CAPÍTULO 7

ALGUNS RESULTADOS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar alguns resultados obtidos com o uso da metodologia descrita nos capítulos anteriores. Não se tem a intenção de esgotar a discussão sobre os resultados e nem compará-los ou comprová-los. O objetivo único é mostrar a versatilidade da metodologia na solução de problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Também, apenas alguns resultados dos problemas resolvidos pelo autor e seus colegas de grupo de pesquisa serão apresentados. De uma maneira geral as classes de problemas físicos atacados são:

a - Convecção natural bidimensional em cavidade arbitrária e canais;

b - Convecção forçada no interior de dutos. Região de entrada térmica e hidrodinâmica simultânea;

c - Descarga térmica em rios e lagos;

d - Descarga de chaminés em atmosfera estratificada. Modelo bidimensional de turbulência;

e - Escoamento turbulento no interior de dutos com bifurcação . Solução por multiblocos;

f - Aerodinâmica, envolvendo escoamento subsônico, transônico e supersônico. Problemas bi e tridimensionais sobre geometrias complexas com equações de Euler e Navier-Stokes. Escoamentos bidimensionais turbulentos subsônicos e supersônicos com dissipação viscosa; e,

g - Simulação de reservatórios de petróleo. Problemas monofásicos com injeção de traçadores bifásicos com e sem injeção de traçadores.

Problemas em novas áreas também estão sendo analisados, como

a - Simulação do movimento de fronteiras livres, como no enchimento de moldes para indústria plástica e em problema de mudança de fase;

b - Interação fluido-estrutura para situações tridimensionais; e,

c - Simulação do escoamento presente em placas de orifício.

Associadas aos temas acima, problemas numéricos importantes também são atacados, como

a - Uso de variáveis co-localizadas em problemas compressíveis e incompressíveis;

b - Minimização da difusão numérica empregando funções de interpolação completas;

c - Uso de malhas adaptativas para minimização da difusão numérica e em problemas de fronteira livre;

d - Desenvolvimento de metodologia para malhas não estruturadas; e,

e - Estudos sobre o acoplamento pressão / velocidade em sistemas não-ortogonais.

A seguir, alguns resultados são relatados.

A Fig. 7.1 mostra a malha empregada (20 x 20) para a solução do problema de convecção natural em uma cavidade circular. As condições de contorno são as mesmas usualmente empregadas para a cavidade quadrada, isto é, paredes verticais aquecidas diferencialmente e horizontais isoladas. A dimensão das paredes é obtida dividindo-se o perímetro por quatro. As Figs. 7.2 e 7.3 mostram, respectivamente, o campo de velocidades e as isotermas para $Ra = 10^5$ onde Ra é o número de Rayleigh baseado no diâmetro da cavidade circular. Observa-se que o comportamento é semelhante ao escoamento em uma cavidade quadrada, identificando-se as regiões de camada limite nas paredes verticais e a estratificação da temperatura ao longo do plano médio vertical. O problema é resolvido empregando a hipótese de Boussinesq, ou seja, o escoamento é tratado como

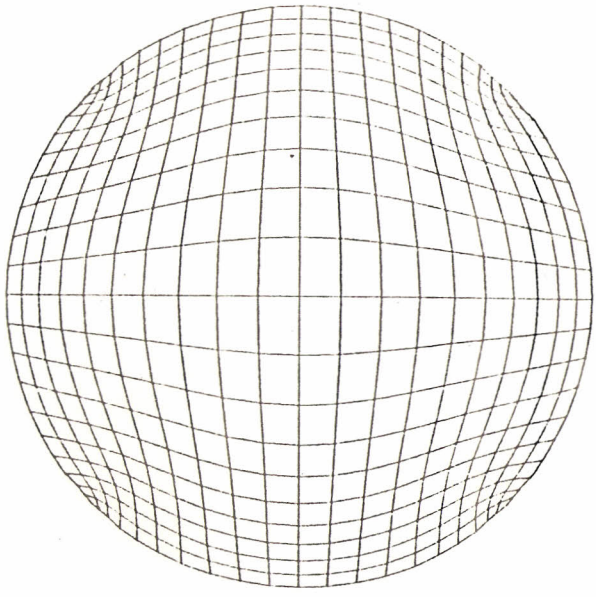

Fig. 7.1 - Malha para a cavidade circular

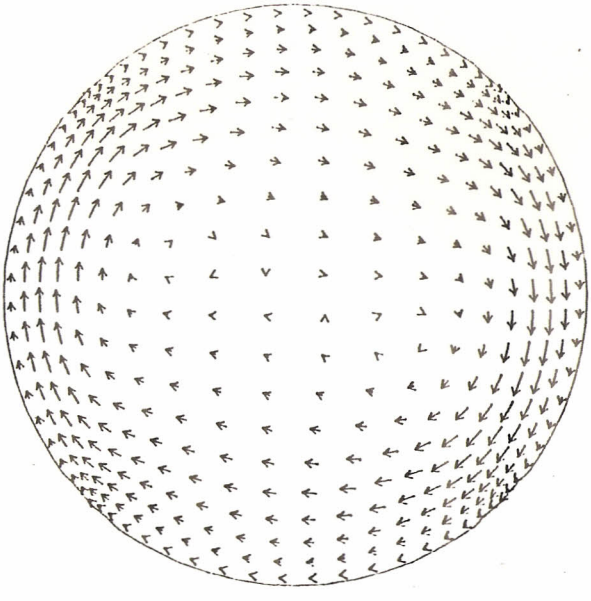

Fig. 7.2 - Vetores velocidade - Cavidade circular

incompressível. Os resultados aqui apresentados não foram publicados. A metodologia pode, entretanto, ser encontrada em [50,51].

A Fig. 7.4 mostra a malha (40 x 20) empregada para simular a descarga térmica de uma chaminé em atmosfera uniforme. Observe-se a dimensão da chaminé em relação ao tamanho da malha, requisito necessário para que a incorporação de fluido ao jato (entrainment) seja captado. A Fig. 7.5 mostra as linhas de corrente com os perfis de

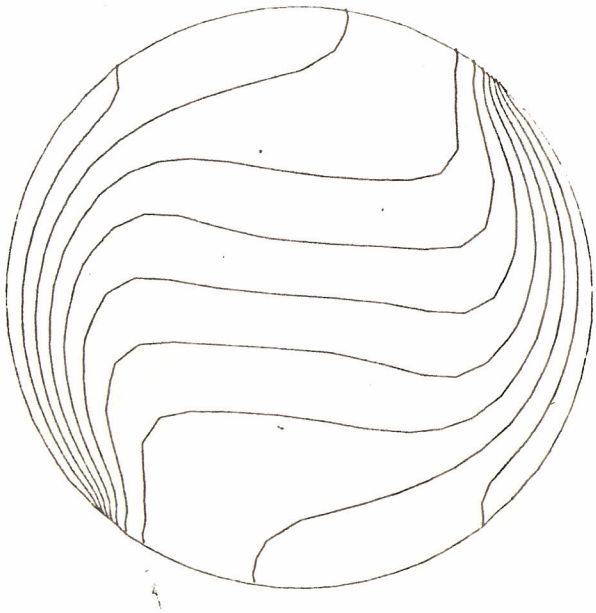

Fig. 7.3 - Isotermas - Cavidade circular

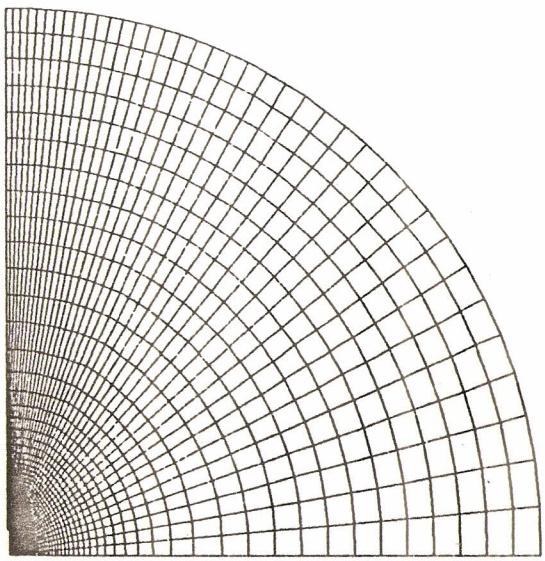

Fig. 7.4 - Malha para a descarga térmica

velocidade mostrando o decaimento do jato. Detalhes da metodologia e dos dados do problema em questão podem ser vistos em [52,53].

A Fig. 7.6 mostra o campo de mach sobre a parte frontal do VLS com ângulo de ataque de 6°e o número de Mach da corrente livre igual a 0,5. A foto mostra claramente a expansão que ocorre após a parte cônica do foguete criando números de Mach até 0,62, portanto 20% acima do valor da corrente livre. A região de estagnação no nariz do foguete também está bem evidente com números de Mach perto de zero. A Fig. 7.7 apresenta,

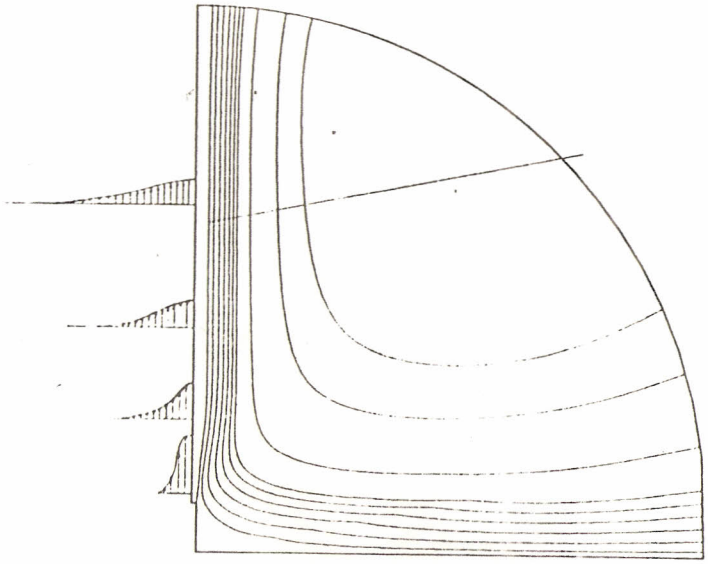

Fig. 7.5 - Isovelocidades para o problema da descarga térmica

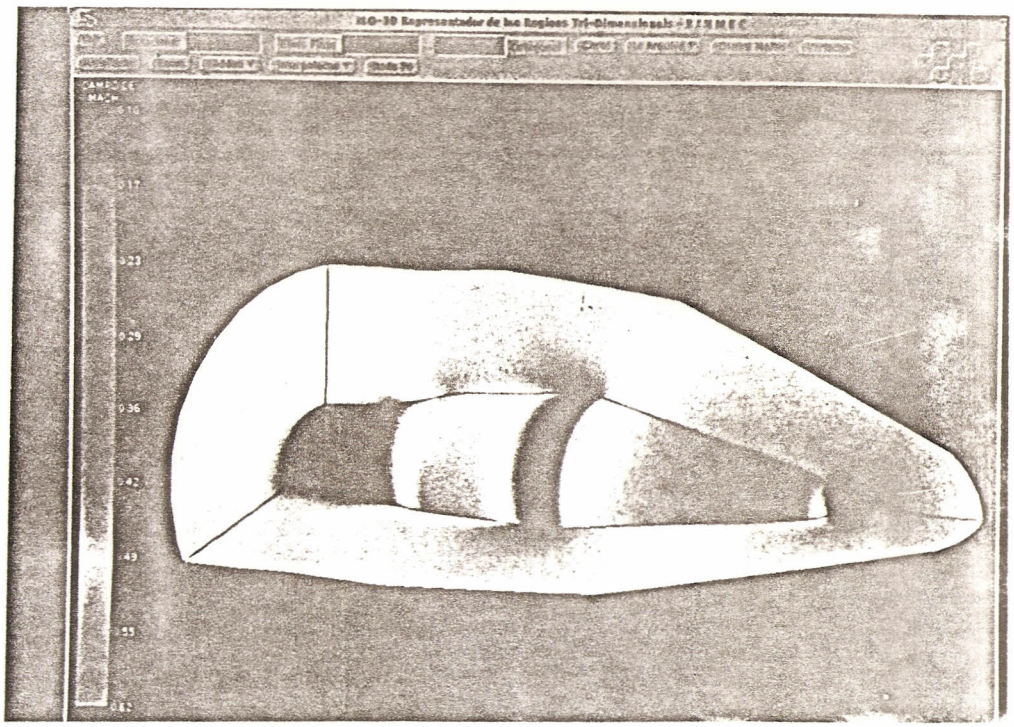

Fig. 7.6 - Campo de Mach sobre o VLS - Ângulo de ataque 6 graus

para o mesmo escoamento o coeficiente de pressão, ou número de Euler. Comparando as duas fotos observa-se a correspondência da física do problema, com coeficientes de pressão

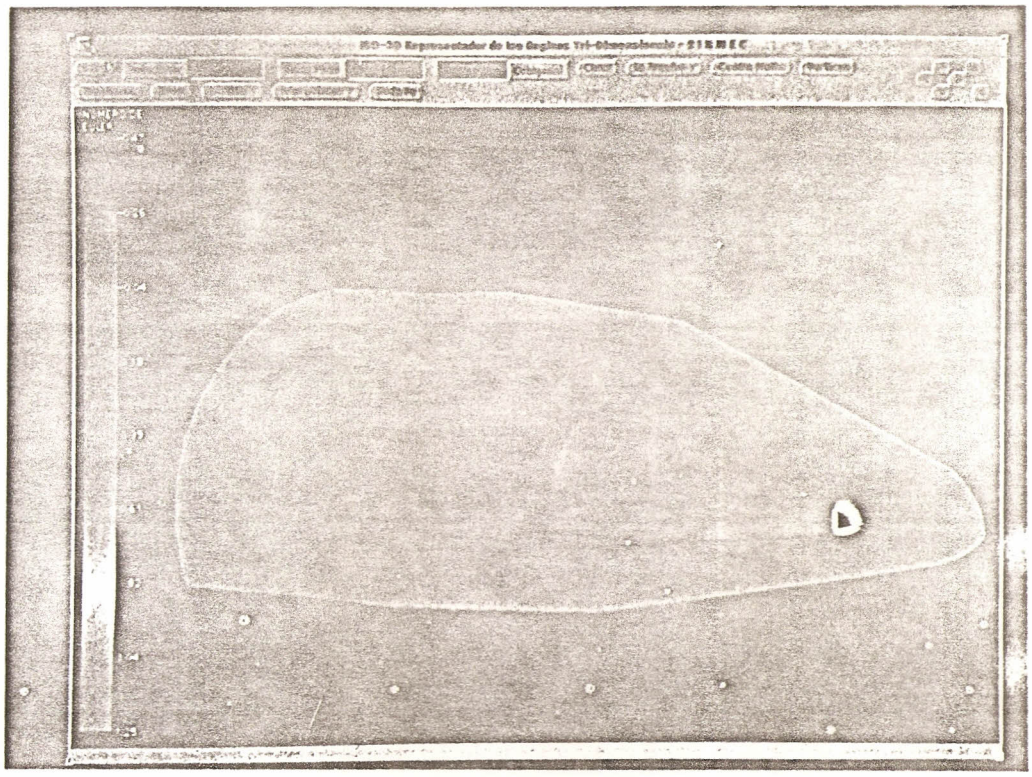

Fig. 7.7 - Coeficiente de pressão - Ângulo de ataque 6 graus

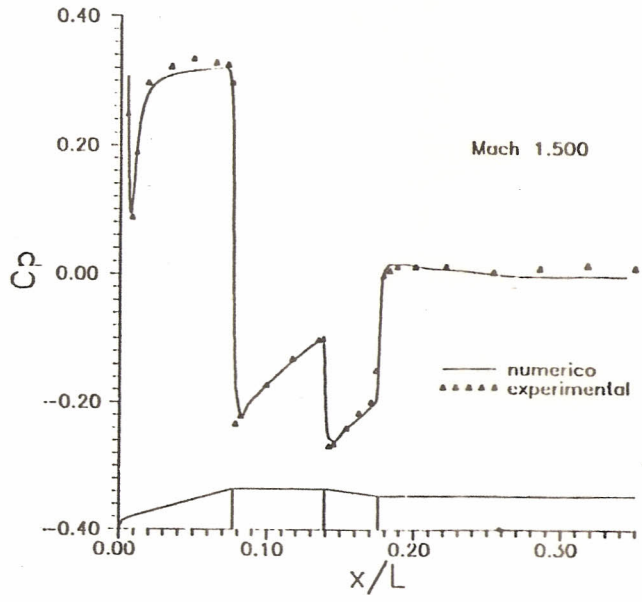

Fig. 7.8 - Coeficiente de pressão para Ma = 1,5. Escoamento axissimétrico

negativos na região de expansão e positivos na região de compressão, como era de se esperar. Este problema foi resolvido usando-se a formulação compressível / incompressível

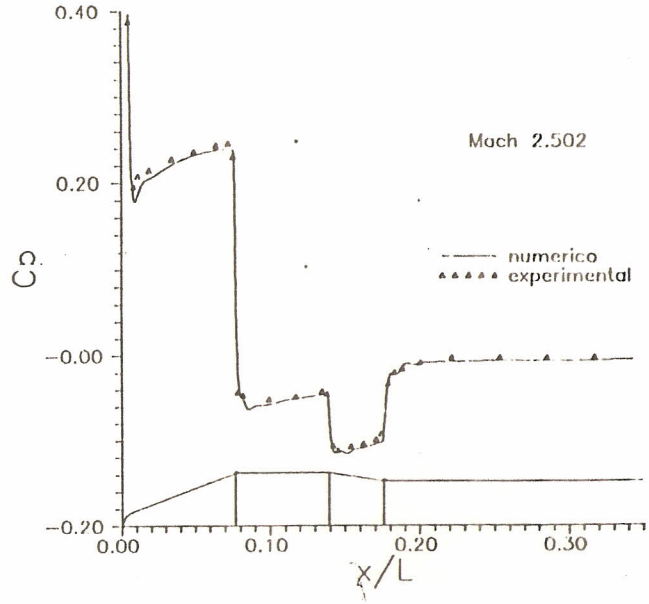

Fig. 7.9 - Coeficiente de pressão para Ma = 2,5. Escoamento axissimétrico

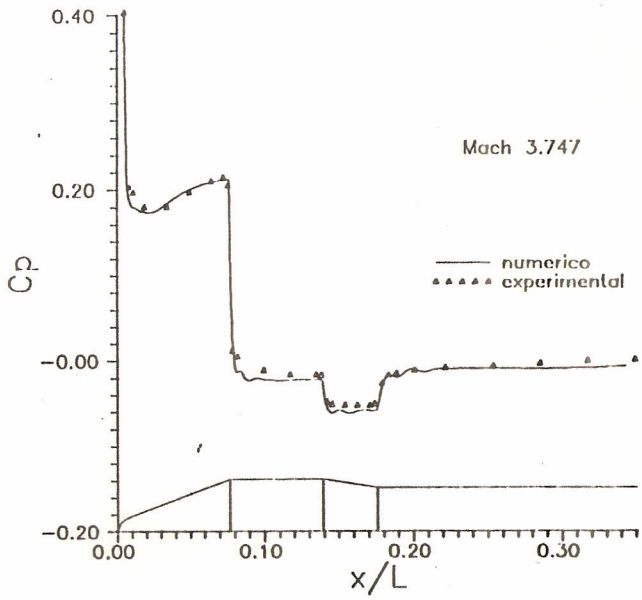

Fig. 7.10 - Coeficiente de pressão para Ma = 3,75. Escoamento axissimétrico

[36,37] com um código tridimensional em variáveis co-localizadas [38,47] e a malha do tipo da mostrada na Fig. 2.29.

As Figs. 7.8, 7.9 e 7.10 mostram o coeficiente de pressão sobre a superfície do VLS para Mach = 1,50, 2,50 e 3,75, para escoamento axissimétrico, comparado com os resultados experimentais [54] obtidos em túnel de vento. Constata-se que os resultados são muito bons.

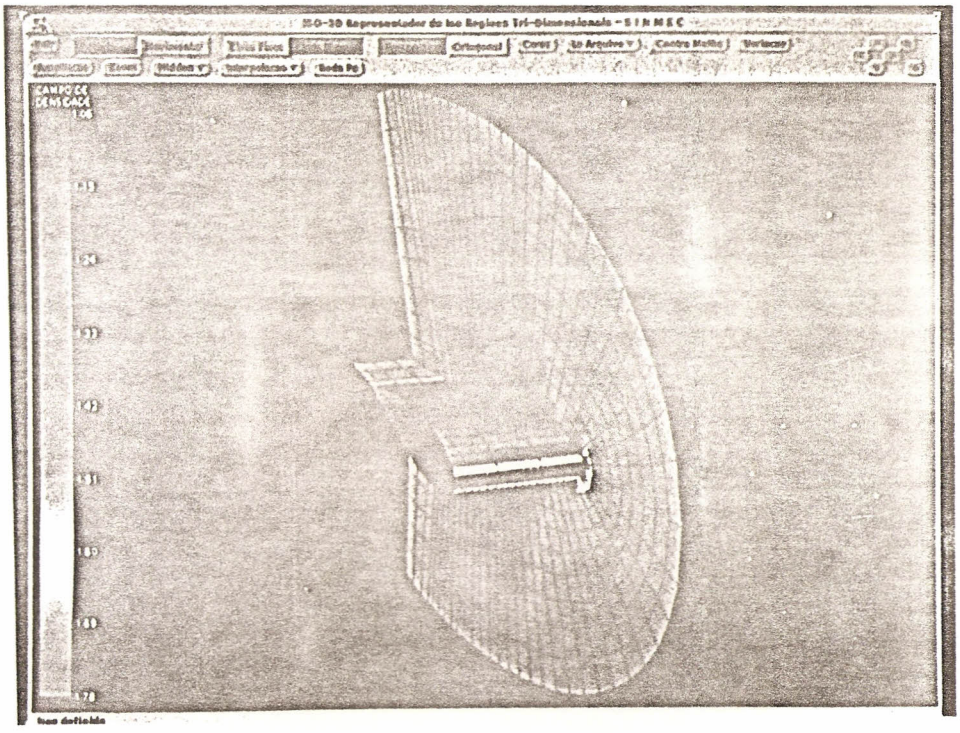

Fig. 7.11 - Campo de densidades sobre o NACA 0012. Ma = 0,85

Usando a mesma metodologia compressível / incompressível, a Fig. 7.11 mostra o campo de densidades sobre a superfície do aerofólio NACA 0012 e para um plano normal ao aerofolio, resultado do escoamento com número de Mach de corrente livre igual a 0,85.

Para finalizar a Fig. 7.12 mostra o escoamento em uma tubeira convergente / divergente com escoamento incompressível na entrada, conforme pode ser visto pela distribuição de Mach [55]. Na saída da tubeira o escoamento é supersônico com $Ma = 2,33$.

Os resultados apresentados mostram a versatilidade da metodologia tanto do ponto de vista de tratamento de geometrias arbitrárias bem como da possibilidade que se tem de resolver problemas de escoamentos de qualquer velocidade.

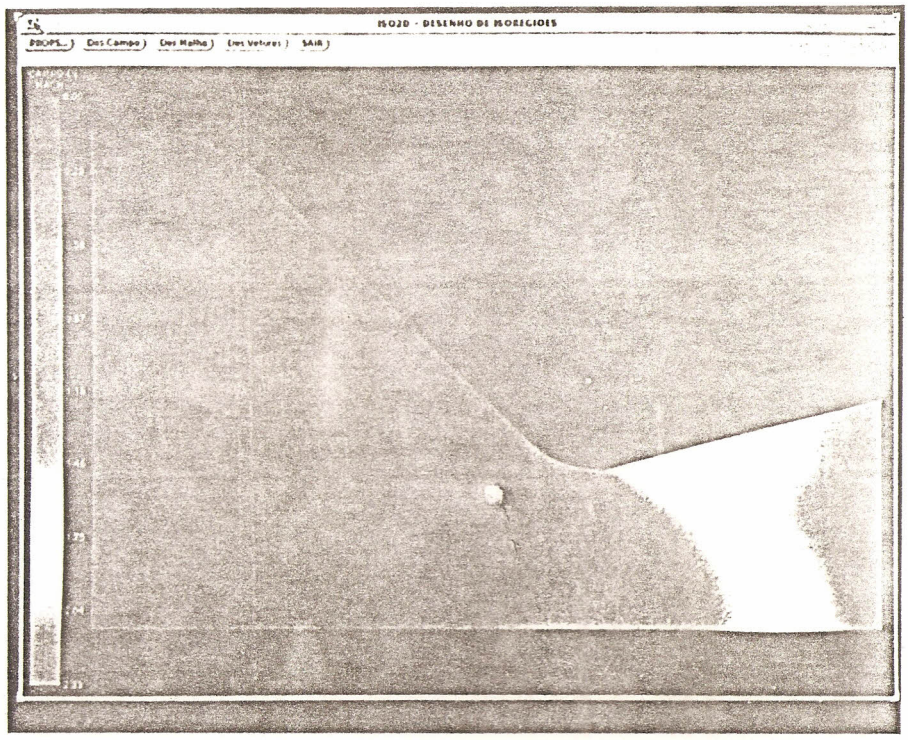

Fig. 7.12 - Escoamento em uma tubeira convergente / divergente