

1

Introdução

Neste trabalho a estrutura resultante da interação entre a expansão de um escoamento reativo supersônico e a onda de detonação oblíqua suportada por um diedro de comprimento finito é estudada numericamente. A geometria de interesse, mostrada na fig. 1.1, é formada por um diedro de semi ângulo δ . Este diedro possui uma rampa, a qual é defletida para limitar o comprimento desta, tornando assim a superfície do diedro paralela à direção do escoamento livre. Nesta geometria a onda de choque oblíqua (OCO) estabilizada pela rampa inicia o processo de combustão, o qual resulta em uma onda de detonação oblíqua (ODO). As ondas de expansão que emanam do ponto de deflexão interceptam a ODO enfraquecendo-a. Dependendo das condições do escoamento livre e do ângulo do diedro, o resultado desta interação pode ser uma onda do tipo Chapman-Jouguet (ODO CJ), ou a extinção do processo de combustão. A ODO CJ leva a um processo de combustão mais eficiente e encontra uma aplicação importante em sistemas propulsivos. Isto é devido a um menor acréscimo de entropia obtido através de uma ODO CJ quando comparado à ODO fortes [1].

O objetivo principal deste trabalho é avaliar parâmetros do escoamento livre que levem a obter ondas de detonação tipo Chapman-Jouguet (ODO CJ) como resultado da interação entre a ODO e a expansão.

Este estudo foi realizado utilizando-se um código numérico que resolve as equações governantes para uma mistura reativa de gases compressíveis baseado em um esquema de discretização *upwind* do tipo volumes finitos em malhas não estruturadas [2]. Com a finalidade de melhorar a resolução da malha em regiões onde gradientes fortes das propriedades do escoamento ocorrem, utilizou-se uma técnica de refinamento adaptativo [3]. Uma vez que refinamentos sucessivos acarretam incrementos significativos no número de volumes, surgem então regiões onde uma grande concentração de volumes elementares não é mais necessária. Assim, é desejável incrementar nestes locais a dimensão das células de cálculo, com a finalidade de reduzir tempo de processamento. É parte deste trabalho o desenvolvimento e a imple-

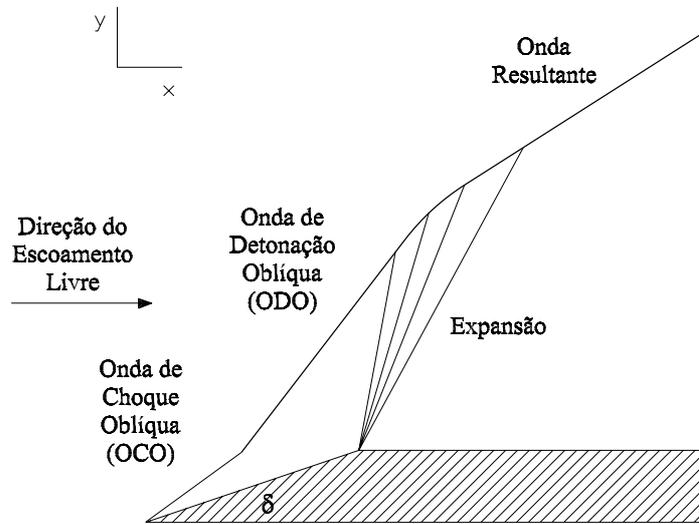


Figura 1.1: Esquema representativo da iniciação de uma onda de detonação oblíqua por um diedro e sua interação com um leque de expansão.

mentação de um procedimento de empobrecimento de malha que amplia as escalas espaciais onde não ocorrem variações fortes das propriedades do escoamento.

A proposta de sistemas de propulsão para veículos desenvolvendo velocidades hipêrsonicas data dos anos 1950 [4]. Neste âmbito o estato-jato (*ramjet*), mostrado na fig. 1.2, é um dispositivo de propulsão supersônica aeróbica usado na faixa de números de Mach entre 2 e 5, no qual o escoamento é desacelerado no difusor até velocidades subsônicas por um trem de ondas de choque. Uma vez que o combustível é injetado, o processo de combustão ocorre em regime subsônico.

Em regimes de vôo hipersônico a desaceleração até velocidades subsônicas já não é mais conveniente, porque implicaria, por um lado, em um incremento excessivo na pressão que, por sua vez, acarreta problemas estruturais no combustor, e por outro lado em um grande incremento da temperatura. A temperatura após o trem de ondas de choque pode tornar-se muito próxima da temperatura da chama adiabática, o que resultaria na dissociação do combustível sem que uma força propulsiva fosse produzida. Surge assim a necessidade de manter o escoamento em regime supersônico no interior da câmara de combustão quando o processo de combustão ocorre. Dois sistemas propulsivos que utilizam a combustão em escoamento supersônicos foram propostos. O primeiro é conhecido como o estato-jato supersônico

(*scramjet*, [4, 5]), o qual, embora similar ao *ramjet*, guarda como diferenças que a combustão ocorre em regime supersônico e a tubeira necessária para acelerar o escoamento após o combustor é de geometria divergente. Um esquema deste dispositivo é mostrado na fig. 1.3. Diversos protótipos deste tipo de motor foram desenvolvidos nos Estados Unidos, Rússia e França, mas com sucesso propulsivo limitado. No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais vem realizando pesquisas destinadas a apreender esta tecnologia [6, 7].

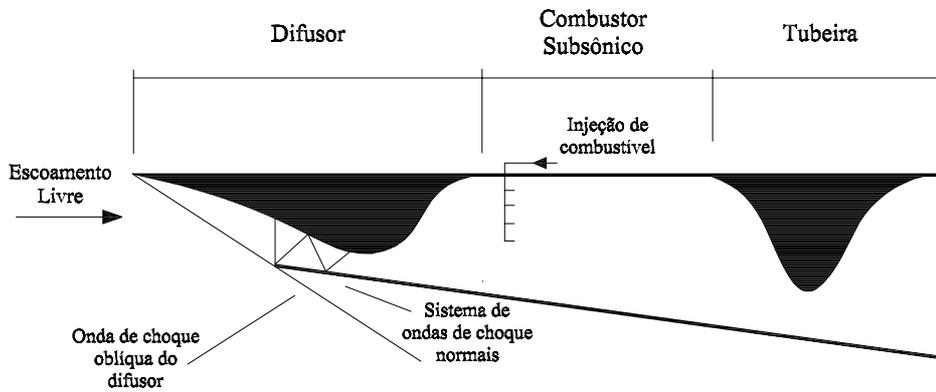


Figura 1.2: Esquema Representativo de um estato jato (*Ramjet*) [4].

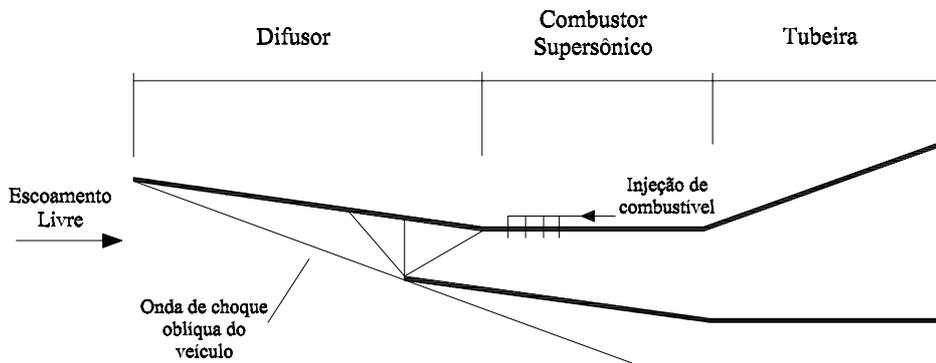


Figura 1.3: Esquema representativo de um estato jato supersônico (*Scramjet*) [4].

O segundo sistema propulsivo sugerido utiliza ondas de detonações oblíquas para ignitar a mistura combustível. Este sistema proposto é conhecido como motor a onda de detonação oblíqua (*ODWE oblique detonation wave engine*, [4]). Neste tipo de dispositivo, a mistura reativa, ao se encontrar com um diedro, gera uma onda de detonação oblíqua, sendo em seguida acelerada por um divergente. A fig. 1.4 mostra um esquema de um *ODWE*.

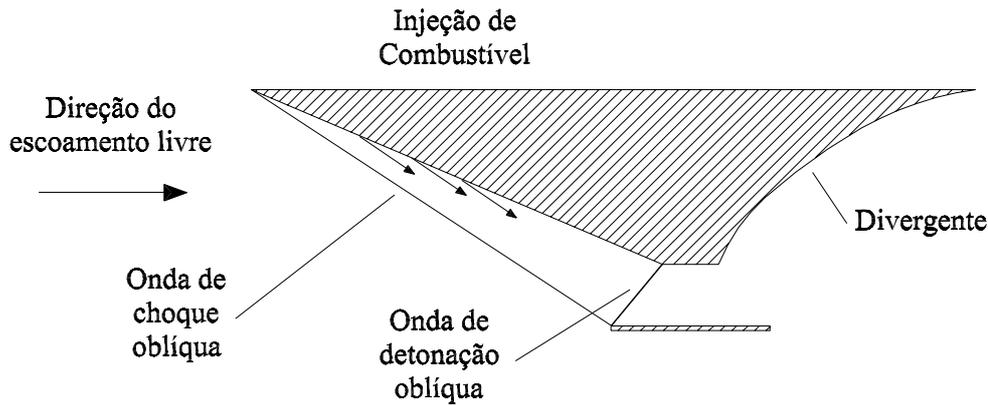


Figura 1.4: Esquema representativo de um motor a detonação oblíqua (*ODWE*) [4].

Cabe mencionar que o conceito de *scramjet* tem sido adotado pelos programas de veículos hipersônicos norte-americanos. O *NASP (National Aero-Space Plane* [8]), cancelado a finais do ano 1994, e o atual *Hyper-X* [9], o qual testará três veículos X-43A, dois deles a número de Mach 7 e o outro a número de Mach 10, são baseados no conceito do *scramjet*. O *ODWE* ainda encontra problemas relacionados a forma de misturar de maneira segura o combustível com o ar, o que tem dificultando a construção de um dispositivo deste tipo.

O acelerador a efeito estato-jato (*ram accelerator*, [4]) também faz uso de detonações oblíquas para acelerar projéteis a velocidades hipersônicas. Neste dispositivo, mostrado na fig. 1.5, os projéteis são previamente acelerados a velocidades supersônicas de tal forma que detonações oblíquas possam ser sustentadas. A partir desta velocidade mínima, detonações oblíquas são responsáveis por acelerar os projéteis. O *ram accelerator* vem sendo estudado nos Estados Unidos, Europa e Japão com resultados encorajadores.

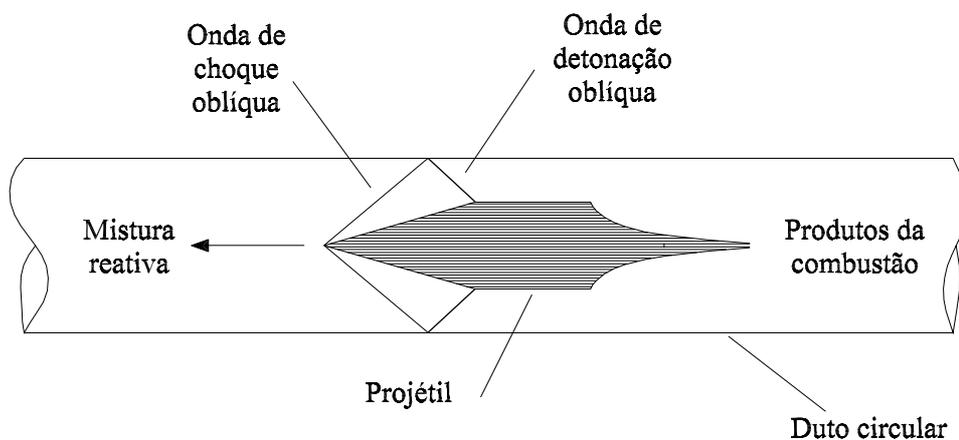


Figura 1.5: Esquema representativo de um acelerador a efeito estato-jato (*Ram accelerator*) [4].

Esta aplicação de ondas de detonação a sistemas propulsivos tem suscitado diversos estudos fundamentais relacionados à combustão induzida por onda de choque e à iniciação e estabilização de ondas de detonação.

Lehr [10], em seu extenso trabalho experimental, obteve imagens Schlieren de detonações e deflagrações suportadas por projéteis esférico-cilíndricos e cônico-cilíndricos. No caso de projéteis esférico-cilíndricos, observou-se combustão pulsante em misturas hidrogênio-ar quando a velocidade do modelo se aproxima da velocidade da detonação Chapman-Jouguet da mistura. O modelo de interação de ondas proposto por Alpert & Toong [11] é aceito para explicar o aparecimento destas pulsações. Estudos experimentais sobre ondas de detonação oblíquas suportadas por diedros são encontradas nos trabalhos de Morris *et al.* [12, 13] e Viguier *et al.* [14].

Diversos estudos numéricos sobre a iniciação e a estabilização de ondas de detonação oblíquas podem ser encontrados na literatura. Yungster *et al.* [15] e mais recentemente Choi *et al.* [16] simularam alguns casos dos experimentos de Lehr em geometrias esférico-cilíndricas. Estudos numéricos de ondas de detonação oblíquas suportadas por diedros podem ser encontrados nos trabalhos de Li *et al.* [17], Thaker & Chelliah [18], Grismer & Powers [19], Vlasenko & Sabelnikov [20], e Figueira da Silva & Deshaies [21]. Uma análise mais extensa da bibliografia é postergada até o quarto capítulo.

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos. No segundo capítulo apresenta-se o sistema de equações diferenciais governantes do escoamento reativo, juntamente com as simplificações utilizadas para a modelagem do

problema. Neste mesmo capítulo são brevemente apresentados o método numérico utilizado, e a técnica de refinamento adaptativo da malha computacional.

No terceiro capítulo apresenta-se o procedimento de empobrecimento adaptativo da malha, desenvolvido neste estudo. Testes usando este procedimento sobre a geometria de interesse para o caso de escoamento supersônico inerte são também apresentados, com ênfase no desempenho do procedimento desenvolvido.

Os resultados da interação entre a onda de detonação oblíqua e a expansão são apresentados no quarto capítulo. Um estudo quase-unidimensional que envolve as polares de choque-detonação e o diagrama dos tempos de indução da reação química é apresentado com vistas a determinar possíveis condições que levam a obter detonações CJ. Neste capítulo simulações numéricas sobre diedros de comprimento finito são discutidas. Finalmente no quinto capítulo são apresentadas as conclusões e perspectivas deste estudo.