

5.2.2 Caso 2: Jato Forçado 1

No caso 2 foi simulado o escoamento de um jato forçado através de uma perturbação na direção axial das componentes radiais de velocidade. A perturbação é apresentada pela Equação (5.23) e as componentes radiais de velocidade através da Eq. (5.24).

$$U_r = 0,01 \cdot \sin\left(2\pi \frac{z}{4,0}\right) + 0,02 \cdot \sin\left(2\pi \frac{z}{2,0}\right) + 0,03 \cdot \sin\left(2\pi \frac{z}{1,0}\right) \quad (5.23)$$

$$u = U_r \cos \theta \cdot e^{\left[-2,0 \left(\frac{r-R}{2\delta}\right)^2\right]} \quad e \quad v = U_r \sin \theta \cdot e^{\left[-2,0 \left(\frac{r-R}{2\delta}\right)^2\right]} \quad (5.24)$$

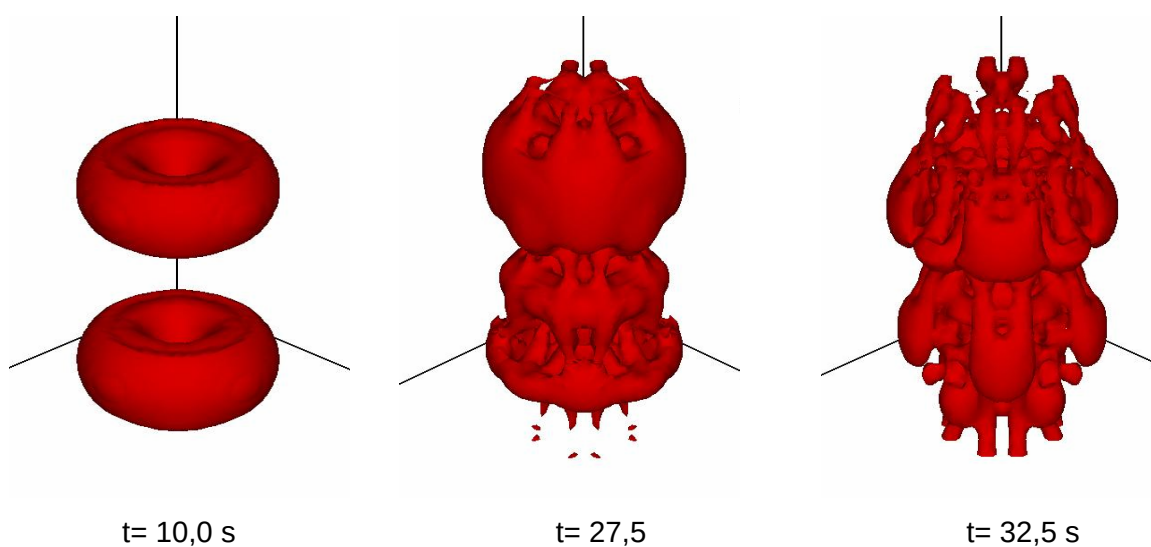
Diferentemente do jato natural, anteriormente estudado, não foi imposta qualquer perturbação à componente axial de velocidade.

É importante ressaltar que o jato simulado neste caso não é um jato comumente encontrado em aplicações práticas. Como o desenvolvimento das estruturas é “bem comportado”, o presente caso foi estudado com o objetivo de analisar a influência do refinamento dos modos de Fourier e da precisão utilizada no código computacional. Para tanto, foram realizadas três simulações utilizando precisão simples e três níveis de resolução de 64^3 , 96^3 e 120^3 modos de Fourier. Para análise da influência da precisão do código, foi realizada uma simulação utilizando precisão dupla e 96^3 modos de Fourier, a qual foi comparada àquela realizada empregando precisão simples.

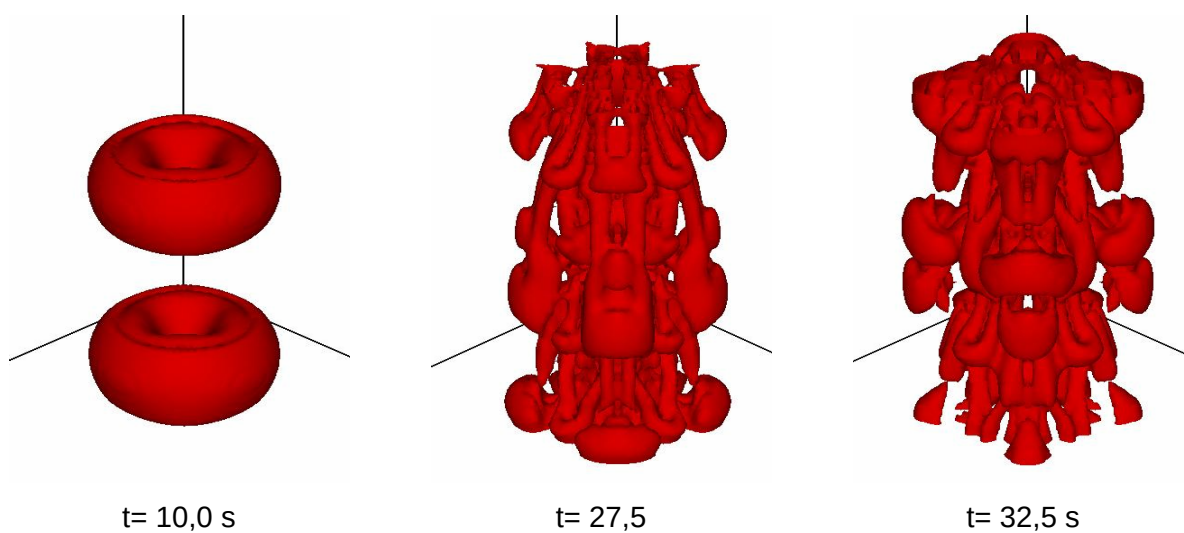
a) Análise da influência da resolução no espaço de Fourier

A análise da influência do número de modos de Fourier utilizados foi realizada através de avaliações qualitativas. As isosuperfícies do critério Q e o módulo de vorticidade nos planos xy e xz permitiram visualizar diferenças significativas nas estruturas formadas ao compará-las em instantes de tempo correspondentes.

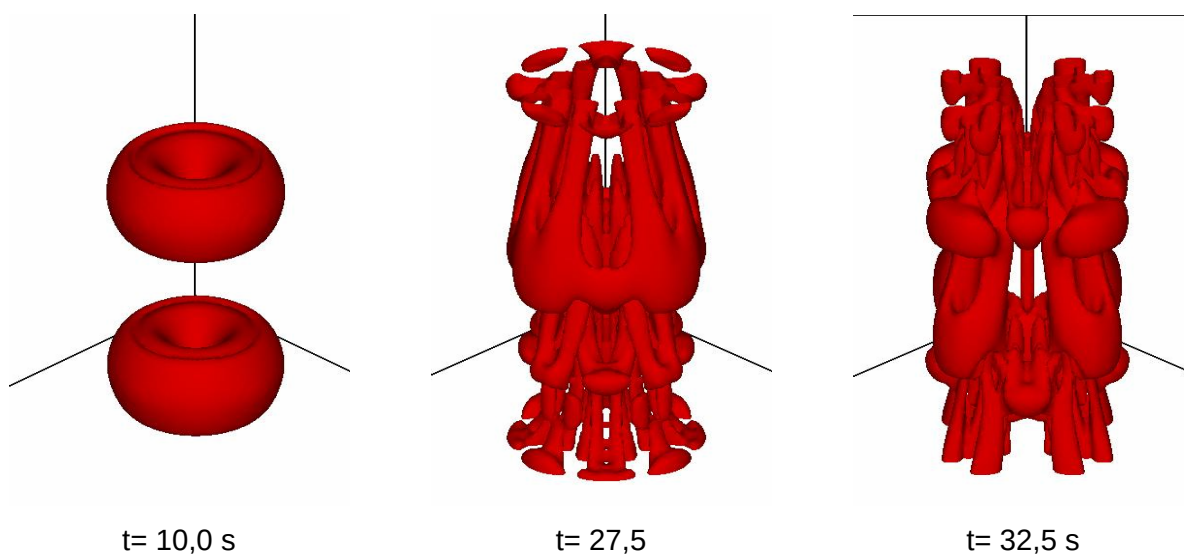
A Figura 5.15 mostra as isosuperfícies do critério Q resultantes das simulações realizadas utilizando 64^3 , 96^3 e 120^3 pontos de colocação, para três diferentes instantes de tempo. As Figuras 5.16 e 5.17 mostram o módulo de vorticidade em planos xz e xy , respectivamente, resultantes das mesmas simulações e nos mesmos instantes de tempo.



a) Simulação Caso 2 com 64^3 pontos de colocação.

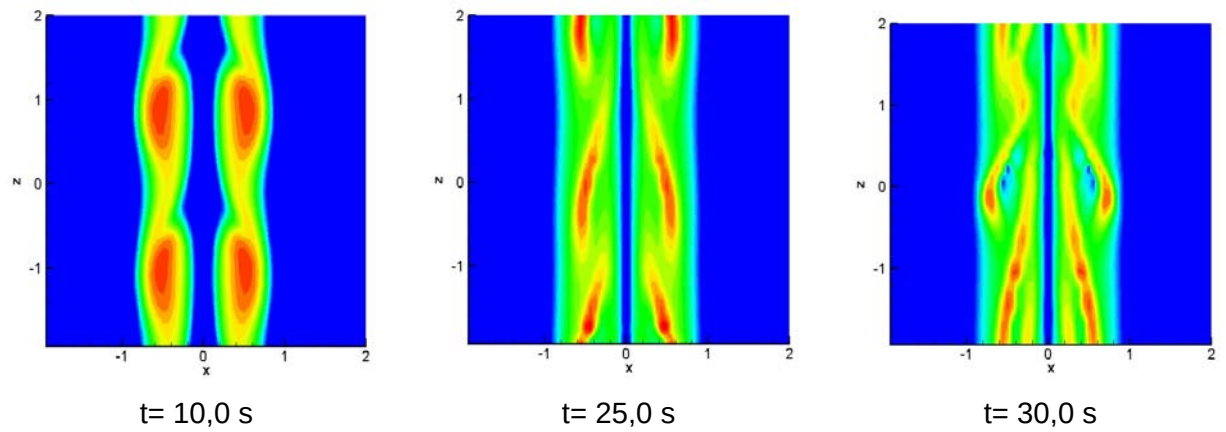


b) Simulação Caso 2 com 96^3 pontos de colocação.

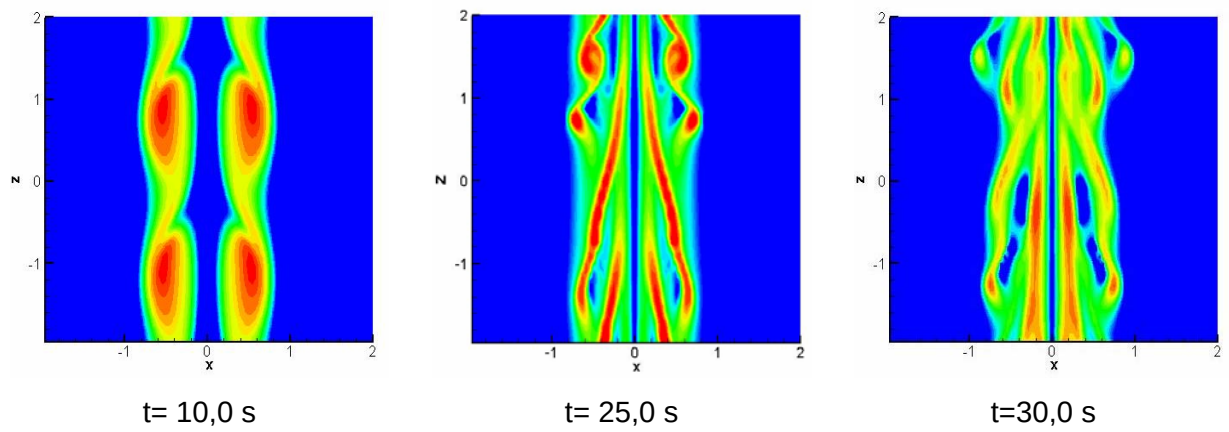


c) Simulação Caso 2 com 120^3 pontos de colocação.

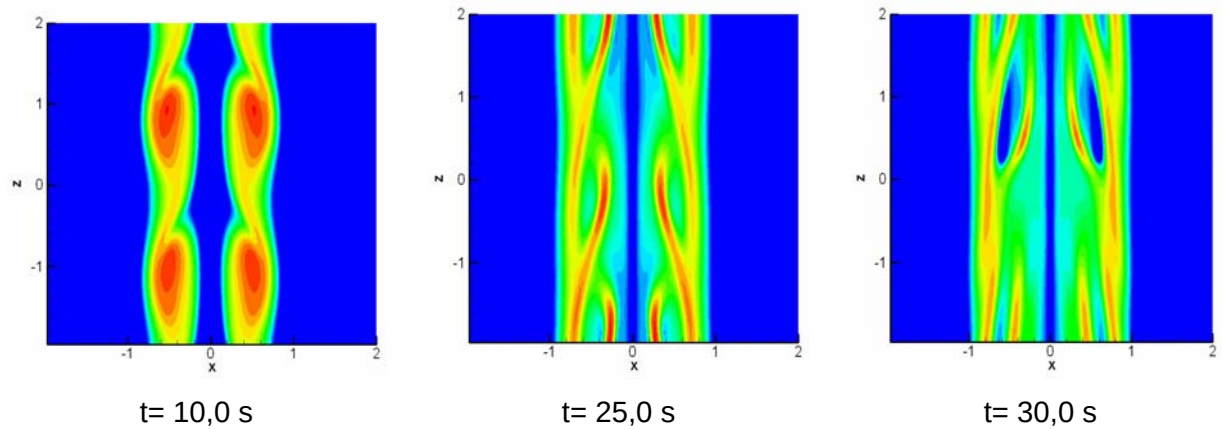
Figura 5.15 - Evolução temporal do campo do critério Q (Isosuperfícies Nível $0,01 \text{ s}^{-2}$) - Caso 2.



a) Simulação Caso 2 com 64^3 pontos de colocação.

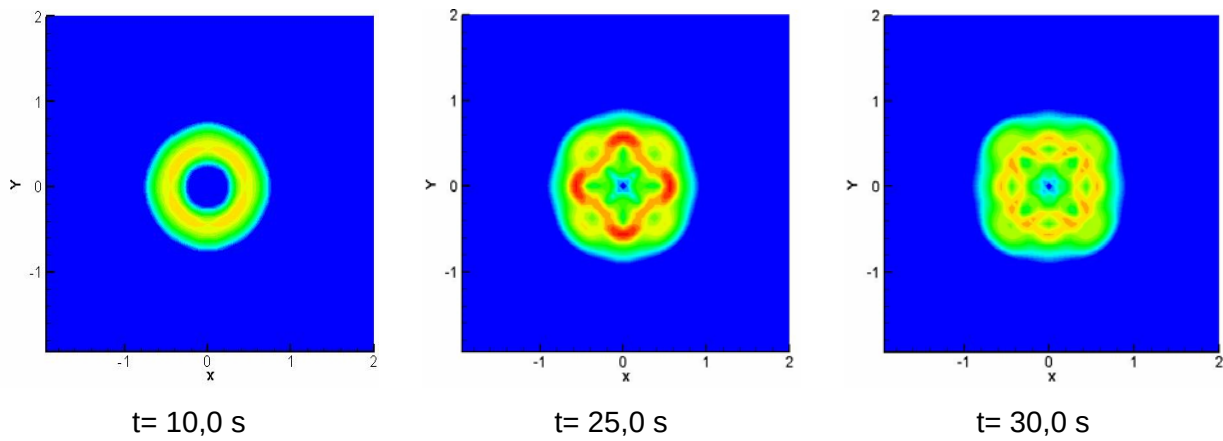


b) Simulação Caso 2 com 96^3 pontos de colocação.

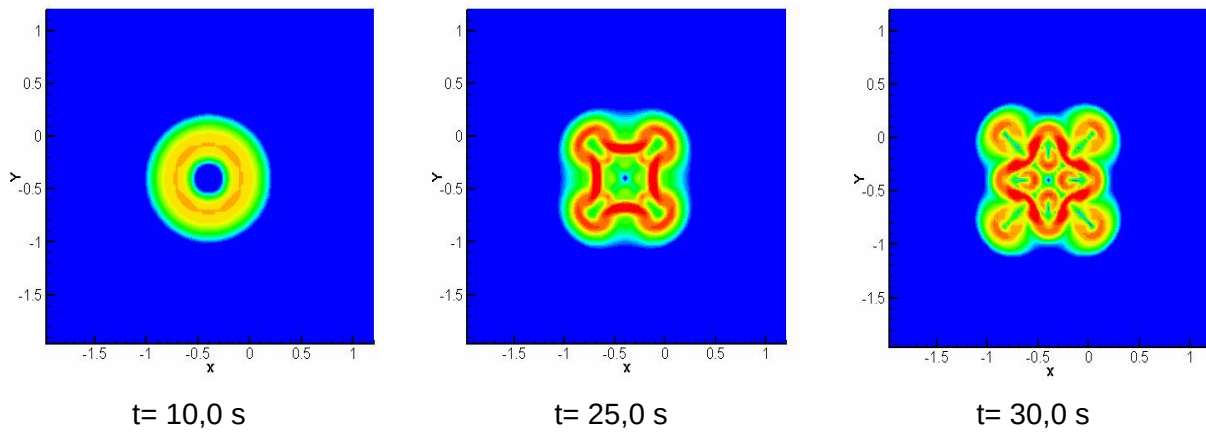


c) Simulação Caso 2 com 120^3 pontos de colocação.

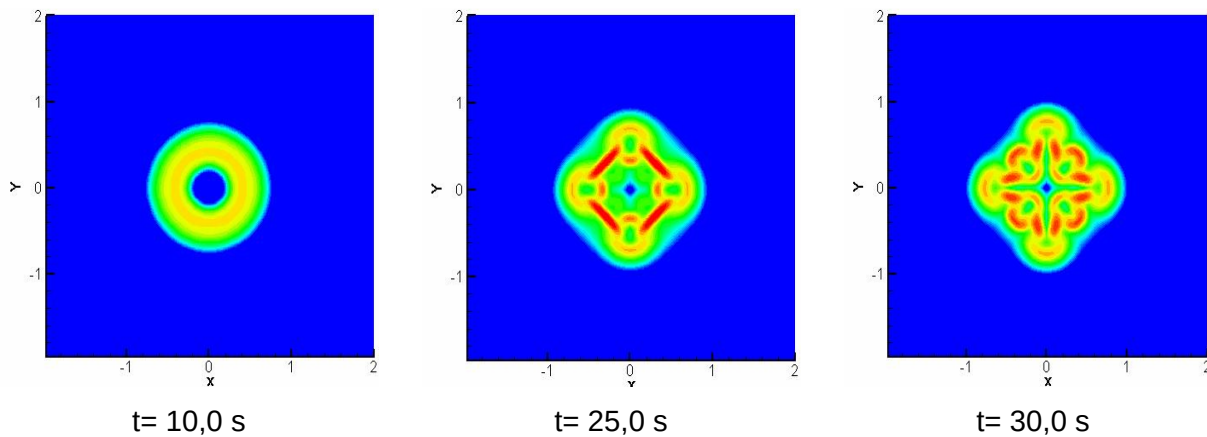
Figura 5.16 - Evolução Temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{\omega}\|$ no plano xz ($y=0$) - Caso 2.



a) Simulação Caso 2 com 64^3 pontos de colocação.



b) Simulação Caso 2 com 96^3 pontos de colocação.



b) Simulação Caso 2 com 20^3 pontos de colocação.

Figura 5.17 - Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{\omega}\|$ no plano xy ($z=0$) - Caso 2.

Ao se comparar a Fig 5.15(a) e (b), referentes às simulações utilizando 64^3 e 96^3 pontos respectivamente, verifica-se que as estruturas apresentadas em (b) mostram-se mais bem definidas e com maior nível de detalhamento. A comparação entre as grandezas apresentadas nas Figs 5.15 (a) e (b), no instante $t=27,5$, por exemplo, mostra claramente que muitas

estruturas visualizadas em (b), não foram capturadas em (a) (64^3 pontos). Ao comparar os resultados das simulações utilizando resoluções de 96^3 (b) e 120^3 (c), verifica-se que as estruturas ficam mais bem definidas, apresentando menor dissipação.

A comparação do módulo de vorticidade em um mesmo instante de tempo para os resultados das diferentes simulações também possibilita verificar a maior definição das estruturas para maior resolução. Verifica-se que os resultados da Fig 5.16 (b) apresentam maior detalhamento que em (a), no entanto, ainda apresentam alguma dissipação. Na Fig 5.16 (c) verifica-se um comportamento claramente definido em todos os instantes de tempo. Na Fig. 5.17 a influência do refinamento da malha pode ser verificada, especialmente no instante $t=10,0$ s, onde se pode verificar em (c) a diminuição da dissipação apresentada em (a) e (b).

É interessante observar, comparando as Figuras 5.17 (b) e (c), que as fases são diferentes para um mesmo tempo físico. Claramente os modos que aparecem são diferentes.

A influência da resolução no espaço de Fourier também pode ser verificada através da comparação dos espectros de energia das simulações realizadas utilizando diferentes quantidades de modos de Fourier. A Figura 5.18 apresenta os espectros de energia em escala log-log do escoamento simulado com resoluções de 64^3 , 96^3 e 120^3 modos de Fourier. A comparação dos espectros de energia demonstra que o processo de decaimento de energia é maior para o escoamento simulado com resolução mais refinada. No espectro da simulação que utiliza 64^3 modos de Fourier, pode-se identificar certo acúmulo de energia no final da escala ($\log(k) > 15$), o que ocorre devido ao fato de a resolução no espaço de Fourier não ser suficiente para representar o escoamento naquela faixa de número de onda e, em consequência permite a troca não linear de energia entre as escalas do escoamento. Este acúmulo de energia pode ser visto também para 96^3 pontos de colocação para $\log(k) > 20$, mostrando que mais escalas foram resolvidas quando se compara com a resolução 64^3 pontos de colocação. Para a resolução de 120^3 pontos de colocação não é apresentado acúmulo de energia e observa-se um decaimento até $\log(k)=30$. É interessante observar que em nenhuma das simulações realizadas o espectro de energia aproxima-se da inclinação de $-5/3$, conforme esperado. Este comportamento indica que a turbulência não se desenvolveu para o jato estudado, em função do tipo de perturbação imposta.