



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING  
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil  
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## ANÁLISE NUMÉRICA DE REDUÇÃO DE ARRASTO POR DEPOSIÇÃO CONTÍNUA DE ENERGIA EM ESCOAMENTOS DE ALTAS VELOCIDADES

André Carlos Fraile Júnior, [fraile@ieav.cta.br](mailto:fraile@ieav.cta.br)  
Maurício Antoniazzi Pinheiro Rosa, [pinheiro@ieav.cta.br](mailto:pinheiro@ieav.cta.br)

Instituto de Estudos Avançados, Rod. dos Tamoios, km 5,5 – Putim – CEP 12.228-001, São José dos Campos – SP – Brasil

**Resumo:** Um estudo computacional de deposição de energia no escoamento a montante de corpos rombudos com face frontal plana (geometrias 2D e axissimétrica) em velocidades supersônicas, para o propósito de redução de arrasto aerodinâmico, é apresentado. Os resultados mostrados aqui correspondem à deposição contínua de energia (fonte estacionária) no escoamento. Efeitos da potência e da distância ao corpo da fonte de calor sobre o arrasto são apresentados para ambas geometrias. Resultados que mostram as modificações nas estruturas da onda de choque e do escoamento com a adição contínua de energia ao escoamento são apresentados. Verifica-se que a deposição contínua de energia no escoamento é capaz de reduzir consideravelmente o arrasto aerodinâmico de corpos rombudos em velocidades supersônicas.

**Palavras-chave:** escoamento supersônico, redução de arrasto, adição de energia, corpo rombudo, análise numérica

### 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos têm sido realizados nos últimos anos com o intuito de se investigar formas eficazes de reduzir o elevado arrasto aerodinâmico encontrado em veículos supersônicos. No caso específico de veículos de reentrada atmosférica, que têm a forma de corpo rombudo para reduzir o aquecimento aerodinâmico típico de missão para a qual foram projetados, os arrastos causados por ondas de choque fortes, que surgem devido à forma do veículo, devem ser compensados por sistemas de propulsão capazes de gerar elevadas potências de tração e de carregar grandes volumes de combustível.

Uma maneira de se reduzir o arrasto de onda, ou seja, aquele devido à alta pressão existente atrás da onda de choque formada à frente do veículo em forma de um corpo rombudo, consiste em modificar de alguma forma o formato geométrico de ondas de choque características de corpos rombudos para um formato próximo a de ondas de choque oblíquas, às quais se associa uma menor compressão do escoamento, e conseqüentemente um menor arrasto aerodinâmico. Neste sentido, um dos métodos empregados para produzir um choque com essas características consiste em inserir uma pequena região de perturbação a montante do corpo — essa perturbação pode corresponder a um obstáculo físico, ou até mesmo ao próprio fluido energizado. Embora a inserção de um obstáculo físico (comumente denominado *physical spike*) seja suficiente para obter uma redução de arrasto considerável (Riggins, 1999), as tensões térmicas inerentes a um obstáculo nesse tipo de escoamento trazem um novo problema para o vôo de um veículo supersônico — a necessidade de redução do aquecimento aerodinâmico dessa estrutura por meio de sistemas de resfriamento (Takaki, 2002). Por outro lado, a energização de uma pequena região do escoamento (ou, como é comumente denominada, adição de energia ao escoamento) não traz a inconveniência de se empregar um sistema de resfriamento adicional no veículo e, além de se prestar à redução do arrasto aerodinâmico, quando empregada em condições apropriadas pode também ser útil para outras aplicações, tais como: controle e estabilidade do veículo, otimização de entradas supersônicas de ar em motores do tipo scramjet uma possível redução da taxa de transferência de calor para o corpo, etc (Shneider, 2003). É necessário ressaltar que são empregadas atualmente como principais formas de adição de energia ao escoamento: arcos de plasma, pulsos de laser, microondas, feixes de elétrons, descarga luminosa (*glow*), dentre outras (Knight, 2008).

Estudos experimentais, com o emprego de túneis de choque hipersônicos, vêm sendo continuamente realizados no Laboratório de Aerotermodinâmica e Hipersônica Prof. Henry T. Nagamatsu (LAH) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), com o intuito de se estudar aplicações da adição de energia em escoamentos hipersônicos, tais como para redução de arrasto aerodinâmico e de transferência de calor em corpos rombudos (Minucci, 2005; Oliveira, 2008; Salvador, 2005), dentre outras. Assim sendo, há também a necessidade de se desenvolver cálculos numéricos, no âmbito

do IEAv, que permitam simular estes experimentos não somente para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, pois nos experimentos existem limitações do que pode ser medido, mas também para promover o planejamento de experimentos com maior eficiência. As análises apresentadas aqui fazem parte de um estudo mais geral em redução de arrasto aerodinâmico, sob o aspecto da termodinâmica e dinâmica dos gases, que deverá envolver deposição de energia no escoamento, tanto na forma contínua quanto na pulsada, com o intuito de modificar e atenuar características da onda de choque ao redor de corpos rombudos em altas velocidades. Neste estudo, considera-se que a deposição de energia efetivamente representa a transferência direta de energia ao modo translacional (térmico) do ar no volume energizado. Neste trabalho é apresentada uma série de resultados referentes a cálculos numéricos do escoamento com adição contínua de calor, resolvendo as equações de Navier-Stokes para o caso específico de escoamento livre a Mach 4 e considerando o modelo de gás caloricamente perfeito. Neste estudo inicial, tanto modelos quanto geometria do problema foram, em alguns aspectos, simplificados para facilitar os cálculos e a interpretação dos fenômenos envolvidos. Resultados que mostram os efeitos sobre o arrasto aerodinâmico da potência e da distância ao corpo da fonte de calor são apresentados considerando o corpo como um obstáculo de tipo degrau (bidimensional em coordenadas cartesianas) ou cilíndrico (axissimétrico em coordenadas cilíndricas).

## 2. MODELO E METODOLOGIA COMPUTACIONAL

### 2.1. Descrição do Problema

O problema em questão pode ser interpretado como um corpo estacionário num escoamento uniforme com Mach 4, no qual se insere uma fonte de energia a montante do corpo. O corpo pode ser um obstáculo do tipo degrau (bidimensional em coordenadas cartesianas) ou cilíndrico (axissimétrico em coordenadas cilíndricas). A seção transversal do escoamento é a mesma para ambos os casos — a fonte de energia é centrada no plano de simetria do corpo a uma distância  $d_c$  deste. A Figura (1) apresenta esquematicamente a geometria do problema — devido à simetria, apenas metade da seção transversal é apresentada na Fig. (1); a solução numérica do problema também explora a propriedade de simetria dos escoamentos estudados, de forma que o domínio numérico tem disposição geométrica de seus elementos similar à dos elementos da Fig. (1), com condição de contorno de simetria (ou de eixo de simetria, no caso em que o corpo é cilíndrico) na fronteira inferior da figura.

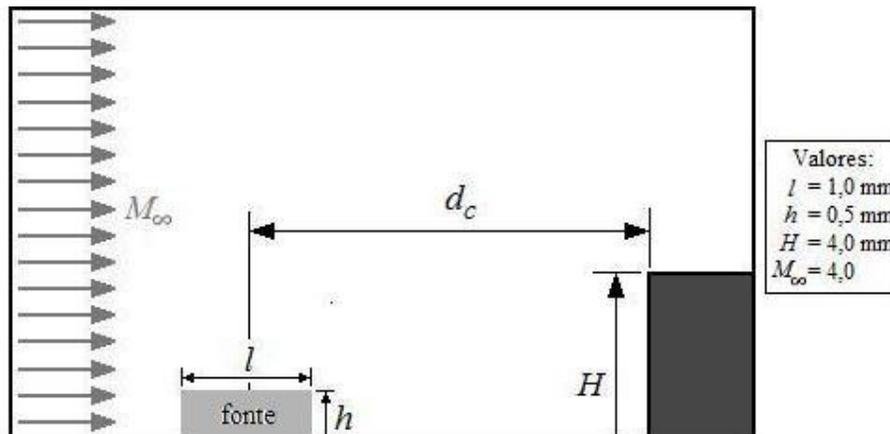


Figura 1. Esquema da disposição geométrica dos elementos do problema.

Assim, no caso axissimétrico, a fonte e o obstáculo são cilindros com raio de base  $h$  e  $H$ , respectivamente. Além disso, a fonte fornece continuamente energia ao escoamento com distribuição uniforme na região que ela ocupa no espaço — nos resultados apresentados, um dos parâmetros do problema a serem analisados é a potência total fornecida ao escoamento no caso axissimétrico, enquanto no caso bidimensional cartesiano o parâmetro correspondente é a potência por unidade de comprimento (na direção perpendicular à seção transversal do escoamento). Também são apresentados resultados referentes à influência da modificação da distância  $d_c$  da fonte ao corpo em relação às principais características do escoamento.

### 2.2. Formulação Matemática

As equações a serem resolvidas no problema correspondem às equações de Navier-Stokes para escoamento laminar compressível, considerando, ainda, um termo fonte constante na equação de energia, na forma de densidade volumétrica de potência, presente apenas na região do domínio matemático em que se encontra a fonte. A deposição de energia efetivamente representa uma transferência direta de energia para o modo térmico do ar dentro do volume energizado. A equação de estado associada é a para gás perfeito e considera-se o ar como um gás caloricamente perfeito. Para a realização dos cálculos numéricos, foi empregado o *software* comercial FLUENT®.

Os parâmetros adimensionais empregados para a análise dos problemas são:

- Razão de coeficientes de arrasto entre o caso com adição de energia ( $C_{D,m}$ ) e sem fonte ( $C_{D,0}$ ):

$$R_D = C_{D,m}/C_{D,0} \quad (1)$$

Note que este parâmetro também pode ser escrito como a razão entre os arrastos nos casos em que há deposição de energia ( $D_m$ ) e aquele em que não há ( $D_0$ ) ou, ainda (de forma simplificada para o caso em que o corpo corresponda a uma aeronave supersônica), como a razão entre as potências de cruzeiro (isto é, potência necessária para que a tração do corpo se iguale ao arrasto e ele se mova com velocidade constante  $V_\infty$ , o que pode ser escrito como  $D \cdot V_\infty$ ) nos casos com e sem deposição de energia  $(D_m V_\infty)/(D_0 V_\infty)$ .

- Eficiência de deposição de energia, correspondente à potência economizada ( $Q_0 - Q_m$ ) devido à presença da fonte por unidade de potência adicionada ao escoamento pela fonte ( $Q_d$ ):

$$S = (Q_0 - Q_m)/Q_d = (D_0 - D_m) \cdot V_\infty / Q_d \quad (2)$$

Como se deseja uma redução de arrasto significativa para os menores valores possíveis de potência depositada, os casos de interesse são aqueles que apresentam altos valores de  $S$  e pequenos valores de  $R_D$ .

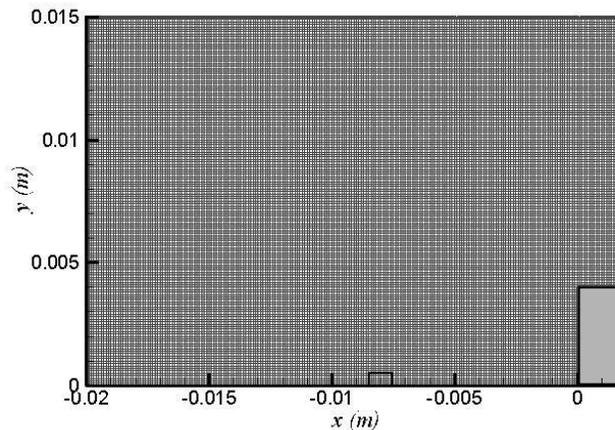
### 2.3. Condições de Simulação

Nos cálculos realizados, foram empregados os parâmetros apresentados na Tab. (1).

**Tabela 1. Grandezas empregadas nas simulações.**

Grandeza	Valor
Temperatura de escoamento livre ( $T_\infty$ )	300 K
Pressão de escoamento livre ( $p_\infty$ )	$1,0 \times 10^5$ Pa
Mach do escoamento livre ( $M_\infty$ )	4,0
Temperatura de parede ( $T_w$ )	1000 K
Razão de calores específicos ( $\gamma$ )	1,4

As dimensões da malha empregada para a realização dos cálculos, com uma fonte de energia cujo centro geométrico está a 8 mm de distância do corpo, são mostradas na Fig. (2), considerando ainda, que os principais elementos do problema (fonte de energia e corpo) são dispostos como mostrado na Fig. (1), e que a origem do sistema de coordenadas adotado se encontra na intersecção do eixo de simetria com a parede do corpo. O grau de refinamento da malha é 10 células por milímetro nas direções  $x$  e  $y$  da Fig. (2). A região de deposição de energia tem comprimento  $H/4$  (direção  $x$ ) e altura  $H/8$  (direção  $y$ ).



**Figura 2. Domínio computacional.**

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. Efeito da Deposição de Energia no escoamento

Os resultados apresentados nesta Seção têm o objetivo ilustrar os principais efeitos da deposição de energia sobre o escoamento e arrasto aerodinâmico do corpo.

Um dos efeitos no escoamento gerado pela adição de energia pode ser visualizado na Fig. (3), em que são mostrados os campos de pressão para o caso de escoamento axissimétrico em que não há deposição de energia e para o caso em que a potência depositada é de 47 W e a distância do centro da fonte ao corpo é de 8 mm.

No caso sem a fonte (Fig. (3.a)), o choque é bastante forte (quase “normal”) por uma boa extensão da superfície frontal do corpo até bem próximo à sua extremidade, o que produz elevados valores de pressão sobre o corpo. Já com a presença da fonte (Fig. (3.b)), a estrutura do escoamento é modificada e o contorno da onda de choque adquire um aspecto mais inclinado em relação à direção do escoamento livre, o que é uma característica de onda de choque mais fraca — essa onda de choque deve produzir uma região de menor pressão na parede do corpo em relação ao caso sem deposição de energia. À medida que se aproxima do eixo de simetria, o choque adquire novamente o aspecto de um choque normal, mas de menor intensidade. Pode-se notar nestas figuras que o campo de pressão à frente do corpo no caso com fonte é mais brando do que no caso sem fonte, exceto numa pequena região na extremidade da superfície frontal do corpo. Estas observações são comprovadas na Fig. (4), a qual mostra as distribuições de pressão na superfície frontal do corpo para ambos os casos. Mesmo com uma elevação da pressão na extremidade da parte frontal do corpo (que tem um peso maior no cálculo do arrasto em geometria axissimétrica) para o caso com fonte (ver Fig. (4)), a integral dessa distribuição de pressão na superfície frontal do corpo resulta em uma redução do arrasto de aproximadamente 15%, para o caso específico desta deposição de energia, embora as observações mencionadas aqui sejam também válidas para outras condições de deposição de energia.

As propriedades do escoamento ao longo do eixo de simetria do corpo permitem identificar algumas características típicas de escoamentos com adição de energia e fornecem, ainda, formas quantitativas de se identificar a redução de arrasto. A Fig. (5) apresenta os resultados para pressão, temperatura e Mach, normalizados em relação a valores do escoamento livre, ao longo do eixo de simetria para os casos com e sem deposição de energia. Pode-se notar claramente uma elevação da temperatura do fluido ao passar pela região da fonte e que se mantém em regiões atrás desta também. Uma redução no número de Mach também é observada, a qual acompanha basicamente a variação na temperatura, o que justifica a pequena diminuição da intensidade do choque normal nesta linha de simetria, para o caso com fonte, verificada nestas figuras. O comportamento das grandezas mostradas na Fig. (5), e mais os resultados nas Fig. (3) e (4), é decorrência da formação de uma região de recirculação do fluido no interior do choque devido à deposição de energia, como pode ser observado na Fig. (6). Esta região de recirculação do fluido também tem sido observada por outros autores (Taguchi et al, 2007).

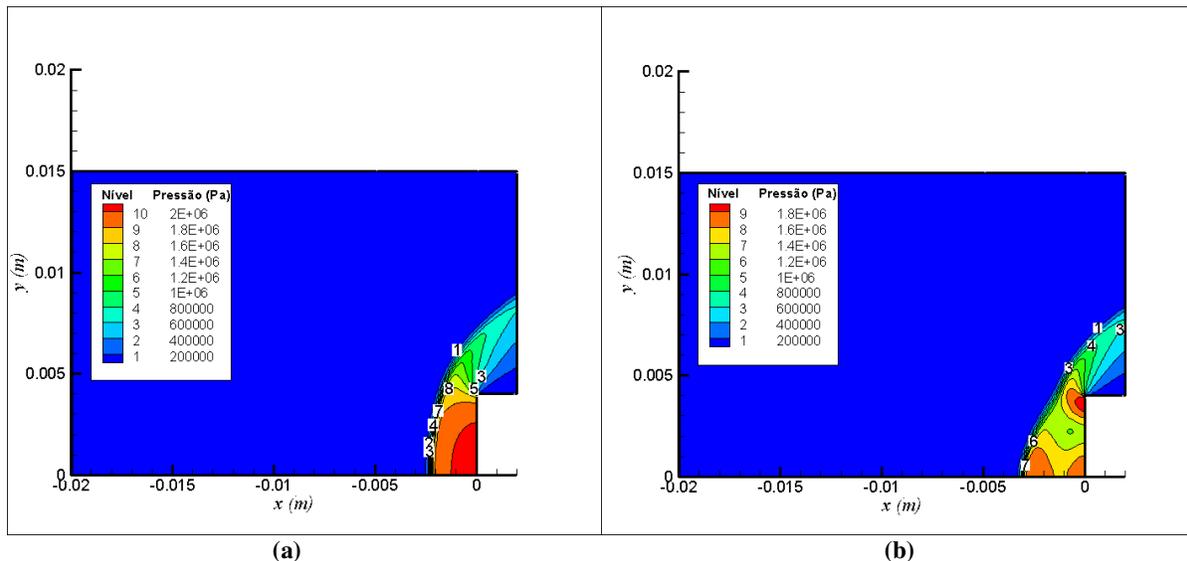


Figura 3. Campo de pressão (em Pa) para escoamento axissimétrico: (a) sem adição de energia; (b) com adição de 47 W a 8 mm do corpo.

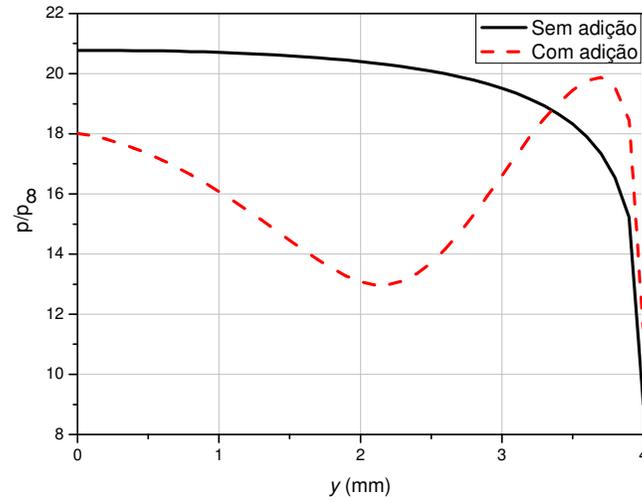


Figura 4. Variação da razão de pressão ao longo da superfície frontal do corpo cilíndrico nos casos sem adição de energia e com adição de 47 W a 8 mm do corpo.

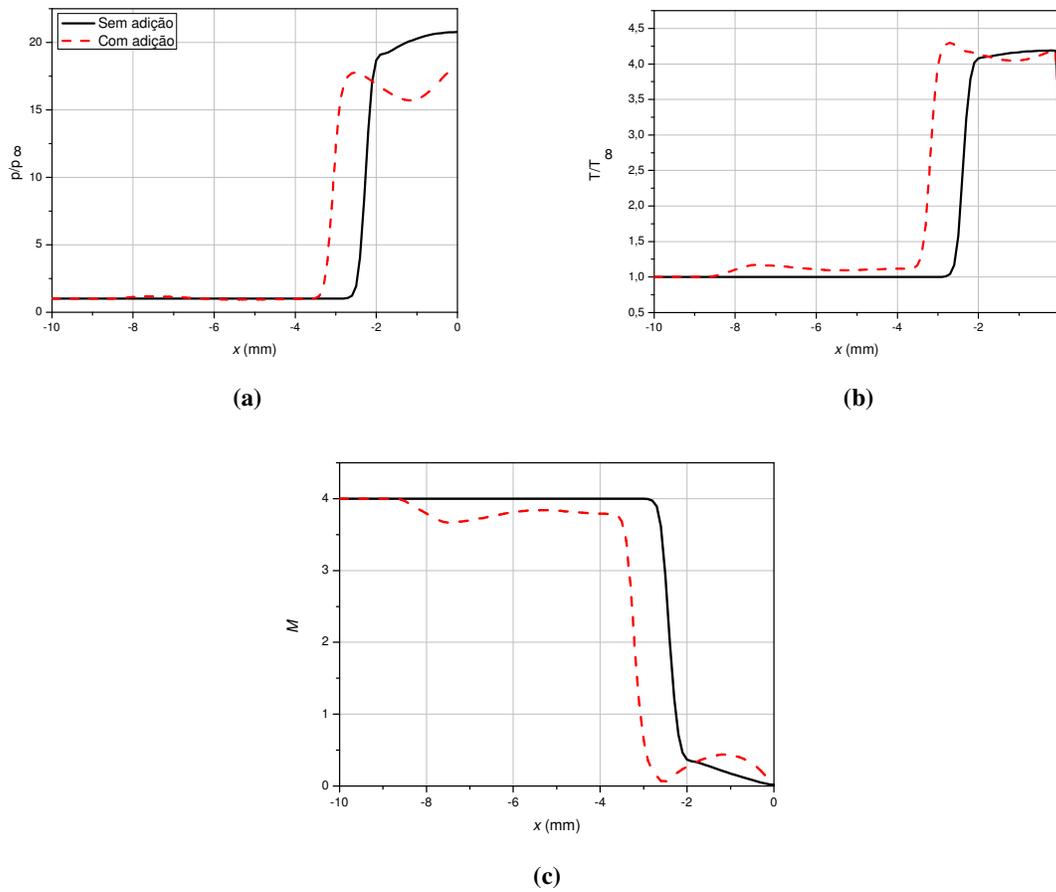


Figura 5. Variação de propriedades do escoamento ao longo do eixo de simetria para o caso axissimétrico sem e com adição de energia: (a) pressão; (b) temperatura; e (c) Mach.

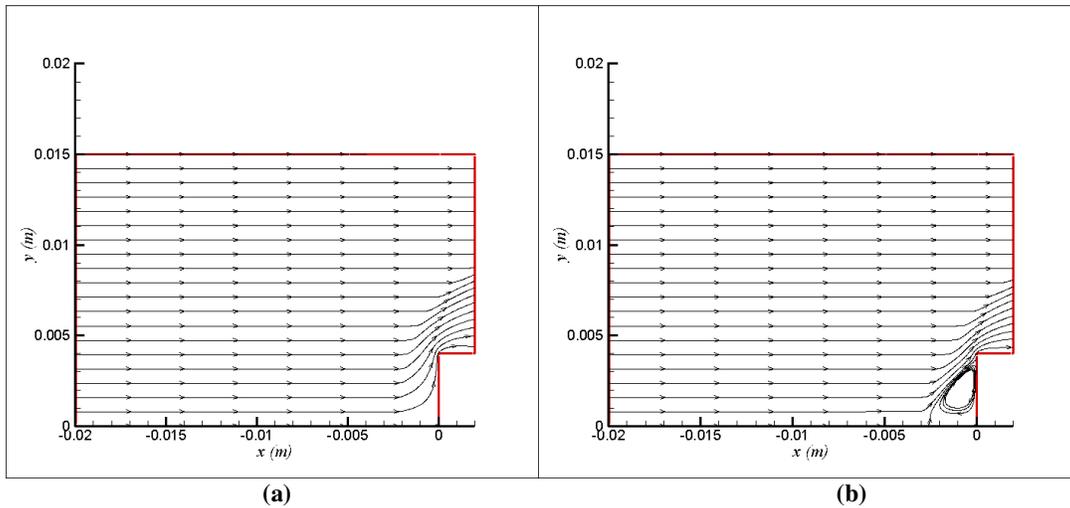


Figura 6. Linhas de corrente no escoamento: (a) sem deposição de energia; (b) com deposição de energia, com destaque para a região de recirculação formada próxima ao corpo.

### 3.2. Efeitos da Potência e da Distância da Fonte ao Corpo sobre o Arrasto Aerodinâmico.

As Figuras (7) e (8) a seguir apresentam resultados referentes aos casos em que foram variadas a potência e a distância da fonte ao corpo para geometrias axissimétrica e 2D, respectivamente. Resultados para a razão de coeficientes de arrasto ( $R_D$ ) e eficiência ( $S$ ) são apresentados, onde se definiu o parâmetro adimensional:  $\bar{d}_c = d_c/H$ .

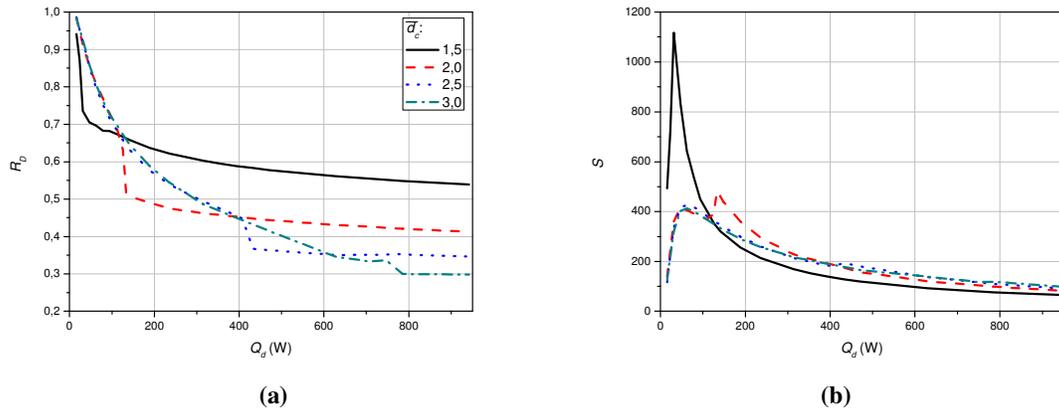


Figura 7. Influência da potência e da distância da fonte ao corpo para geometria axissimétrica em: (a)  $R_D$  e (b)  $S$ .

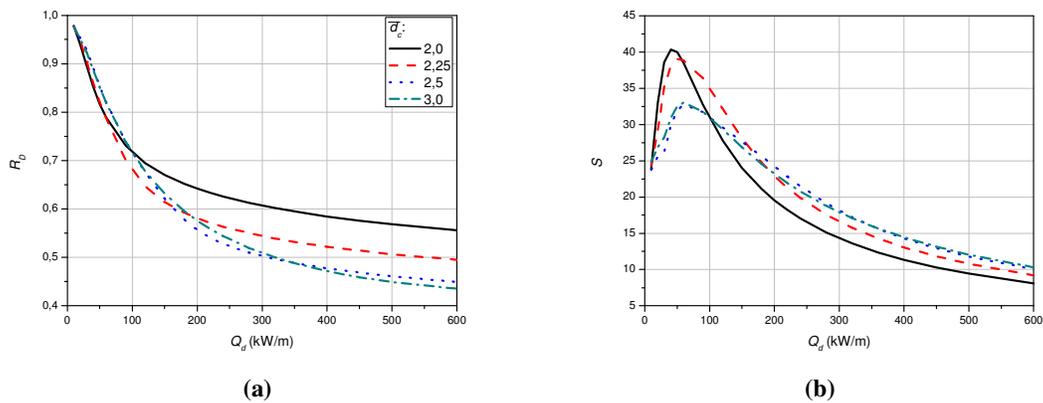


Figura 8. Influência da potência e da distância da fonte ao corpo para geometria 2D em: (a)  $R_D$  e (b)  $S$ .

Em ambos os casos, os resultados nas Fig. (7) e (8) indicam a tendência geral de diminuição do arrasto com o acréscimo de potência adicionada ao escoamento. Os resultados mostrados na Fig. (7), para o caso axissimétrico, indicam que, para o intervalo de potência considerado, essa redução pode ser superior a 60% com uma eficiência da ordem de 100. Já para o caso 2D, essa redução foi superior a 50% e eficiência de 10. Em ambos os casos, o emprego de adição de energia no escoamento mostrou-se bastante vantajoso para a redução de arrasto aerodinâmico, mas, na geometria axissimétrica, o procedimento mostrou-se mais eficiente. É visível, em ambos os casos que, em geral, a taxa de redução de arrasto diminui com o aumento da potência depositada. Diferentemente do caso 2D, na Fig. (7.b), os maiores valores de eficiência, em picos superiores a 450, estão relacionados a uma redução mais brusca do arrasto para potência adicionada ao escoamento, observada na Fig. (7.a). Estas situações tornam-se mais evidentes, para a faixa de potência  $Q_d$  escolhida, nos casos em que a fonte de energia se encontra mais próxima ao corpo. Também nesses casos, observa-se que quanto menor é a distância da fonte ao corpo, menor é a potência necessária para que a queda brusca do arrasto ocorra. Além disso, após a ocorrência dessa diminuição mais acentuada de arrasto, a redução de arrasto com a potência torna-se ainda mais gradual do que aquela para potências pequenas. Estas ocorrências não foram muito claras no caso bi-dimensional, embora a variação da eficiência forneça uma indicação de que estas ocorram também para este caso. Este comportamento da redução do arrasto com a potência e distância da fonte, isto é, diferentes taxas de redução de arrasto, ainda está sendo investigado e o resultado será apresentado futuramente.

Quanto ao efeito da distância da fonte ao corpo sobre o arrasto, para potências baixas da fonte, pelas razões aqui mencionadas, não foi possível estabelecer uma correlação muito precisa, mas estes resultados mostram que, quanto menor for a potência da fonte, mais próxima do corpo esta deve ser colocada. No entanto, a região ocupada pela fonte nunca deve situar-se, mesmo que em parte, dentro do choque original (sem a fonte), pois isto não causa os efeitos esperados no arrasto.

#### 4. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Foi realizada uma série de cálculos numéricos de escoamento supersônico com corpo de geometria cilíndrica ou bidimensional (degrau) e em que, em ambos os casos, foi depositada continuamente energia no escoamento em uma pequena região na simetria do domínio de cálculo, variando-se a magnitude dessa potência e a distância da fonte de energia ao corpo. Observou-se que a estrutura da onda de choque do corpo é modificada adquirindo um aspecto alongado típico de ondas de choque fracas com uma região de recirculação no seu interior à frente do corpo, e com conseqüente redução do arrasto aerodinâmico. Verificou-se uma constante redução do arrasto com o aumento da potência da fonte, mas com taxa de redução que pode variar significativamente dependendo da potência da fonte. Comportamento análogo observou-se para diferentes distâncias da fonte ao corpo. Embora os resultados indiquem que, para se ter uma maior redução do arrasto, seja necessário aproximar a fonte ao corpo para potências baixas (sem que haja interferência com o choque original), e afastar a fonte do corpo à medida que a potência da fonte é aumentada, o posicionamento da fonte ainda está sendo investigado, pois estes resultados são decorrentes das variações bruscas de arrasto com a potência.

A continuação dos estudos em redução de arrasto aerodinâmico por deposição de energia no escoamento considerará os efeitos da dispersão (volume da fonte) da deposição de energia e variação do número de Mach do escoamento livre ainda para deposição contínua. Uma fase posterior dos estudos considerará os efeitos da adição de energia pulsada.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Kandala, R. and Candler, G. V., 2004, "Numerical Studies of Laser-Induced Energy Deposition for Supersonic Flow Control", AIAA Journal, Vol. 42, no. 11, pp. 2266-2275.
- Knight, D., 2008, "Survey of Aerodynamic Drag Reduction at High Speed by Energy Deposition", AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 24, no. 6, pp. 1153-1167.
- Minucci, M. A. S. et al, 2005, "Laser-Supported Directed-Energy 'Air Spike' in Hypersonic Flow", AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 42, no. 1, pp. 51-57.
- Oliveira, A. C. et al, 2008, "Bow Shock Wave Mitigation by Laser-Plasma Energy Addition in Hypersonic Flow", AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 45, no. 5, pp. 921-927.
- Riggins, D. et al, 1999, "Blunt-Body Wave Drag Reduction Using Focused Energy Deposition", AIAA Journal, Vol. 37, no. 4, pp. 460-467.
- Salvador, I. I., 2005, "Determinação Experimental do Fluxo Térmico em um Corpo Rombudo em Regime Hipersônico com Adição de Energia à Montante", tese de mestrado, pp. 1-140.
- Shneider, M.N. et al, 2003, "Steady and Unsteady Supersonic Flow Control with Energy Addition", 34<sup>th</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, pp. 1-18.
- Taguchi, S. et al, 2007, "Numerical Analysis of Drag Reduction for supersonic Blunt Body by Pulse Energy Deposition", 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp. 1-8.
- Takaki, R. and Liou, M.-S., 2002, "Parametric Study of Heat Release Preceding a Blunt Body in Hypersonic Flow", AIAA Journal, Vol. 40, pp. 501-509.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# A NUMERICAL ANALYSIS OF DRAG REDUCTION AT HIGH SPEED BY STEADY ENERGY DEPOSITION

André Carlos Fraile Júnior, fraile@ieav.cta.br<sup>1</sup>

Maurício Antoniazzi Pinheiro Rosa, pinheiro@ieav.cta.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados, Rod. dos Tamoios, km 5,5 – Putim – CEP 12.228-001, São José dos Campos – SP – Brasil

**Abstract:** *A computational study of energy addition to the flow ahead of supersonic (Mach 4) flat face two-dimensional and axisymmetric blunt bodies for wave drag reduction is presented. The results shown here are for steady energy deposition in the flow. Effects of heat source power and distance from the body on the aerodynamic drag are presented for both geometries. Modifications in the shock wave structure and in the flow around the bodies caused by the energy addition to the flow are also shown and discussed. It has been shown numerically that steady energy addition to the flow is a very effective way of reducing wave drag in supersonic blunt bodies.*

**keywords:** *supersonic flow, wave drag reduction, energy addition, blunt body, numerical analysis*

## 1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.