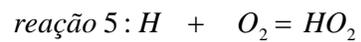
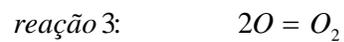
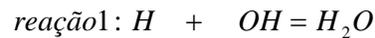
Modelo 1: Este modelo apresenta uma reação de dissociação, e três espécies químicas: H_2 , O_2 e H_2O .



modelo 4: Este modelo químico apresenta quatro reações de dissociação e seis espécies químicas: H_2 , O_2 , H_2O , H , O e OH .



modelo 10: Este modelo químico apresenta seis reações de dissociação e oito espécies químicas: H_2 , O_2 , H_2O , H , O , HO_2 , H_2O_2 e OH .



3.6 MODELO NUMÉRICO

Para resolver esse problema transformou-se um sistema de coordenadas axissimétrico ($z-r$) para um sistema de coordenadas generalizadas ($\zeta-\eta$). Para a discretização das equações, utilizou-se o método de volumes finitos associado a uma formulação adequada para qualquer velocidade (MARCHI e MALISKA, 1994), arranjo co-localizado de variáveis (MALISKA, 1995) e com funções de interpolação de segunda ordem (CDS) com correção adiada (FERZIGER e PERIĆ, 2001). Do processo de discretização resulta em um sistema algébrico de equações lineares, e obtém-se a solução pelo método MSI “*Modified Strongly Implicit procedure*” (SCHNEIDER e ZEDAN, 1981). As condições de contorno foram aplicadas em volumes fictícios, sendo que as incógnitas são duas componentes do vetor velocidade, a pressão estática, a temperatura estática e a massa específica dos gases.

Com a equação da conservação da quantidade de movimento linear determina-se a velocidade, a partir da equação da conservação da massa, obtém-se uma correção da pressão, empregando-se o Método SIMPLEC. A temperatura é obtida através da equação da energia e com a equação do estado obtém-se a massa específica.

Também para essa discretização podem-se usar malhas com diferentes tamanhos, mas para o estudo apresentado, utilizaram-se as malhas de 80x24, 160x48 e 320x96.

4 Resultados e discussão

4.1 ESCOAMENTO MONOESPÉCIE

Nesta seção serão comparados os casos de escoamento de monoespécie com propriedades constante e variável. Percebe-se, primeiramente uma diferença entre a pressão e a temperatura na região de expansão da região central do motor-foguete, com a parede. Essa diferença é devida ao se tratar de um escoamento bidimensional, e na região de expansão ocorre um gasto energético para que ela ocorra. A análise tem como objetivo a comparação entre os modelos físicos para a malha de 80X24, para demonstração dos efeitos desses modelos químicos nos perfis de velocidade, pressão, temperatura e empuxo.

Ao comparassem os modelos com as propriedades constantes e variáveis no centro da tubeira, para a pressão, a diferença é de 2100 Pa, o que corresponde a uma diferença relativa de 2,82% com relação ao modelo mais completo (modelo 10). Há também uma diferença perceptível nos perfis de temperatura. Comparando agora os dois casos para o escoamento da parede, tem-se uma diferença de temperatura de 90 K, que em relação ao modelo mais completo é de 4,86%. As diferenças são relativamente baixas entre um modelo e outro, mas significativos. Pelos gráficos obtidos e pelas comparações realizadas acima que há uma diferença entre os dois modelos físicos (monoespécie variável e constante). Essa diferença deve-se ao gasto energético com a variação das propriedades, pois o modelo, dos quais, as propriedades não variáveis, seria o modelo, mas idealizável possível, pois não há formação de mais espécies químicas e suas propriedades são constantes ao longo de todo o escoamento. Em seguida são apresentados mais dois modelos físicos para a análise de suas propriedades.

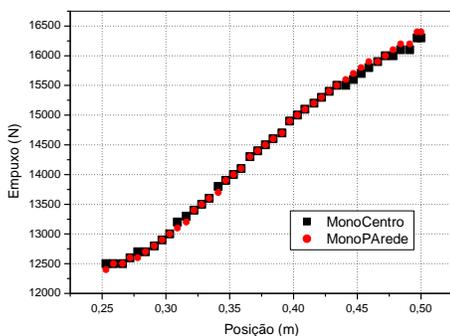


Figura 4.1 Perfil de Empuxo.

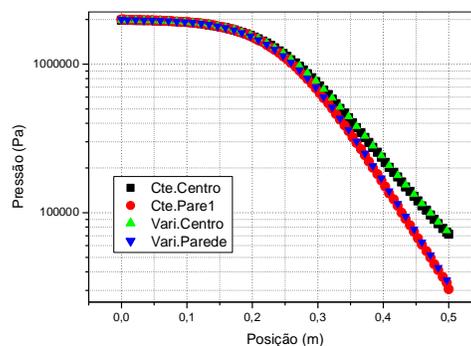


Figura 4.2 Perfil de pressão.

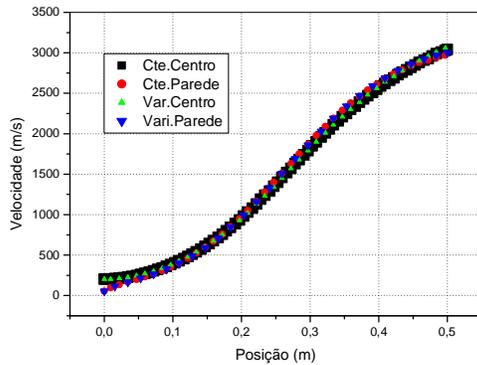


Figura 4.3 Perfil de velocidade na direção axial.

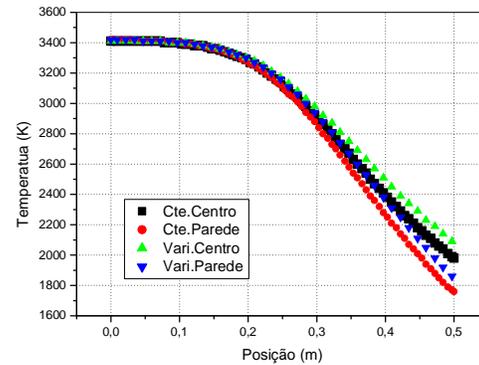


Figura 4.4 Perfil de temperatura.

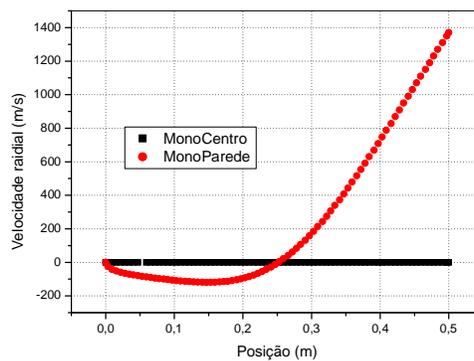


Figura 4.5 Perfil de velocidade na direção radial

A demonstração desses perfis tem como objetivo mostrar como é o comportamento de cada propriedade no regime de escoamento. A próxima etapa será a comparação entre as propriedades para as diferentes malhas, análise dos erros computacionais e qual é o tempo computacional para cada simulação. Segue a tabela 4.1 com os dados para o escoamento monoespécie com propriedades constantes.

Na tabela disposta acima, pode-se comparar o empuxo para as três diferentes malhas estudadas. A diferença relativa entre as malhas de 80X20 e 320X96 é de 0,41% para o empuxo. Com o maior refino da malha o tempo aumenta 124 vezes comparando ainda essa duas malhas. Com a diferença relativamente pequena devida ao refino da malha, seria melhor o uso da malha 80X24, pois demanda menos tempo computacional.

Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa de erro (CDS)	
80	24	1,63383E+04	178,5	12,2 s
160	48	1,62926E+04	101,2	2,48 min
320	96	1,62716E+04	53,56	25,3 min

Tabela 4.1 Empuxo no vácuo para o escoamento monoespécie com propriedades constantes

4.2 ESCOAMENTO MONOESPÉCIE COM PROPRIEDADES VARIÁVEIS

Nesta análise as propriedades físicas do gás estão relacionadas com a temperatura, ou seja, o calor específico varia de acordo com a temperatura pontual. Na tabela 4.2 são apresentados os resultados para o empuxo, com sua estimativa de erro para o escoamento monoespécie com propriedades variáveis.

Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa e erro (CDS)	
80	24	1,64143E+04	188,98	11,8 s
160	48	1,63670E+04	105,04	2,48 min
320	96	1,63451E+04	56,65	23,9 min

Tabela 4.2 Empuxo no vácuo para o escoamento monoespécie com propriedades variáveis

Ao comparar o empuxo para cada uma das malhas, nota-se uma diferença relativamente pequena entre os resultados obtidos. A diferença relativa entre a malha mais grossa e a mais refinada é de 0,133% e o tempo computacional para a malha mais refinada é 121 vezes maior. Chama-se à atenção que esse modelo tem os seus tempos de CPU inferiores ao modelo com propriedades constantes. Isso acontece por que há uma maior instabilidade as propriedades.

Para o caso em análise, utilizar-se-ia a malha de 80x24, pois a pouca diferença entre os resultados e o tempo computacional é muito menor.

4.3 ESCOAMENTO CONGELADO

Neste tipo de modelo físico as reações químicas acontecem apenas uma única vez, que para este caso as reações acontecem apenas na câmara de combustão, e as frações químicas permanecem constantes ao longo do escoamento. Os dados de entrada são os mesmos dos modelos anteriores.

Modelo 00				
Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa e erro	
80	24	1,64185E+04	168,8	44,2 s
160	48	1,63753E+04	87,76	3,71 mim
320	96	1,63454E+04	29,87	45,29 mim
Modelo 04				
Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa e erro	
80	24	1,62718E+04	175,9	28,5 s
160	48	1,62264E+04	98,31	4,80 min
320	96	1,62055E+04	53,49	23,6 min
Modelo 10				
Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa e erro	
80	24	1,62719E+04	175,4	28,2 s
160	48	1,62264E+04	99,06	2,34 min
320	96	1,62056E+04	52,55	23,1 min

Tabela 4.3 Empuxo no vácuo para o escoamento congelado

Ao serem comparados os três modelos de reações nota-se uma grande diferença entre os tempos de CPU dos modelos 04 e 10 com relação ao modelo 00, sendo o tempo deste modelo o maior, apesar de os modelos 04 e 10 serem mais complexos. O modelo 00 é cerca de 50% maior do que os outros dois modelos. Isso ocorre porque o modelo 00 tem mais instabilidade que os outros dois modelos, isso levaria a esse maior tempo computacional.

Ao compararem-se as diferentes malhas para analisar-se o efeito no empuxo, a malha de 320X96 tem uma diferença relativa de 0,862 % entre o modelo 00 e o modelo 04, e de 0,862 % e de 0,000617 % entre o modelo 04 e 10. Com isso o modelo 04 seria o mais adequado, pois têm um tempo de CPU inferior aos demais modelos para malha de 80x24.

Com relação às malhas, faz-se à comparação em relação ao modelo químico 04. A diferença relativa entre o modelo 00 e o modelo 04 é de 0,279 % e de 0,129 % entre o modelo 04 e modelo 10. Percebe-se uma diferença muito pequena para os resultados entre as diferentes malhas. A escolha, tanto da malha quanto do modelo de reações, é de grande importância, pois com isso tem-se uma boa aproximação do resultado com um gasto menor de tempo. Para esse caso a melhor

escolha seria o modelo 04 e a malha de 80X24, pois praticamente tem-se o mesmo resultado, se levar em consideração o intervalo estimado pelo erro numérico.

4.4 ESCOAMENTO EM EQUILÍBRIO QUÍMICO LOCAL

Para o escoamento em equilíbrio químico local, as reações de dissociação ocorrem em cada volume de controle até atingirem a condição de equilíbrio químico local. Para esse modelo físico, foram utilizados os modelos 04 e 10. Analisando na malha de 80x24, tem-se uma diferença relativa entre os dois modelos de 0,00179 %. E averiguando a influência do refino da malha no resultado, percebe-se a diferença relativa de 0,507 % entre a malha de 80x24 e a de 320x96. Levando em consideração a estimativa de erro associada para resultado as pequenas diferenças devidas ao refino da malha e a modelo químico de reações utilizadas e as diferenças acentuadas nos tempos computacionais para cada malha, pode-se utilizar o modelo químico 04 e a malha de 80X24 sem maiores comprometimentos para a estimativa.

Modelo 04				
Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa e erro	
80	24	1,67345E+04	236,2	10,2 min
160	48	1,66770E+04	136,6	1,24 h
320	96	1,66501E+04	70,95	13,6 h
Modelo 10				
Malha		Empuxo (N)		Tempo de CPU
Direção Axial	Direção Radial	Resultado	Estimativa e erro	
80	24	1,67342E+04	239,4	16,2 min
160	48	1,66770E+04	133,6	1,98 h
320	96	1,66503E+04	70,13	21,3 h

Tabela 4.4 Empuxo no vácuo para o escoamento em equilíbrio químico local

Analisados esses resultados para os modelos de escoamento reativo, nota-se uma tendência a influência muito pequena dos modelos químicos de 6 e 8 espécies químicas no resultado do empuxo, mas contudo, o tempo de CPU é fortemente influenciado pelo modelo físico adotado. Recomenda-se para esses dois casos, o uso do modelo com 6 espécies (modelo 04), pois tem menor complexidade e demanda menos gasto de tempo de CPU.

Será tomada como referência a malha de 80x24, que se comparada às demais não causa uma diferença significativa no empuxo. A comparação entre os modelos químicos será feita uma

comparação geral pelo qual desses seria o mais adequado para utilizar como estimativa para o empuxo do motor-foguete. Com a tabela abaixo relacionamos os empuxos para todos os modelos em análise para a malha de 80x24. A figura 4.6 deixa mais evidente as estimativas do empuxo. Note-se que o escoamento em equilíbrio químico e o escoamento congelado estão nos extremos dessa curva, pois como descrito anteriormente, os modelos físicos em equilíbrio e congelado são dois modelos ideais, sendo assim dois limites para o escoamento real que deve se encontrar dentro desse intervalo.

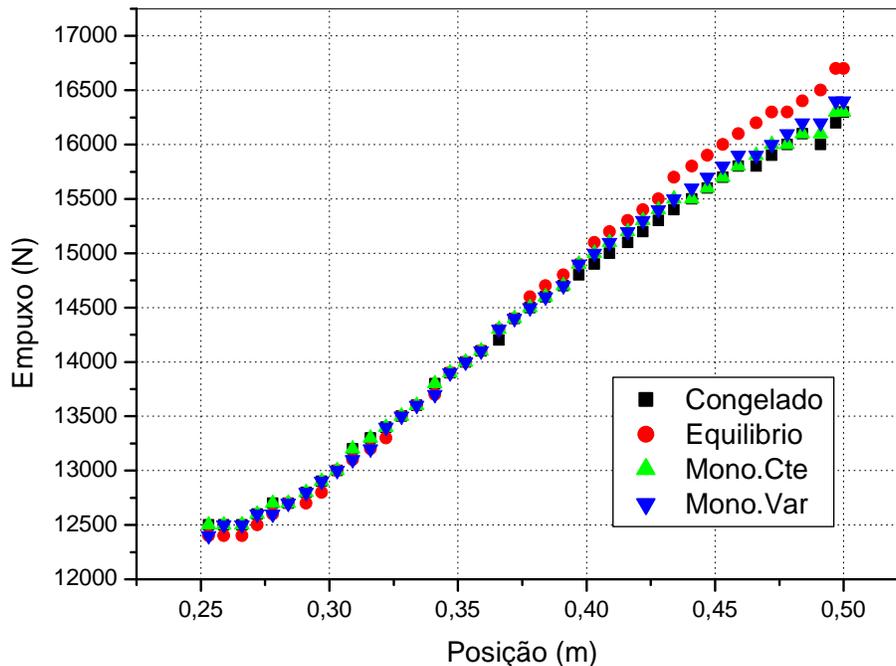


Figura 4.6 Perfil de empuxo para os quatros modelos físicos

Com a figura 4.6, fica mais fácil perceber as duas curvas limitantes, como limite superior o escoamento em equilíbrio, e como limite inferior o escoamento congelado. Com esse gráfico fica claro a posição dos perfis de empuxo do escoamento monoespécie constante e variável, que ficam entre essas duas curvas. Com a tabela 4.5 fica mais fácil a visualização, comparando todos os modelos simulados para a malha de 80x24 volumes. Nota-se que não há praticamente influência dos modelos químicos para o escoamento reativos.

Comparando os modelos de escoamento de monoespécie com propriedades constantes e propriedades variáveis, notamos um erro relativo entre elas de 0,463 %. O tempo de CPU para as duas é muito próximo e por esse padrão não poderíamos escolher um desses modelos para indicar

qual deles seria melhor para estipularmos como sendo uma boa estimativa para o caso real. Mas levando em consideração a maior complexidade do modelo de propriedade variável, poderia ser escolhido o modelo de propriedades constantes como o método para estimar-se o empuxo para essa determinada geometria de motor-foguete. Essa escolha é justificada por ser um modelo mais rápido, simples e fornece um resultado similar aos outros modelos.

Modelo	Empuxo (N)		Tempo de CPU
	Resultado	Estimativa de erro	
Monoespécie, prop. constantes	1,63383E+04	178,5	12,2 s
Monoespécie, prop. variáveis	1,64143E+04	188,98	11,8 s
Esc. congelado – mod. 00	1,64185E+04	168,8	44,2 s
Esc. congelado – mod. 04	1,62718E+04	175,9	28,5 s
Esc. congelado – mod. 10	1,62719E+04	175,4	28,2 s
Esc. em equilíbrio – mod. 04	1,67345E+04	236,2	10,2 min
Esc. em equilíbrio – mod. 10	1,67342E+04	239,4	16,2 min

Tabela 4.5 Comparativo entre o empuxo para as diferentes simulações para a malha de 80x24

5 Conclusão

Neste trabalho foram apresentados resultados para o escoamento bidimensional monoespécie e para escoamentos reativos para uma tubeira de perfil parabólico. Foram analisados os erros relativos de cada malha com o método GCI.

Com relação aos modelos químicos, não é percebido uma grande influência deste nos resultados obtidos. Isso fica bem evidente para o caso do escoamento em equilíbrio químico local, que possui uma diferença relativa entre os dois modelos químicos de 0,00179%, mas uma diferença significativa entre os tempos de CPU. O refino da malha também não casou grande influência dentro de cada modelo físico. Como é o caso do escoamento monoespécie variável nota-se uma diferença no empuxo entre a malha mais refinada (320x96) e a mais grosseira (80x24) de 0,133%, o que estaria dentro da faixa de valores contidos no intervalo da estimativa de erro. E isso se reflete para todos os outros modelos simulados, tanto para a malha quanto para o modelo de dissociação química.

Para se obter uma boa estimativa do empuxo real, poderia ser escolhido, sem acarretar maiores problemas, o modelo monoespécie com propriedades constantes. Chega-se a essa conclusão após as seguintes análises. O resultado obtido se encontrar dentro da faixa de valores estipulados pelos escoamentos em equilíbrio químico local e o escoamento congelado. Em relação ao modelo monoespécie variável possui uma diferença relativa muito pequena, tanto para o empuxo, quanto para o tempo computacional e ainda é menos complexo o que leva o ser uma escolha aceitável para estipular o empuxo para essa determinada geometria.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROWN, C. D. **Spacecraft Propulsion**. Washington: AIAA Educational Series. 1996.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Mechanics**. 3 ed. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

KUO, K. K. **Principles of Combustion**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

KUNDU, P. K. **Fluid Dynamics**. San Diego: Academic Press, 1990.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTD Editora, 1995.

MARCHI, C. H.; MALISKA, C. R. A Nonorthogonal Finite Volume Method for the Solution of all Speed Flows Using Co-located Variables. **Numerical Heat Transfer, Part B**, v. 26, pp. 293 – 311, 1994.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, pp. 405 – 413, 1994.

Schneider, G. E., Zedan, M., 1981, A Modified Strongly Implicit Procedure for the Numerical Solution of Field Problems, **Numerical Heat Transfer**, v. 4, pp. 1-19.

SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion elements**. 7 ed. New York: John Wiley & Sons. Inc., 2001.