



**13º POSMEC - Simpósio do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica**



SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS DE JATOS CIRCULARES TRIDIMENSIONAIS

Ana Marta de Souza

Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade federal de Uberlândia-Av João Naves de Ávila, 2160-Uberlândia-MG
amsouza@mecanica.ufu.br

Francisco José de Souza

Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade federal de Uberlândia-Av João Naves de Ávila, 2160-Uberlândia-MG
fjsouza@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto

Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade federal de Uberlândia-Av João Naves de Ávila, 2160-Uberlândia-MG
aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo: Neste trabalho é apresentado um estudo preliminar do desenvolvimento de um jato circular tridimensional. A utilização da metodologia de Simulação de Grandes Escalas permitiu iniciar o estudo de um escoamento do tipo jato a um número de Reynolds igual a 25.000. Os resultados permitiram visualizar a formação de estruturas coerentes, bem como a evolução temporal das mesmas. Os resultados obtidos foram comparados a dados experimentais.

Palavras-chave: simulação de grandes escalas, turbulência, jatos

1. INTRODUÇÃO

Devido numerosas aplicações de engenharia (sistemas de conversão e transmissão de energia, sistemas de transporte e geofísica), jatos circulares tem sido objeto de várias pesquisas experimentais e teóricas. Uma melhor compreensão da formação de estruturas turbulentas do escoamento tornam possível um controle ativo do jato (taxa de espalhamento, otimização de processos de mistura, etc.), além de ser necessária para o refinamento de teorias e modelos.

Os métodos para análise de problemas que envolvem turbulência podem ser experimentais ou teóricos. Os métodos experimentais apresentam limitações e restrições, embora apresentem alta confiabilidade. Recentemente, os métodos teóricos têm revelado seu potencial, devido ao desenvolvimentos de modelos e métodos mais avançados e máquinas com alto potencial de cálculo e armazenamento de informações. Modelos clássicos, tais como a zero, a uma e a seis equações de transporte adicionais, e modelos contemporâneos, nos quais modelagens sub-malha são necessárias para a prática de Simulação de Grandes Escalas (SGE) têm sido muito utilizados para simular os fenômenos físicos da turbulência.

A Simulação de Grandes Escalas é uma metodologia na qual as estruturas turbulentas transportadoras de energia e quantidade de movimento são simuladas diretamente pela solução das equações filtradas, enquanto as menores estruturas são modeladas. Esta metodologia possibilita obtenção de informações instantâneas sobre o escoamento, permitindo maior nível de detalhamento em comparação aos modelos clássicos, os quais permitem apenas obtenção de informações estatísticas.

Neste trabalho, a metodologia de simulação de grandes escalas foi aplicada para análise do escoamento de um jato circular tridimensional a um número de Reynolds igual a 25.000, com o

intuito de visualizar a formação e desenvolvimento de estruturas coerentes e realizar comparações a dados experimentais.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICOS

A modelagem matemática dos escoamentos de fluidos é representada pelas equações de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento. Após filtragem das equações de Navier Stokes, eliminação dos termos não lineares e considerando comportamento de turbulência sub-malha análogo ao mecanismo molecular dissipativo, apresentamos as seguintes equações filtradas, em notação tensorial.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} \quad (2)$$

onde:

$$\sigma_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) \quad (3)$$

é o tensor efetivo expresso por derivadas parciais. O coeficiente de transporte escalar efetivo é representado simplesmente como:

$$\mu_{eff} = \mu_{mol} + \mu_{sgs} \quad (4)$$

onde: μ_{sgs} é modelado usando modelo de Smagorinsky (1963) SGS:

$$\mu_t = 2C_p \Delta^2 |\overline{S}| \quad (5)$$

onde: $C = C_s^2$, $C_s = 0,1$ e Δ é o filtro espacial (igual ao tamanho da célula)

$$|\overline{S}| = \sqrt{2\overline{S_{ij}S_{ij}}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

2.1. Esquema Numérico

Sistema em notação vetorial :

$$\frac{\partial \overline{U}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{F}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{G}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{H}}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Os cálculos avançam no tempo através de um esquema de Runge-Kutta:

$$\overline{U}_{i,j,k}^{(1)} = \overline{U}_{i,j,k}^n + \Delta t L_h \left(\overline{U}_{i,j,k}^n \right) \quad (8)$$

$$\bar{U}_{i,j,k}^{(n+1)} = \frac{1}{2} \left[\bar{U}_{i,j,k}^n \bar{U}_{i,j,k}^{(l)} + \Delta t L_h \left(\bar{U}_{i,j,k}^{(l)} \right) \right] \quad (9)$$

onde: L_h é operador diferença-finita espacial que retém a propriedade de conservação

$$L_h \left(\bar{U}_{i,j,k}^n \right) = \frac{\bar{F}_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - \bar{F}_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} + \frac{\bar{G}_{i,j-\frac{1}{2},k}^n - \bar{G}_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} + \frac{\bar{H}_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n - \bar{H}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} \quad (10)$$

Os fluxos viscosos são calculados a partir de diferenças espaciais centrais de 2ª ordem. Parte dos fluxos invíscidos é avaliada usando uma aproximação parabólica “piecewise” uniforme e o solver de Rieman baseado em características linearizadas.

Problemas teste realizados utilizando o método de Rieman (Chernousov, 2001) demonstraram que este solver é essencialmente não-iterativo e não requer multiplicação de vetor/matriz. O solver mostrou-se extremamente rápido e o esquema resultante pode produzir soluções numéricas satisfatórias para problemas sub e supersônicos governados pelas leis de conservação hiperbólicas da dinâmica de fluidos. Segundo, Chernousov (2001), o procedimento não apresenta dificuldades para problemas de diferentes dimensões e para cálculos de grandes escalas este solver pode ajudar a economizar tempo considerável.

2.3. Jato Circular Tridimensional

Para validação da modelagem matemática foi simulado um jato circular livre tridimensional de diâmetro D . O domínio de cálculo foi definido em função do diâmetro do jato, sendo $16D$ na direção x e $10D$ nas direções y e z .

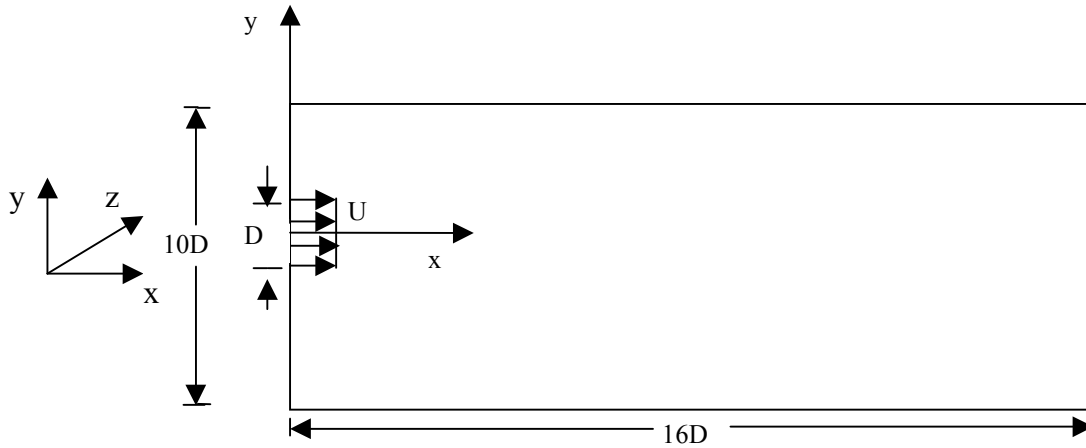


Figura 1: Representação do Domínio de Cálculo

Condições de contorno para a entrada:

$$u(x=0,y,z) = U \quad \text{para } -D/2 \leq y \leq D/2, \quad (11)$$

$$u(x=0,y,z) = 0,0 \quad \text{para } y < -D/2 \text{ e } y > D/2 \quad (12)$$

$$p(x=0,y,z) = 0,0 \quad (13)$$

Condições de contorno para a saída

$$\frac{\partial u(x=16D, y, z)}{\partial x} = 0,0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial v(x=16D, y, z)}{\partial x} = 0,0 \quad (15)$$

$$p(x=16D, y, z) = 0,0 \quad (16)$$

Condições de contorno para as paredes inferior e superior:

$$u(x, y=-5D, z) = u(x, y=5D, z) = 0,0 \quad (17)$$

$$v(x, y=-5D, z) = v(x, y=5D, z) = 0,0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial p(x, y=-D/2, z)}{\partial y} = \frac{\partial p(x, y=D/2, z)}{\partial y} = 0,0 \quad (19)$$

Condições de periodicidade foram aplicadas na direção z.

2.3. Experimento Numérico

O escoamento foi simulado para um número de Reynolds igual a 25.000 e número de Mach próximo a 0,3. Foi utilizada uma malha cartesiana, tridimensional, não-uniforme, com 512.000 células e um passo de tempo de 0,0004 s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras (2) e (3) mostram os campos de vorticidade tridimensional no plano xy em dois tempos físicos distintos. É possível verificar estruturas turbilhonares primárias do tipo Kelvin-Helmholtz, porém sob efeitos tridimensionais, sendo estes gerados pela interação entre estruturas primárias e filamentos secundários induzidos.

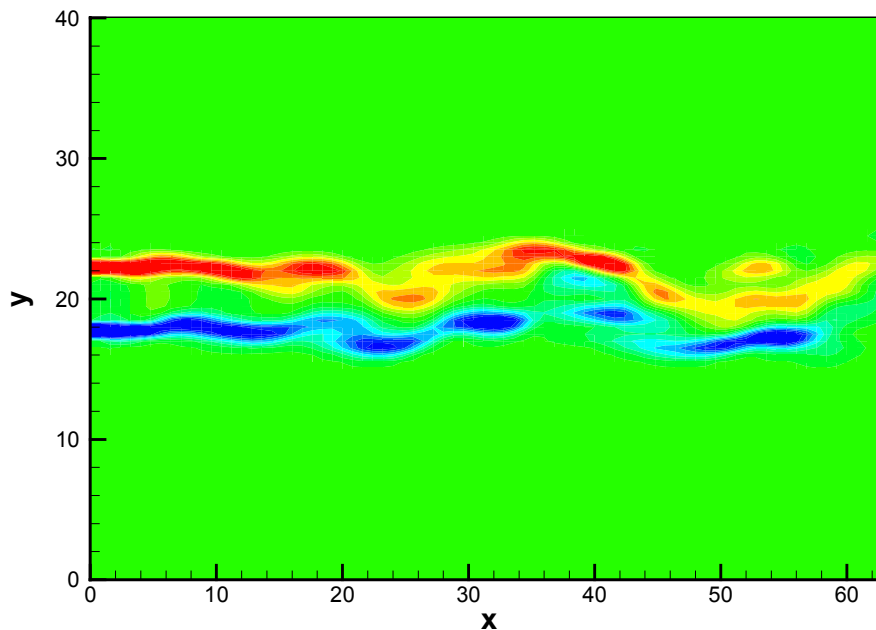


Figura 2: Campo de Vorticidade para um tempo físico de 20 s

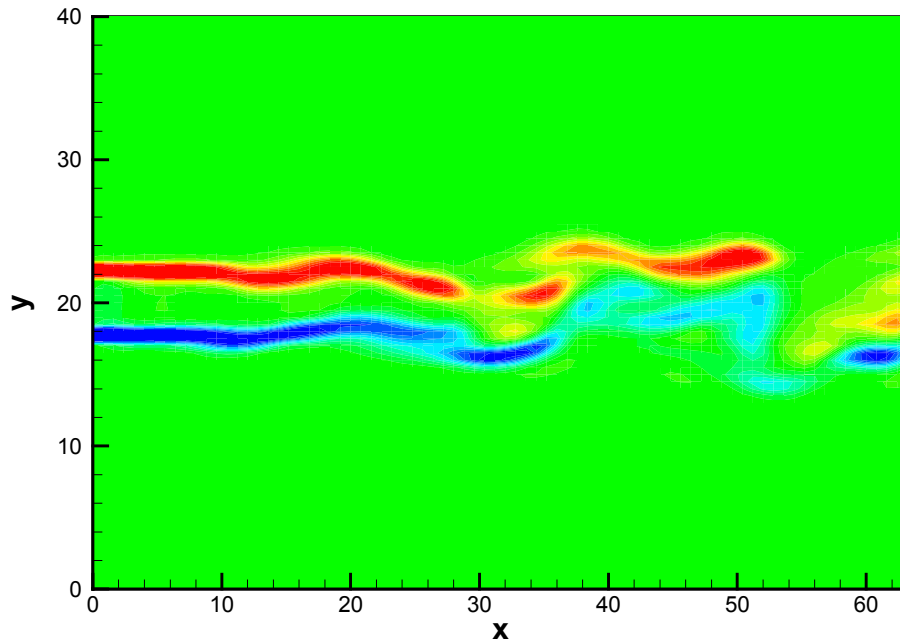


Figura 3: Campo de Vorticidade para um tempo físico de 28 s

As Figura (4) e (5) apresentam as isosuperfícies de vorticidade com dois níveis. As maiores estruturas turbilhonares podem ser visualizadas através da Fig (4). Na Figura (5) observa-se a formação de instabilidades tridimensionais, ilustrando o processo de tridimensionalização do escoamento.

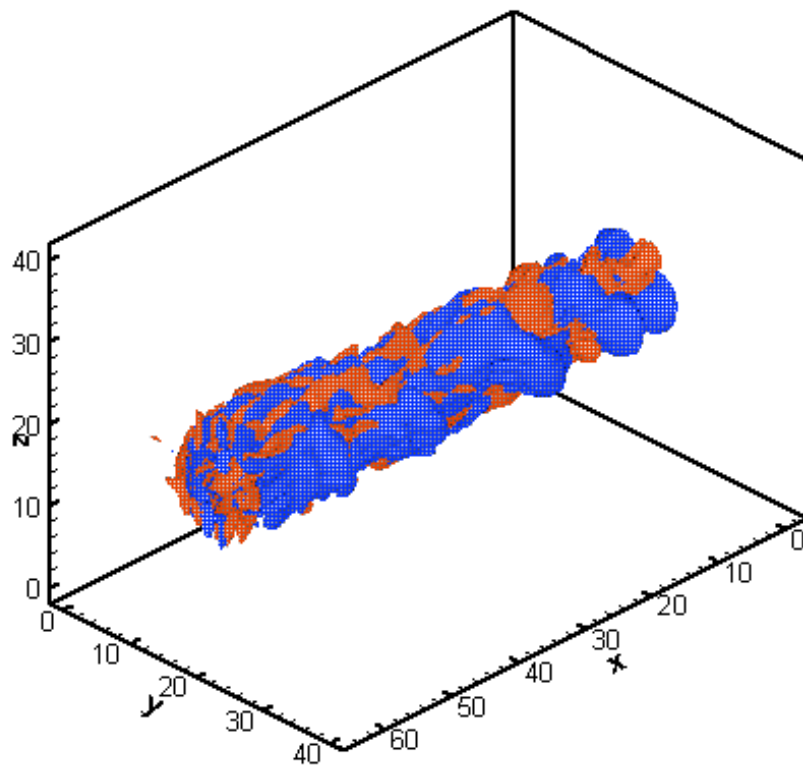


Figura 4: Isosuperfície de Vorticidade com 2 níveis: -0.2 e 0.2

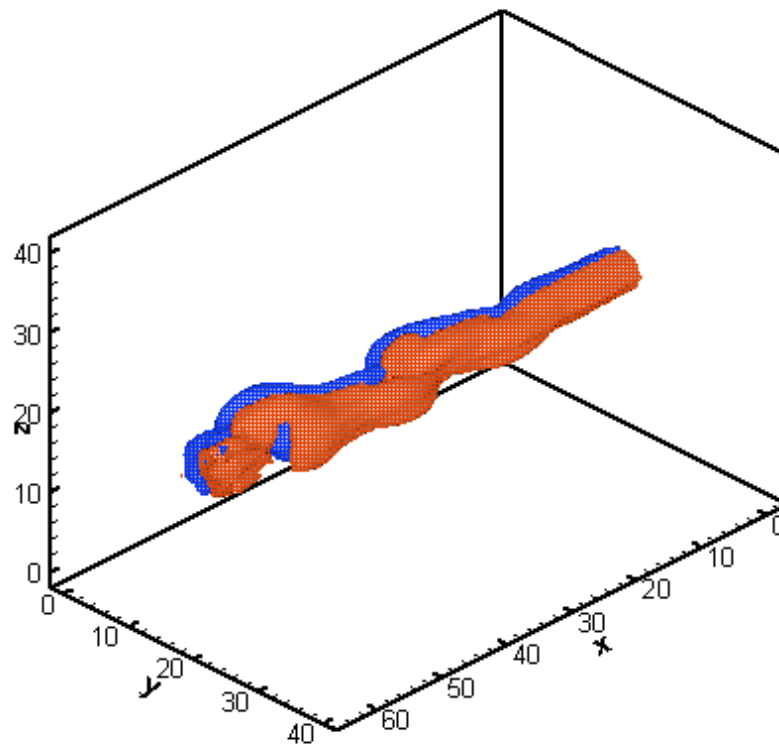


Figura 5: Isosuperfície de Vorticidade com 2 níveis: -5,0 e 5,0

A Figura (6) mostra a evolução da velocidade axial média no eixo central do jato. Os valores numéricos encontram-se dentro da faixa experimental (Crow and Champagne, 1971 e Zaman and Hussain, 1980), apresentando comportamentos semelhantes.

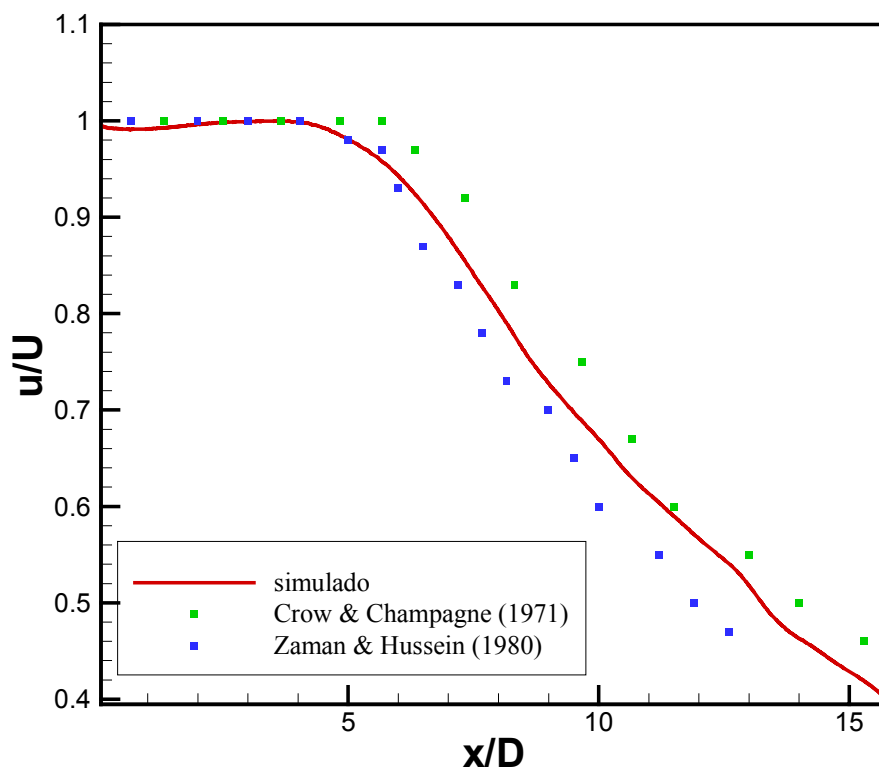


Figura 6: Comparação entre dados experimentais e simulados

4. CONCLUSÕES

Em termos globais, o software utilizado para o estudo permitiu a obtenção de resultados qualitativos consistentes. Os resultados quantitativos apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Cnpq pelo suporte financeiro destinado à realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Chernousov, A.A., 2001 “A Characristic-Based Approximate Riemann Solver”, (<http://www.geoticies.com/MotorCity/Pit/9939>)
- Chernousov, A.A., 2001 “LES of Mixing Layer and Flow in Square Duct by the Second-Order Explicit Scheme”, (<http://www.geoticies.com/MotorCity/Pit/9939>)
- Crow, S.C. and Champagne, F.H., 1971, “Ordely structure in jet turbulence”, J. Fluid Mech, Vol.48, pp 547-591.
- Smagorinsky, J. , 1963, “General Circulation Experiments with the Primitive Equations, I. The basic experiment.”, Monthly Weather Review Rev 91, pp. 99-164.
- aman, K.B.M.Q. and Hussain, A.K.M.F., 1980, “Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation, part 1, general jet response”, J.Fluid.Mech, Vol.101, pp 449-491.

LARGE-EDDY SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL ROUND JETS

Ana Marta de Souza

Faculty of Mechanical Engineering-Federal University of Uberlândia- Av. João Naves de Ávila, 2160-Uberlândia-MG
amsouza@mecanica.ufu.br

Francisco José de Souza

Faculty of Mechanical Engineering-Federal University of Uberlândia-Av. João Naves de Ávila, 2160-Uberlândia-MG
fjsouza@mecanica.ufu.br

Aristeu da Silveira Neto

Faculty of Mechanical Engineering-Federal University of Uberlândia-Av. João Naves de Ávila, 2160-Uberlândia-MG
aristeus@mecanica.ufu.br

Abstract: *This work presents a preliminary study of a developing three-dimensional round jet. The Large-Eddy Simulation was used to study a jet flow with Reynolds number 25.000. The results allow to visualize the formation and temporal evolution of coherent structures. The simulation results were compared with experimental data.*

Keywords: *large-eddy simulation, turbulence, jets*