

5

Análise dos Resultados

Neste capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos mediante o uso do código computacional existente, levando-se em conta as modificações que foram feitas. Nesta análise é examinado o processo de interação entre um jato supersônico, oriundo de um processo de combustão a alta pressão e temperatura, e uma rocha dura. Este tipo de processo pode resultar na perfuração de rochas duras por descamação térmica.

5.1.

Seleção do Domínio Computacional

Para escolher o melhor domínio computacional, foram testados vários tipos de malhas. As dificuldades encontradas dizem respeito à correta representação da interação entre o jato supersônico e a parede, quando da presença de ar inicialmente em repouso. Os resultados obtidos com as diversas escolhas de malhas nem sempre alcançaram os objetivos pretendidos.

Os resultados obtidos com estas malhas mostraram que, em algumas situações, as condições de contorno implementadas não cumpriam o papel esperado. Em muitos casos estas não eram suficientes para o desenvolvimento do problema, fazendo-se necessária a implementação de um outro tipo de condição de contorno, ou de ajustes na geometria. Depois de várias tentativas chegou-se a um modelo com o qual se obtiveram resultados coerentes no tocante ao desenvolvimento do jato.

A Figura 5.1 mostra uma primeira malha, com a qual esperava-se simular apenas as linhas de corrente no escoamento. Os resultados obtidos mostraram que a condição de contorno de deslizamento utilizada na fronteira de simetria não permitia a conservação de massa.

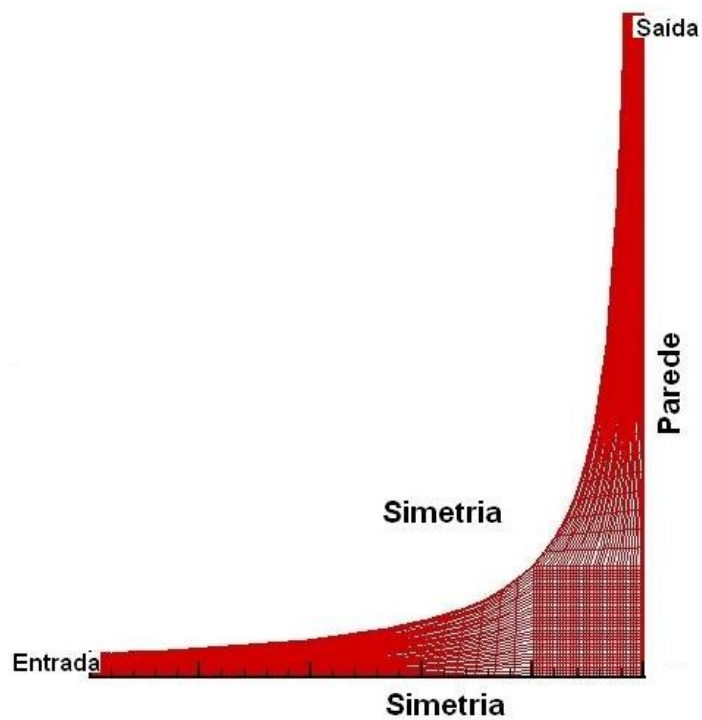


Figura 5.1: Malha 1, tentativa de se modelar apenas as linhas de corrente.

Na Figura 5.2 mostra-se a segunda malha desenvolvida, na qual o bocal supersônico é situado na entrada do domínio. Os resultados obtidos mostraram a existência de recirculações espúrias na vizinhança da fronteira de saída, as quais impossibilitaram a obtenção de uma solução computacional convergida.

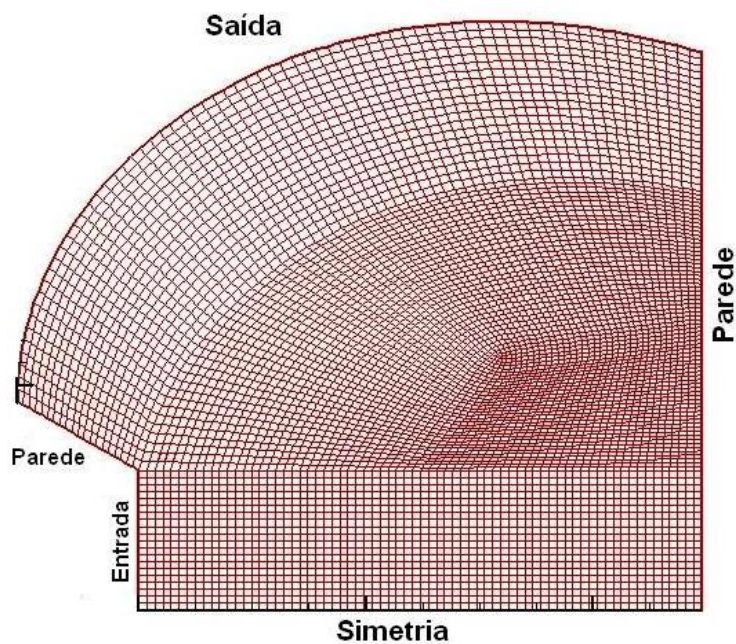


Figura 5.2: Malha 2, incluindo o bocal, com fronteira de saída próxima deste.

Na Figura 5.3 mostra-se a malha 3, a qual é o domínio selecionado para o desenvolvimento do problema. Neste domínio, mais extenso do que o anterior, foi incluída a condição de contorno de extrapolação. Com este domínio, as zonas de recirculação formadas durante o processo transiente não alcançaram a fronteira de saída.

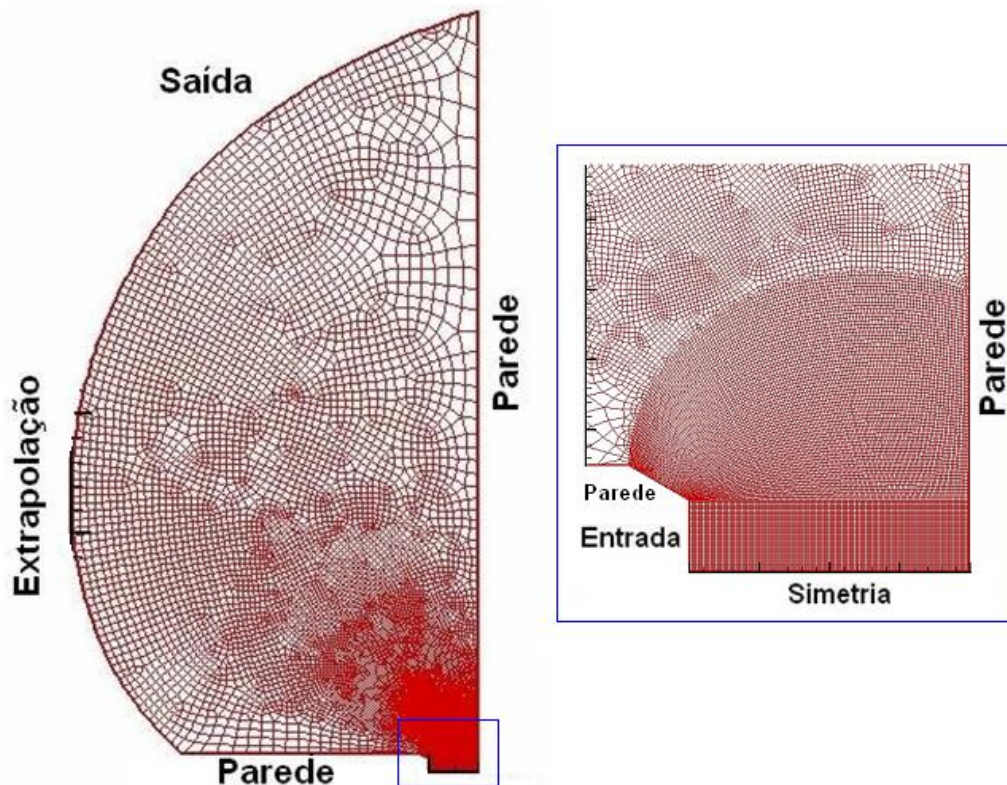


Figura 5.3: Malha 3, incluindo o bocal, com fronteira de saída distante deste.

5.2.

Estudo da Influência de Z/D e de p_1/p_0 na Estrutura do Escoamento

Visando determinar a influência da distância entre a saída do bocal e a superfície da rocha sobre o escoamento resultante, e em particular sobre a pressão no fundo da cavidade, foram realizadas simulações nas quais foi variada esta distância e a razão de pressões entre o jato e a superfície da parede.

A tabela 5.1 mostra os diversos valores da relação da distância que há entre o bocal e a parede e seu diâmetro, Z/D , utilizados durante este estudo. Para o desenvolvimento aqui apresentado foram considerados apenas dois

valores de distância adimensional, $Z/D = 15$ e 20 , e seis valores de razão de pressão estática entre o jato e a cavidade, $p_1/p_0 = 1; 1,5; 2; 2,5; 3; \text{ e } 5$. As malhas utilizadas são mostradas na Figura 5.4, note-se que o diâmetro do bocal é mantido constante para todos os casos, este valor é de $3,4$ cm.

Tabela 5.1 Valores da relação Z/D utilizados.

D (cm)	SOD = Z/D	Z (cm)
3,4	25	84,75
	20	67,8
	15	50,85
	10	33,90

Os diferentes valores do parâmetro **SOD** mostrados na tabela 5.1 tem como base o trabalho experimental de Wilkinson e Tester (1993a), que realizaram experiências de perfuração em amostras de rochas duras.

É de nosso interesse examinar as oscilações de pressão que podem estar presentes quando o escoamento é suposto laminar e todas as paredes são lisas e adiabáticas.

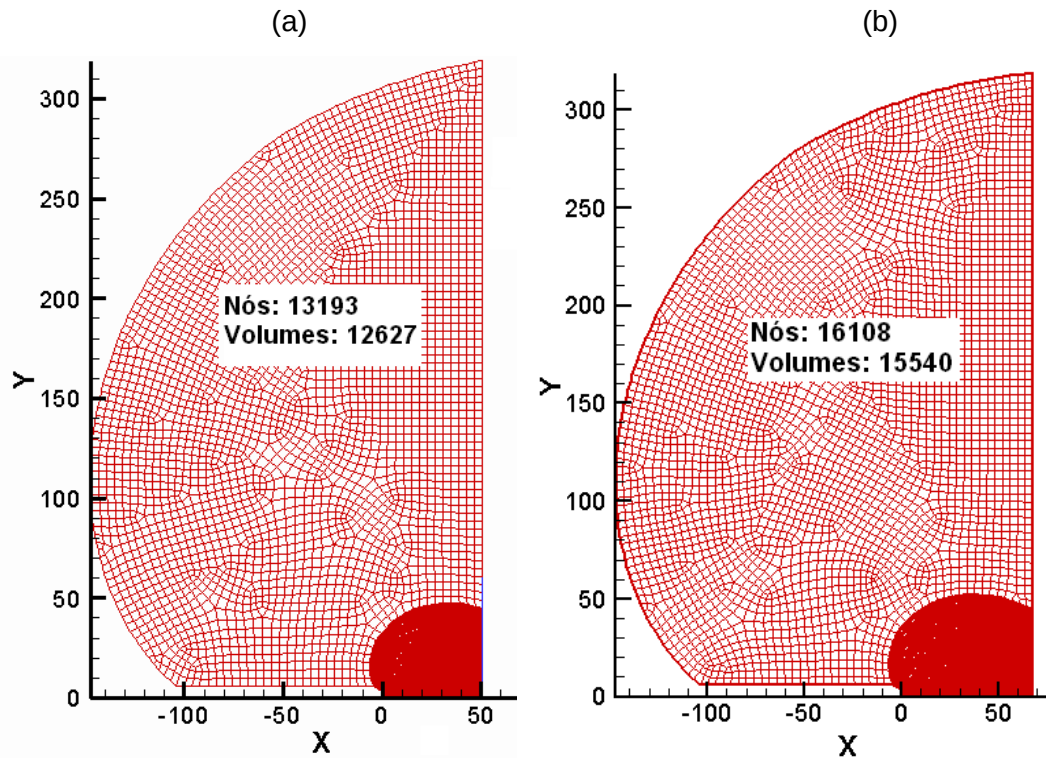


Figura 5.4: Malha utilizada para a análise da influência de Z/D , (a) $Z/D = 15$; (b) $Z/D = 20$.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos da estrutura do escoamento para diferentes valores de Z/D e p_1/p_0 .

5.2.1. Resultados Obtidos para uma Razão de Pressão de $p_1/p_0 = 1$

Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas de evolução do resíduo da densidade ao longo do número de iterações. Nesta figura é feita uma comparação do resultado obtido mantendo-se a mesma razão de pressões, $p_1/p_0 = 1$, e variando a distância entre a saída do jato e a parede Z/D . Observa-se que, para uma mesma razão de pressão, quanto mais afastada se encontra a saída do bocal da superfície da parede, é mais suave a variação do resíduo, mostrando apenas pequenas perturbações ao longo do processo de queda.

Para uma relação de $Z/D = 15$, a curva de resíduo da densidade apresenta um salto brusco, este pode indicar a presença da recirculação perto da parede, a qual pode ser devida à expansão do escoamento. No caso de $Z/D = 20$ a evolução do resíduo tem um aspecto mais suave tendendo a estabilizar-se, indicando assim que os fenômenos aerodinâmicos que estão presentes no escoamento se desenvolvem sem alterações bruscas.

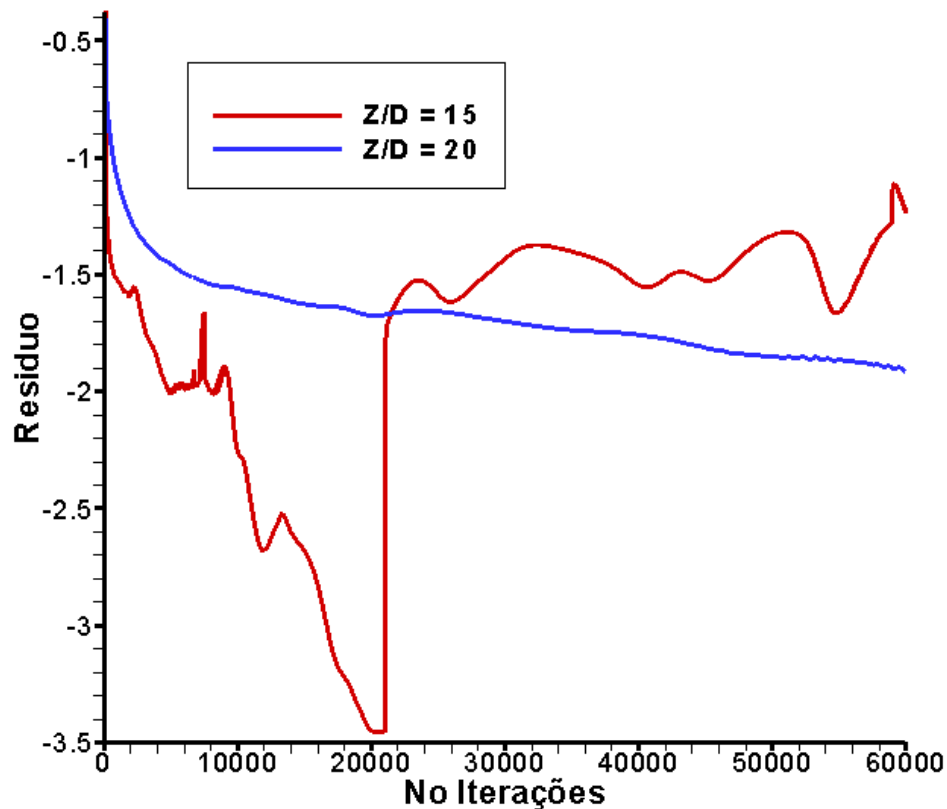


Figura 5.5: Evolução temporal do logaritmo do resíduo da densidade, para um razão de $p_1/p_0 = 1$ e diferentes distâncias entre a saída do bocal e a superfície.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram a evolução da pressão estática no escoamento, para as diferentes relações de Z/D , e uma mesma razão de pressão $p_1/p_0 = 1$. Cabe notar que, para a maior distância simulada, o valor da pressão apresenta oscilações de grande amplitude, estas se tornam ainda maiores quando é aumentada a razão de pressões.

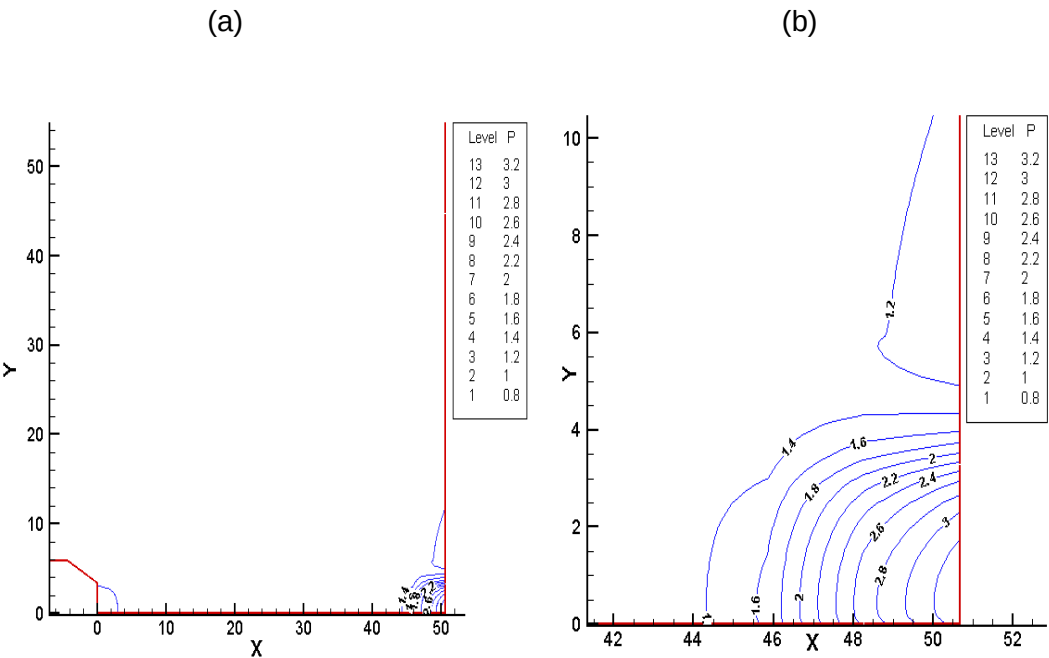


Figura 5.6: Evolução da pressão estática (atm) no escoamento para $Z/D = 15$ (a) vista englobando o bocal e a parede (b) na vizinhança da parede, distância em (cm).

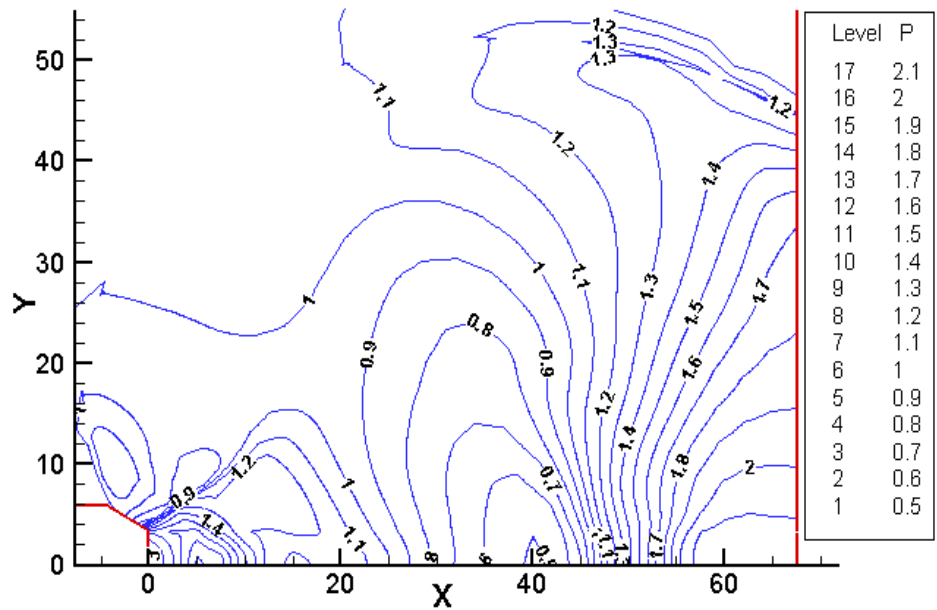


Figura 5.7: Evolução da pressão estática (atm) no escoamento para $Z/D = 20$, distância em (cm).

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram a evolução do número de Mach no escoamento para a razão de pressão, $p_1/p_0 = 1$ e os dois valores de Z/D

considerados. Nestas figuras pode-se observar que quanto mais afastada encontra-se a sonda de perfuração, maiores são as ondas de choque associadas à expansão do escoamento.

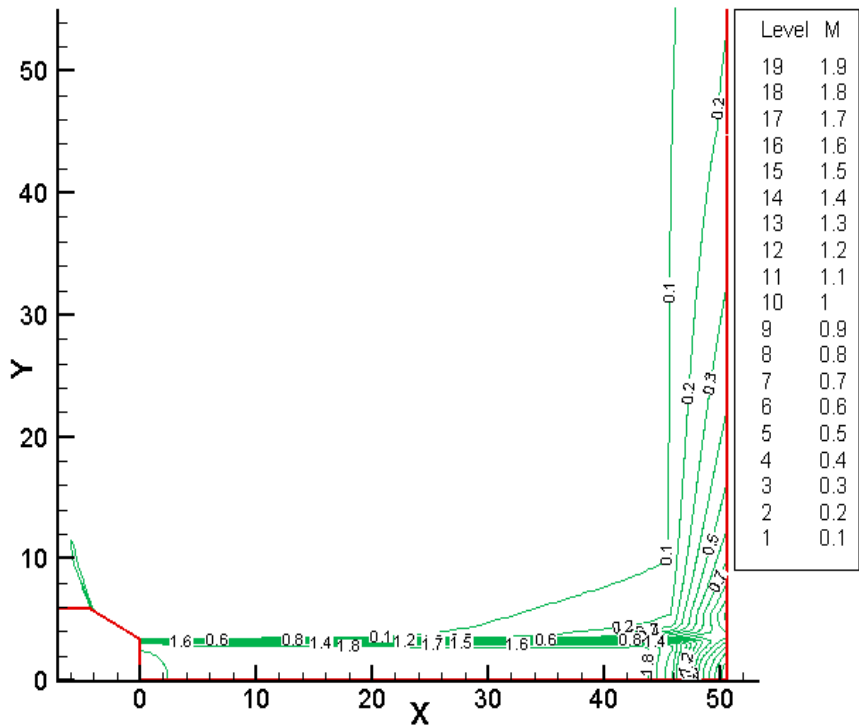


Figura 5.8: Evolução do número de Mach no escoamento para $Z/D = 15$, distância em (cm).

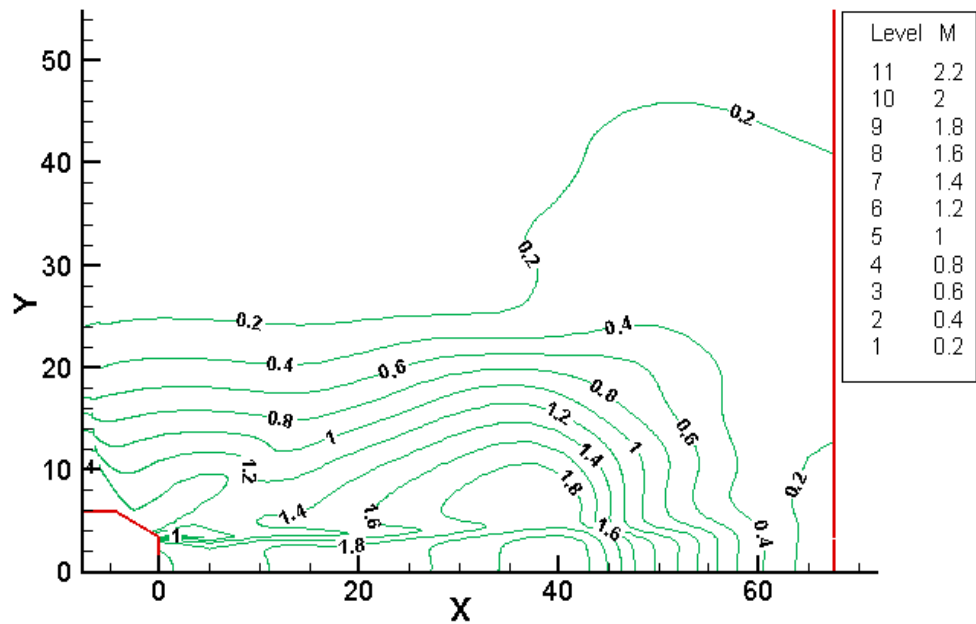


Figura 5.9: Evolução do número de Mach no escoamento para $Z/D = 20$, distância em (cm).

A Figura 5.10 mostra os campos de pressão e temperatura obtidos com $p_1/p_0 = 1$ $Z/D = 20$, entre o jato e a parede. Nesta figura observa-se o desenvolvimento do escoamento desde sua saída do queimador até o choque com a parede. As regiões onde ocorrem os máximos valores da pressão e da temperatura são vizinhança da parede.

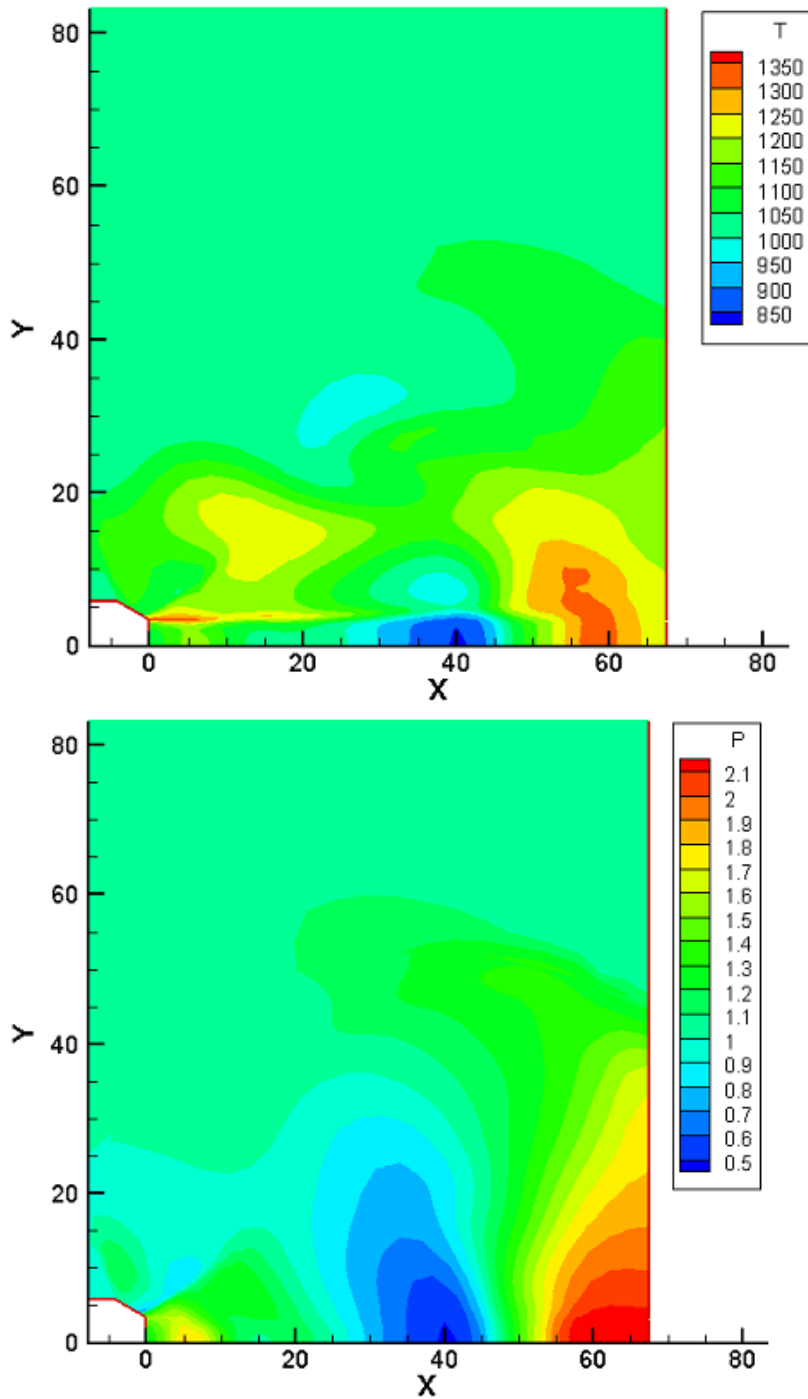


Figura 5.10: Pressão (atm) e Temperatura (K) para $Z/D = 20$ e $p_1/p_0 = 1$ distância em (cm).

5.2.2. Resultados Obtidos para uma Razão de Pressões $p_1/p_0 = 1,5$

Na Figura 5.11 mostra-se a evolução logarítmica do resíduo da densidade com o número de iterações, para a mesma razão de pressão e variando-se a distância da sonda de perfuração à parede. Nesta figura pode-se observar o salto brusco que apresenta o resíduo da densidade para uma relação de $Z/D = 15$. Este comportamento é análogo ao observado para $p_1/p_0 = 1$.

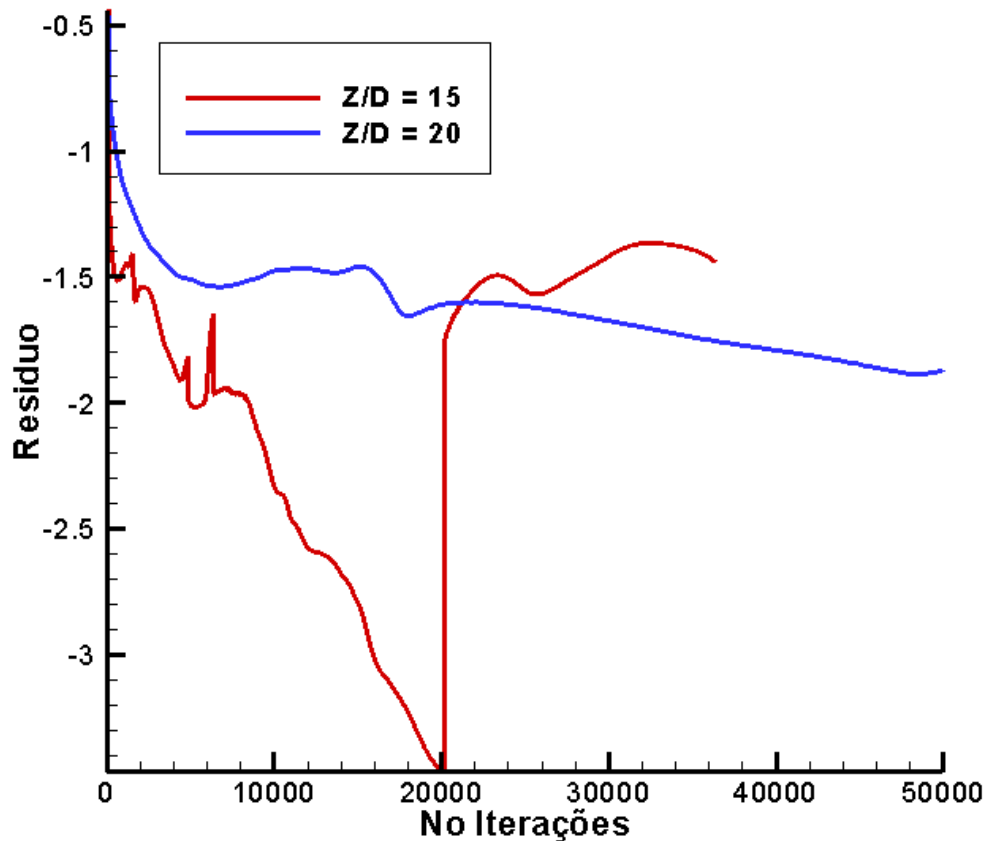


Figura 5.11: Evolução logarítmica do resíduo da densidade para uma razão de pressão de $p_1/p_0 = 1,5$ e diferentes relações de Z/D .

Comparando-se as Figuras 5.5 e 5.11 no caso de $Z/D = 20$, observa-se que ao maior valor de p_1/p_0 correspondem maiores flutuações do resíduo da densidade.

As Figuras 5.12 e 5.13 mostram a evolução da pressão e do número de Mach no escoamento, para mesma razão de pressão $p_1/p_0 = 1,5$ e diferentes relações de $Z/D = 15, 20$. A comparação das Figuras 5.7, 5.9, 5.12 e 5.13

mostram que, para um mesmo valor de $Z/D = 20$, um aumento da razão de pressão de $p_1/p_0 = 1$ para $p_1/p_0 = 5$, acarreta um aumento na intensidade das oscilações da pressão.

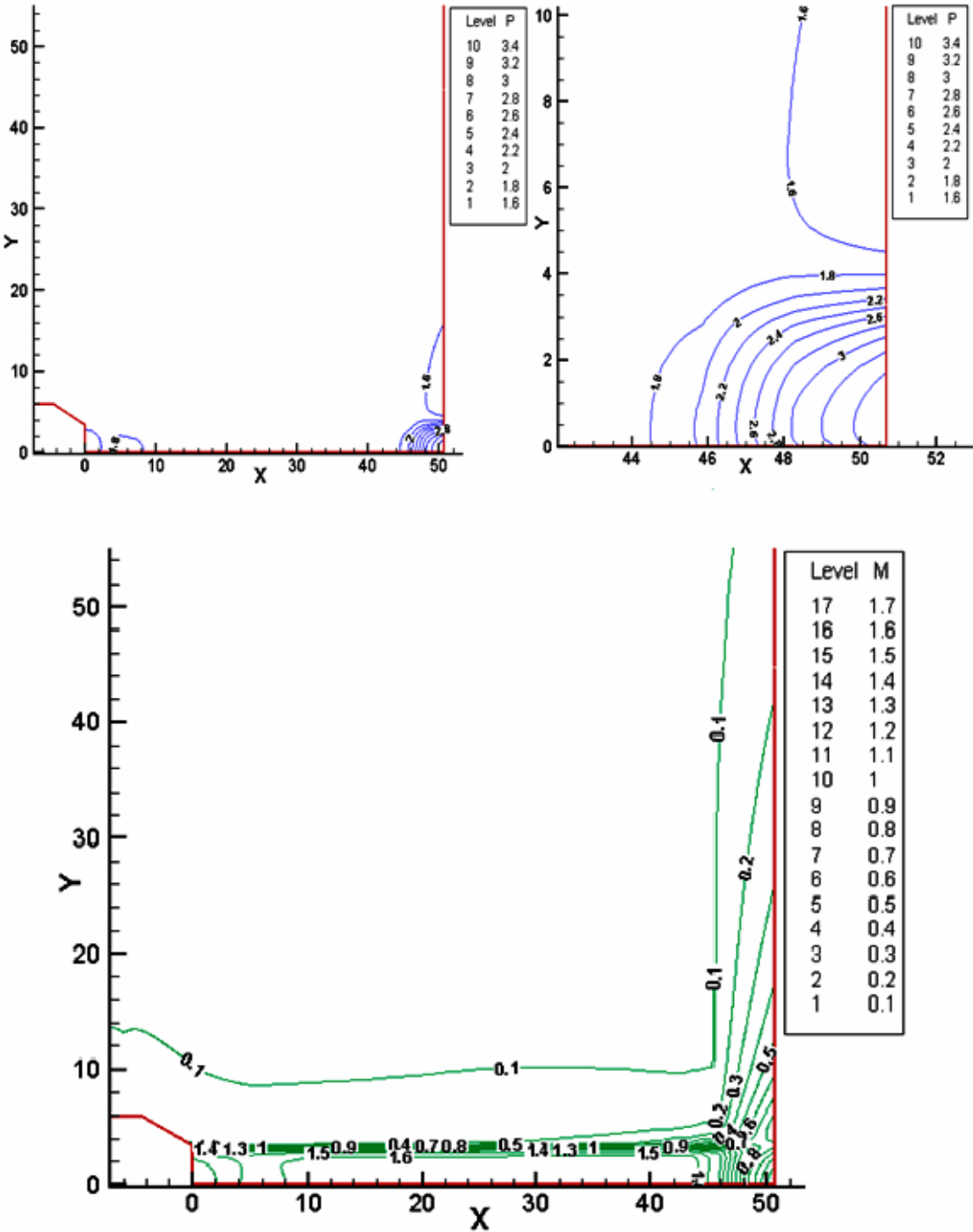


Figura 5.12: Evolução da pressão estática no escoamento e na vizinhança da parede; e do número de Mach para $Z/D = 15$ e $p_1/p_0 = 1,5$ distância em (cm).

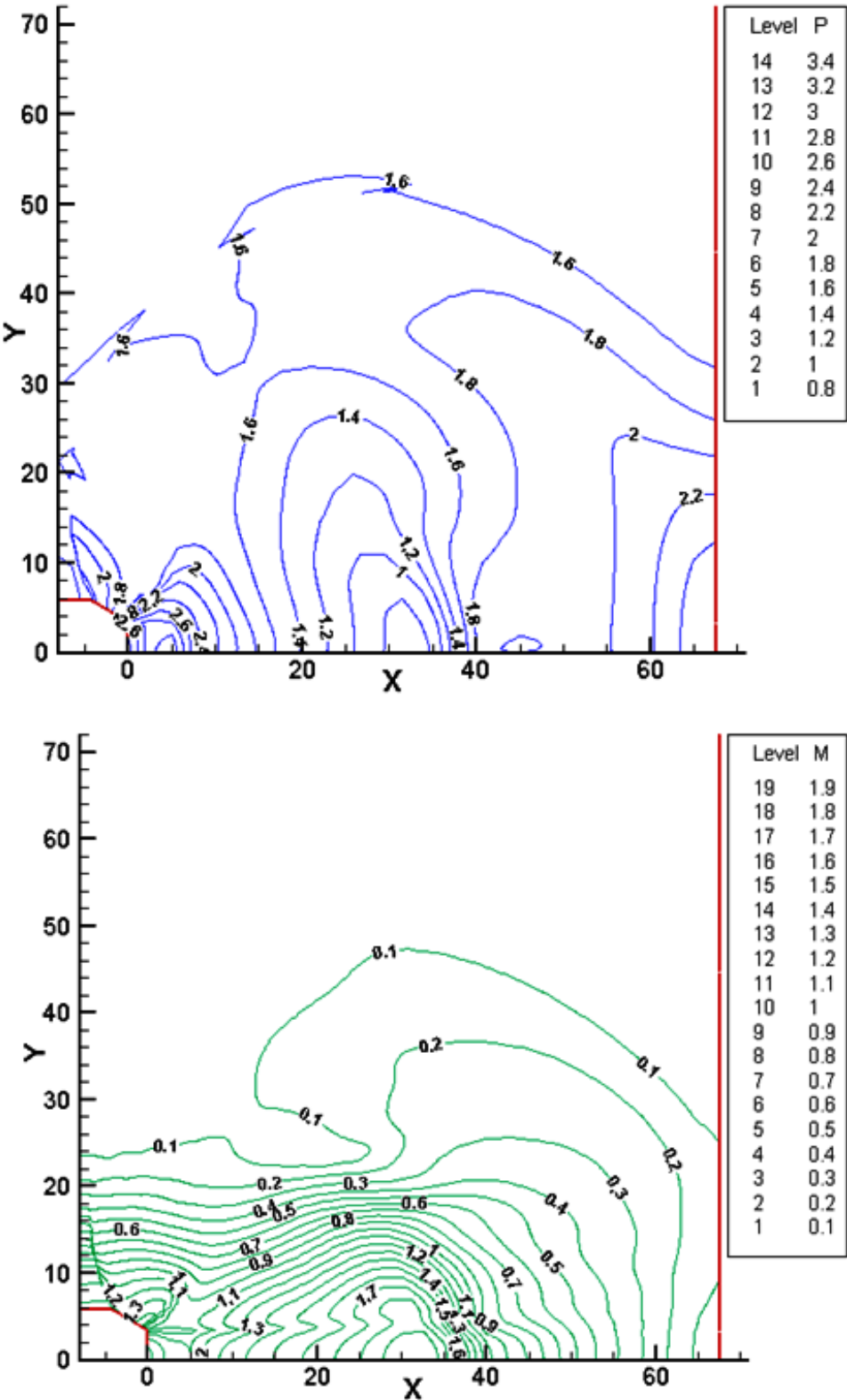


Figura 5.13: Evolução da pressão estática e do número de Mach no escoamento para $Z/D = 20$ e $p_1/p_0 = 1,5$ distância em (cm).

Na Figura 5.14 é mostrada a evolução da pressão ao longo da linha de simetria ($y = 0$) para diferentes valores da razão de pressão e uma mesma distância $Z/D = 20$. Podem-se observar oscilações de pressão entre a parede e a saída do jato. A origem deste processo de oscilação está ligada a onda de choque situada entre o jato e o ponto de estagnação, e ao choque de reacoplamento. Estes resultados concordam com aqueles obtidos por Jian (1992).

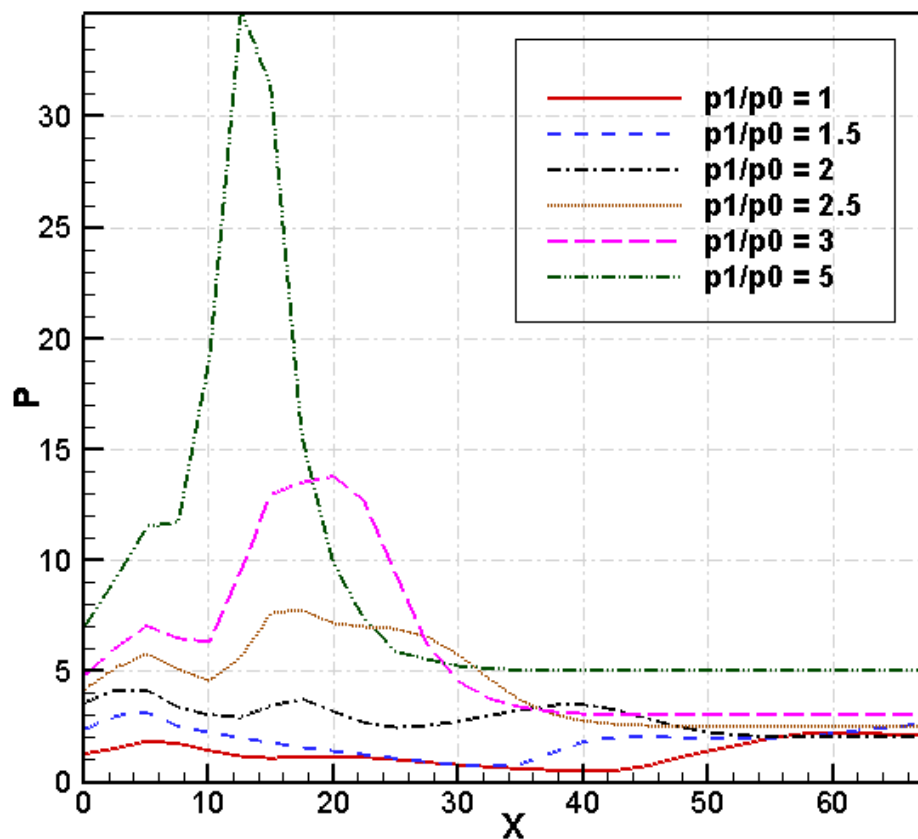


Figura 5.14: Evolução da pressão ao longo da linha de simetria para $Z/D = 20$.

5.3. Verificação do Modelo de Turbulência

Para a verificação do modelo de turbulência considerou-se o escoamento supersônico de ar sobre uma superfície plana adiabática, o qual representa o escoamento sobre a superfície de uma rocha lisa. O escoamento, inicialmente perpendicular à superfície da placa, possui número de Mach de 2; pressão de 1

atm e temperatura de 1000 K. O número de Reynolds é de $R_e = 50667$ baseado em um comprimento característico de $l_0 = 118 \text{ } \mu m$ este valor é procedente da relação entre o número de Reynolds acústico, a viscosidade e a velocidade do som, o qual representa o espaçamento entre as células. O valor do número de Reynolds correspondente é 10^4 , para o qual o escoamento é turbulento sobre a superfície da placa.

Na Figura 5.15 mostra-se a malha utilizada para a verificação do modelo de turbulência para um escoamento desenvolvendo-se sobre uma parede, a qual é refinada na vizinhança da parede adiabática. Este modelo de turbulência foi avaliado com uma relação de $Z/D = 20$ e uma razão de pressão de $p_1/p_0 = 1$.

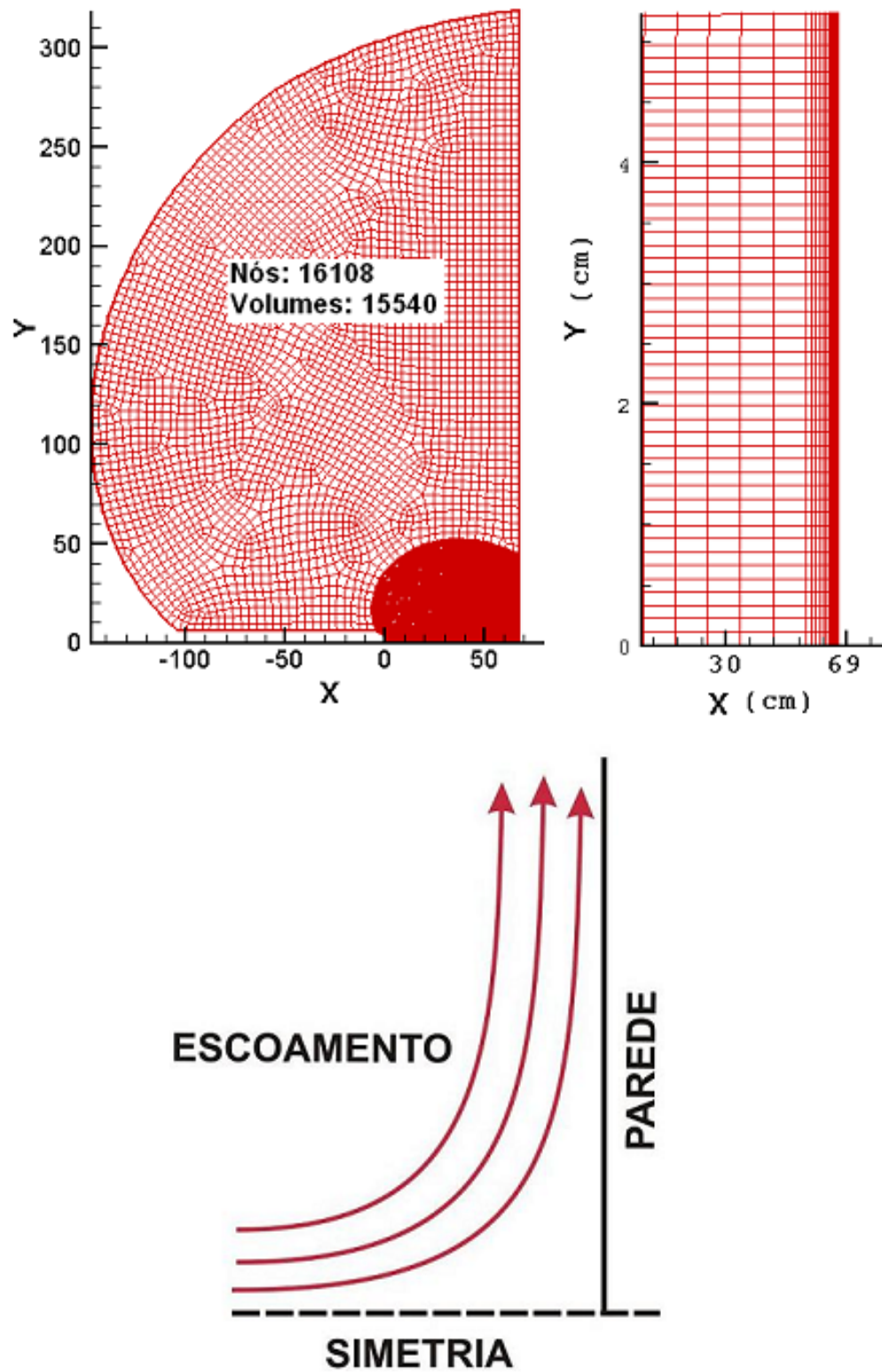


Figura 5.15: Domínio computacional utilizado para a avaliação do programa em situações de camada limite desenvolvendo-se em numa superfície plana, (a) vista geral (b) detalhe da camada limite na vizinhança da parede, (c) direção do escoamento.

Na Figura 5.16 observa-se a evolução da velocidade, e da camada limite associada.

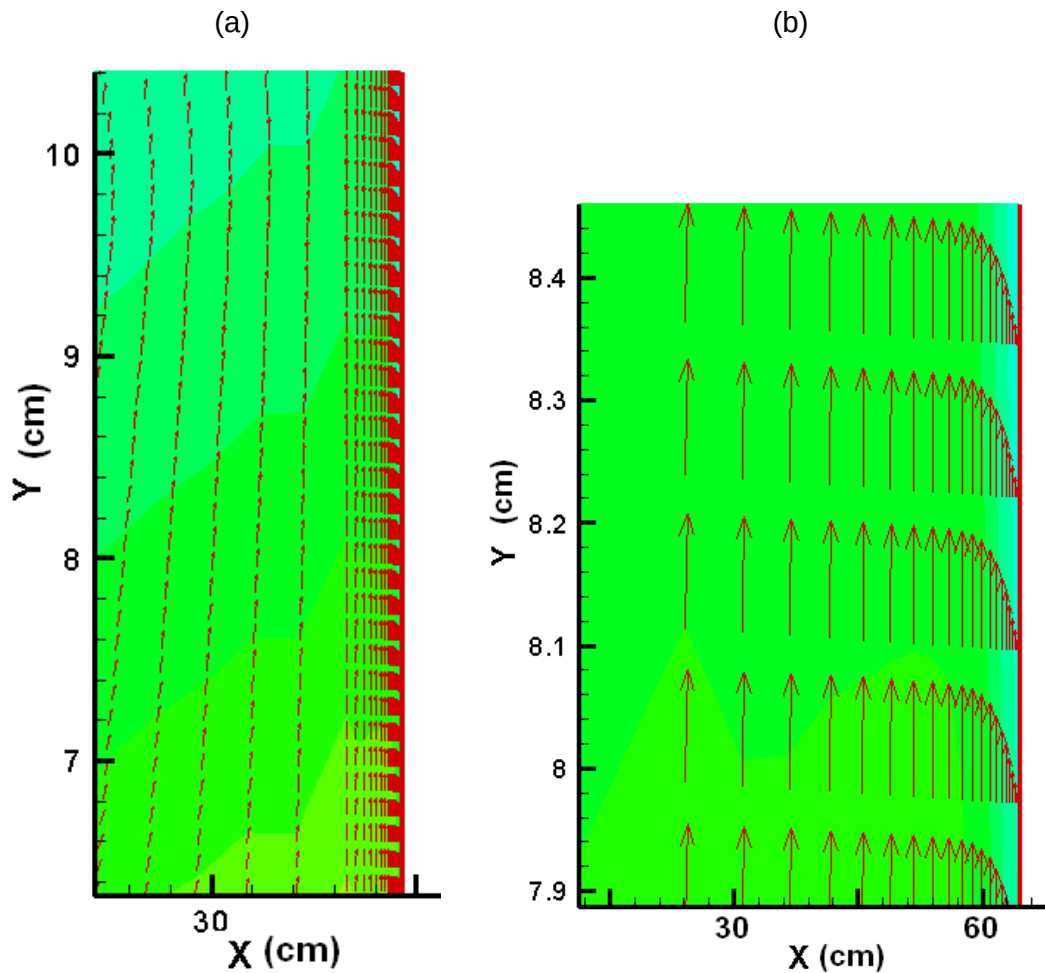


Figura 5.16 Vetor velocidade e camada limite sobre uma superfície plana adiabática para um escoamento supersônico, (a) vista geral, (b) detalhe do escoamento na vizinhança da parede.

A Figura 5.17 apresenta a evolução logarítmica do resíduo da densidade ao longo do número de iterações, a qual apresenta um salto brusco devido a recirculações presentes no escoamento próximo da parede.

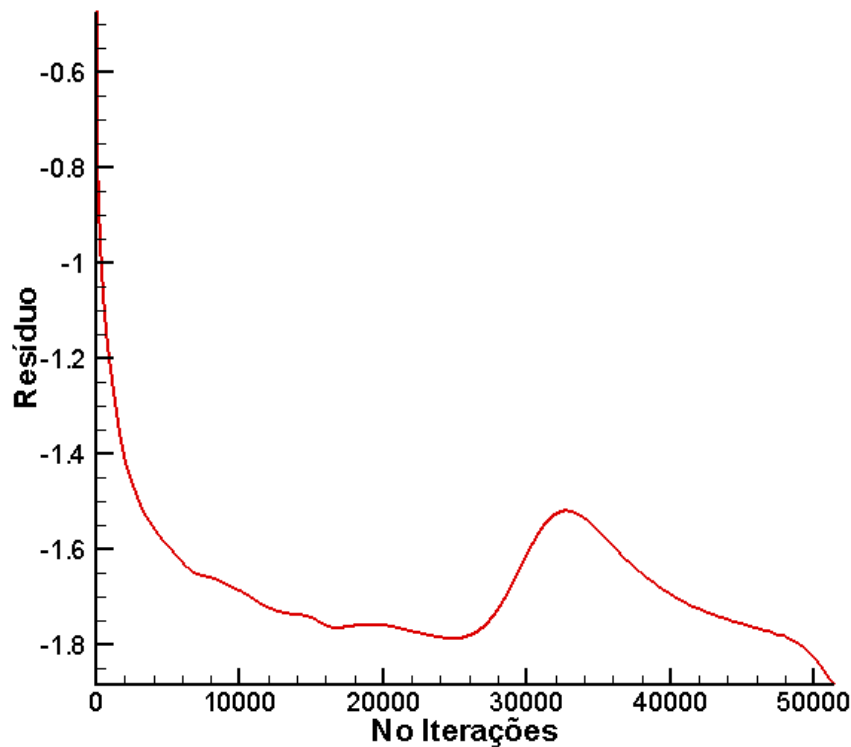


Figura 5.17: Evolução logarítmica do resíduo da densidade no caso do escoamento com camada limite.

A Figura 5.18 apresenta a evolução da velocidade e da viscosidade turbulenta modificada (n), para uma posição longitudinal em $x \geq 30 \text{ cm}$, lembrando que a distância entre a saída do bocal e a parede é de $x = 67.8 \text{ cm}$. A Figura 5.18 (a) mostra a evolução em coordenadas externas, enquanto que a escala logarítmica da Figura 5.18 (b) permite apreciar a evolução interna da camada limite, isto é próxima à parede. Esta figura permite verificar que a evolução da velocidade corresponde à variação logarítmica esperada para uma camada limite turbulenta, enquanto a viscosidade turbulenta modificada possuiu um máximo na região logarítmica e cai a zero na vizinhança da parede. Estes resultados estão de acordo com os resultados que são apresentados por Spalart e Allmaras (1994).

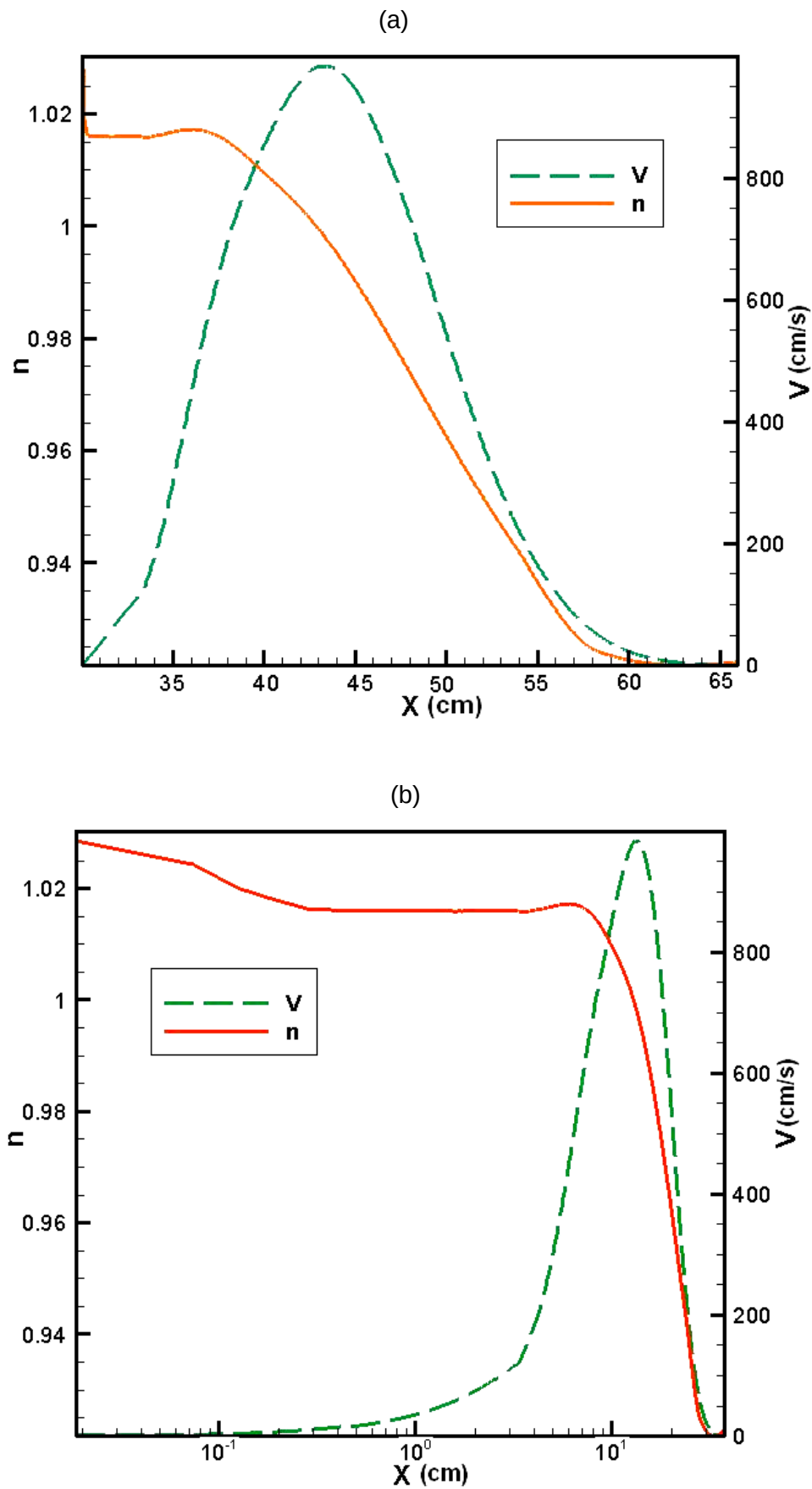


Figura 5.18: Evolução transversal da velocidade (cm/s) e da viscosidade turbulenta (n) modificada para o número de Reynolds 10^4 .

Na Figura 5.19 mantendo a posição longitudinal da Figura 5.18, foi traçada a evolução longitudinal da temperatura estática. Nesta figura pode-se observar que os valores máximos da temperatura encontram-se para $x \sim 40 \text{ cm}$ apresentando uma queda nas imediações da parede. Acredita-se que este comportamento seja devido a expansão do escoamento.

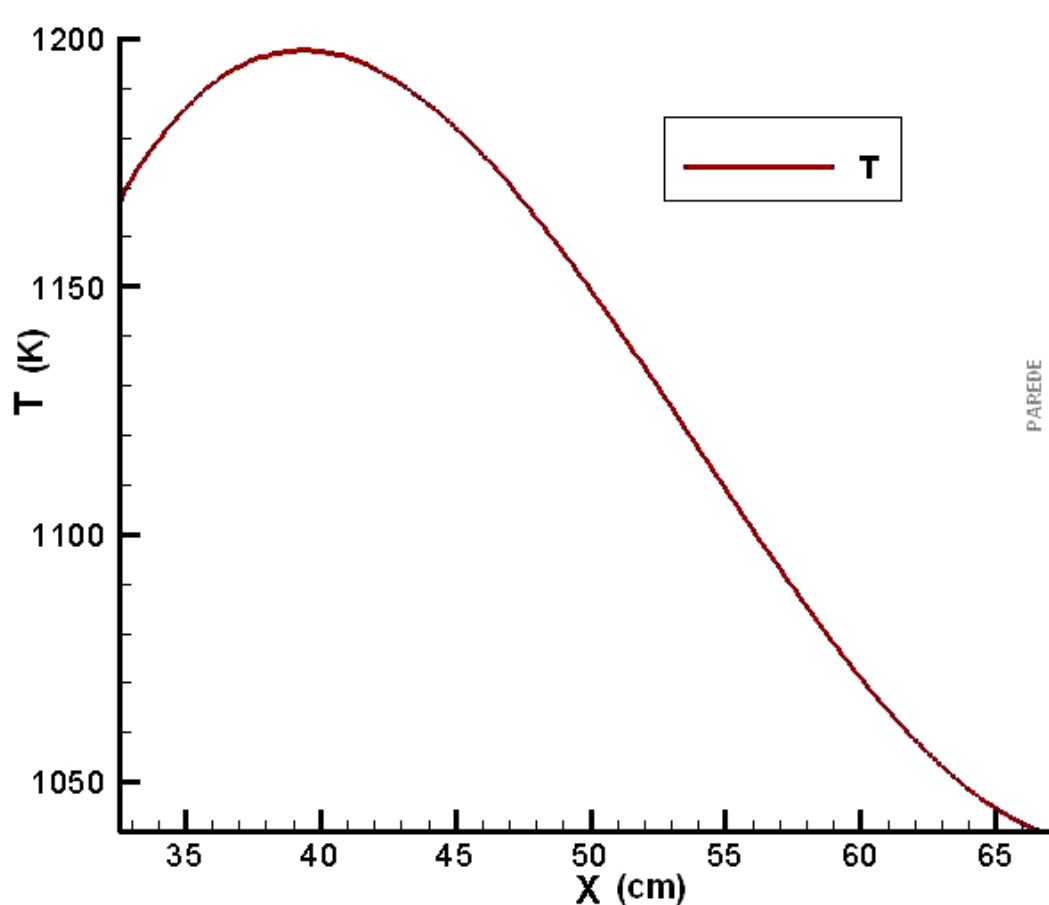


Figura 5.19: Evolução longitudinal da temperatura estática (K) a uma distância de 2,5 (cm) para um escoamento supersônico.