

# Influência do “swirl” sobre o jato livre 3D

**André Reinaldo Novgorodcev Junior**

E-mail: andrernjr@yahoo.com

**Antonio C. P. Brasil Junior**

E-mail: brasiljr@unb.br

Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Mecânica.

LEA - Laboratório de Energia e Ambiente.

70910-900 Brasília. DF. Brazil.

**Resumo:** *O jato livre 3D em um escoamento cruzado é um caso clássico e complexo de escoamento 3D encontrado em muitas aplicações industriais. Neste problema o fluido é injetado por um orifício com diâmetro  $D$ , com velocidade  $w_i$  em um escoamento perpendicular com velocidade  $U_0$ . O objetivo deste trabalho é estudar a fundo a influência do “swirl” no comportamento e na topologia do jato livre. Para isso serão realizadas simulações numéricas com o auxílio do software comercial C.F.X. 5.5, onde será adotado o Modelo  $k - \varepsilon$  para a modelagem de turbulência. Os resultados obtidos serão comparados com resultados experimentais e numéricos sem “swirl”.*

**Keywords:** *Jato Livre, Jato 3D, Simulação Numérica, Swirl*

## 1. Introdução

O jato livre 3D em um escoamento cruzado é um caso clássico e complexo de escoamento 3D encontrado em muitas aplicações industriais. Neste problema fluido é injetado por um orifício com diâmetro  $D$ , com velocidade  $W_i$  e uma componente rotacional  $\dot{w}$  em um escoamento perpendicular com velocidade  $U_0$ . Pode se adicionar uma componente rotacional  $\dot{w}$  ao jato, gerando um movimento helicoidal, chamado de “swirl”. Esse escoamento é altamente complexo por ser a composição de três escoamentos distintos. O escoamento cruzado se comportar como o escoamento em volta do cilindro, num primeiro momento, ao se encontrar com o jato. Ao mesmo tempo o jato vai se deformando assumindo uma curvatura na direção do escoamento livre e tendo seus limites deformados devido as tensões viscosa, além do jato ir se expandindo, do mesmo modo que se expandiria sem o escoamento cruzado.

A importância do estudo deste escoamento é relacionado com um grande numero de aplicações industriais nos quais ele pode ser aplicado. Equipamentos de mistura da indústria química, escoamento em camaras de combustão de turbinas, resfriamento por filme de pás de turbinas e aerodinâmica V/STOL, são exemplos clássicos de aplicações desse tipo de escoamento. Uma aplicação que vem tendo muita ênfase mundialmente é o estudo da dispersão de poluentes provenientes de chaminés e de emissários submarinos, é no estudo deste conceito que o presente trabalho esta inserido.

Os principais parâmetros que regem esse escoamento são o numero de Reynolds calculado com base no diâmetro do injetor ( $Re_D$ ), a relação entre a velocidade de injeção e a velocidade do escoamento livre ( $R$ ), equação (1), e a taxa de swirl, definida como a razão entre do componente de swirl da velocidade ( $Q$ ) e a velocidade média total media do jato medido na posição  $r/D \simeq 0.41$  (equação (2)). Onde  $r$  é o raio medido a partir do centro do jato.

$$Re_D = \frac{D \cdot W_i}{\nu} ; R = \frac{W_i}{U_0} \quad (1)$$

$$S = \left( \frac{Q}{W_i} \right)_{r \simeq 0.41D} \quad (2)$$

Toda a topologia 3D que envolve este problema é muito difícil de ser simulada numericamente. Isso requer uma boa discretização do domínio e modelos de turbulência acurados, principalmente para descrever o escoamento na região proxima a parede.

O objetivo desse trabalho é utilizar uma metodologia de simulação desenvolvida em trabalhos anteriores, Brasil and Novgorodcev [2] para simular um jato 3D em um escoamento cruzado sobre a influência do “swirl” e comparar esses resultados com resultados obtidos numericamente por Novgorodcev [3] e experimentalmente por Crabb *et al* [1] para o jato sem “swirl”.

## 2. Formulação Matemática

O modelo  $k - \varepsilon$  é o modelo mais utilizado industrialmente. Os primeiros trabalhos baseados nesse modelo foram os de Chou (1954), Davidov (1961) e Harlow e Nakayama (1968). Mas a seu desenvolvimento definitivo se deu nos trabalhos publicados por Jones e Launder (1972,1973). Esse paper se tornou tão popular que a modelagem proposta por eles é chamada de “modelo  $k - \varepsilon$  padrão”. Este modelo foi escolhido neste trabalho devido aos bons resultados obtidos com esse modelo em estudos anteriores de jatos 3D.

O ponto de partida para esse modelo são as equações do tensor de Reynolds e a equação da energia cinética de turbulência. A ideia desse modelo é derivar a equação exata para  $\varepsilon$  e achar aproximações adequadas para a equação exata, governando o seu comportamento. A equação exata para  $\varepsilon$  é encontrada tomando-se o seguinte momento da equação de Navier-Stokes. As equações do modelo  $k - \varepsilon$  padrão de Jones e Launder (1972,1973) estão enumeradas abaixo. Uma descrição mais detalhada do método utilizado para se chegar nessas equações é descrito por Wilcox [6].

### Viscosidade turbulenta

$$\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (3)$$

### Energia Cinética de Turbulência

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_T / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

### Taxa de Dissipação

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_T / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

### Constantes de Fechamento

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (6)$$

### Relações Auxiliares

$$P_k = 2\mu_T S_{ij} S_{ij} \quad (7)$$

No presente estudo foi considerado escoamento em regime permanente, com pressão de referência de 101325 Pa (1atm), e utiliza ar nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) como fluido de trabalho. Os cálculos foram feitos sem transferência de calor.

A geometria do domínio foi escolhida de tal forma que as paredes laterais e superior fiquem suficientemente afastadas do jato, para que sua interferência no escoamento fosse mínima. O domínio computacional se estende por 6 diâmetros (6D) do eixo de simetria para uma superfície livre, lateralmente, 6D do piso para a superfície livre, verticalmente, 2,5D da entrada do escoamento não perturbado para a entrada do jato e 11,5D do escoamento não perturbado para a saída do escoamento, como representado na figura (1).

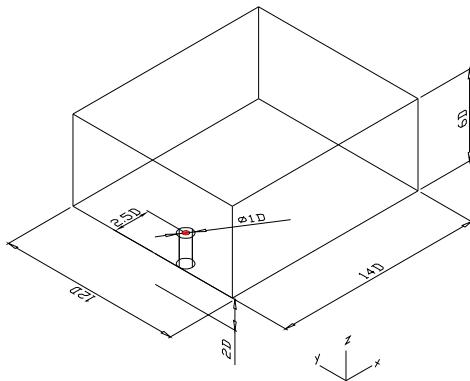


Figure 1: Domínio Computacional

A posição das condições de contorno serão indicadas por parâmetros adimensionais, em relação a origem dos eixos de referência que esta posicionado na entrada do jato livre na região de escoamento cruzado (ponto em vermelho na figura 1). Todos os valores nessa seção estão igualmente escritos de forma adimensional. Todas

as adimensionalizações foram feitas com base nos valores de D e de  $U_0$ . O valor dessas constantes foi escolhido de forma a obter equivalência com o experimento de Crabb et al. [1] e valem D=25.4mm e  $U_0 = 12m/s$ .

Para a entrada do escoamento livre ( $X/D=-2.5$ ) foram impostos perfis de velocidade (U, V e W), energia cinética de turbulência (k) e a taxa de dissipação de energia ( $\varepsilon$ ) adimensionais obtidos experimentalmente por Crabb *et al* [1]. Neste perfil as velocidades V e W são iguais a 0, enquanto U é dado pela expressão abaixo.

$$\begin{cases} U = 0 & \text{se } Z^* = 0 \\ U = \exp(0.142868 \ln(Z^*/0.07)) & \text{se } 0 < Z^* < 0.07; \\ U = 1 & \text{se } Z^* \geq 0.07. \end{cases}$$

Os valores de  $k$  são dados pela expressão .

$$\begin{cases} k = 0 & \text{se } Z^* = 0 \\ k = 6e^{-3} * (1 - 14.286 * Z^*) + 1e^{-4} & \text{se } 0 < Z^* < 0.07; \\ k = 1.e^{-4} & \text{se } Z^* \geq 0.07. \end{cases}$$

Os valores de  $\varepsilon$  são dados pela expressão.

$$\begin{cases} \varepsilon = 0 & \text{se } Z^* = 0 \\ \varepsilon = 4.4e^{-3} * \frac{1-14.28*Z^*}{\exp(0.857*\ln(14.28*Z^*))} + 9e^{-6} & \text{se } 0 < Z^* < 0.07; \\ \varepsilon = 9.e^{-6} & \text{se } Z^* \geq 0.07. \end{cases}$$

Na entrada do jato ( $Z/D=-2$ ) foi imposta uma condição de velocidade normal de  $W_i = 2.3 * U_0$  e 5% de intensidade de turbulência e dois valores diferentes para o numero de “swirl” S=0.14 e S=0.28.

Na saída do escoamento ( $X/D=11.5$ ) foi imposta uma condição de saída com pressão estática determinada, igual a pressão de referência.

Na parede superior ( $Z/D=6$ ), para simular condição de altura infinita, foi utilizada uma condição de abertura com as seguintes condições impostas:

$$\begin{cases} U = 1; \\ V = 0; \\ W = 0; \\ k = 1.e^{-4}; \\ \varepsilon = 9.e^{-6}. \end{cases}$$

Nas paredes laterais ( $Y=-6D$  e  $Y=6D$ ) foram utilizadas condições de plano de simetria.

Nas paredes do duto de entrada do jato e na parede inferior ( $Z=0D$ ) foram utilizadas condições de parede sem deslizamento.

A malha utilizada foi construída pelo gerador de malha do software CFX, onde, foi aplicada uma maior concentração de nós na trajetória do jato. A trajetória do jato que foi retirada do trabalho de Crabb *et al* [1]. A malha resultante pode ser visualizada, em um corte ZY passando pelo centro do canal de injeção, na figura(2).

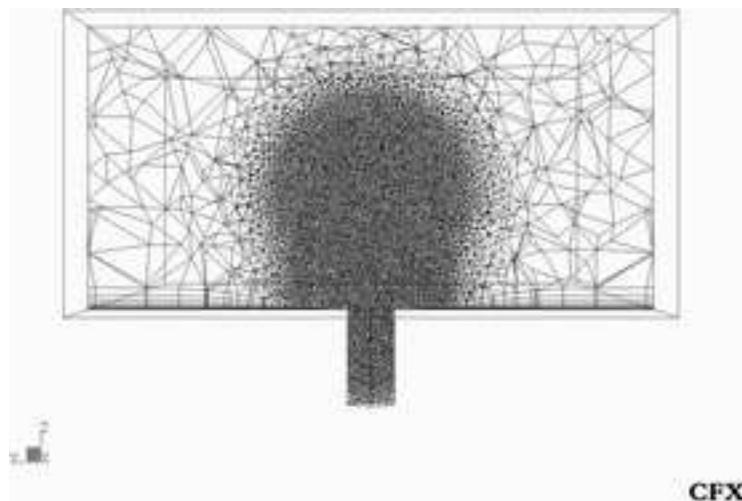


Figure 2: Malha em um corte ZY passando pelo centro do canal de injeção

#### 4. Resultados

Por meio de linhas de corrente traçadas a partir da entrada do jato é possível identificar a componente de Swirl, imposta na entrada do jato, e as alterações provocadas por esta componente na topologia do Jato. A figura (3) mostra as linhas de corrente para uma simulação sem Swirl nos planos XZ e XY, que servirão de base para a comparação com os jatos com Swirl. A figura (4) mostra as linhas de corrente vistas num perfil YZ, por um observador a jusante do escoamento, para as dois números de Swirl simulados ( $S=1.14$  e  $1.28$ ), a figura (5) mostra as linhas de corrente vistas num perfil XY e a figura (6) é mostrada as linhas de corrente vistas num perfil ZX. Nestas visualizações pode-se notar que a presença de Swirl quebra a simetria do jato. Na figura (4) pode-se ver que no lado direito do jato (visto a jusante) há uma maior concentração de linhas de corrente e uma maior curvatura e expansão das mesmas, com o aumento do numero de swirl o jato teve uma maior expansão e um aumento da rotacionalidade das linhas de corrente. Já na figura (5), pode-se visualizar a componente se swirl da entrada e para o maior valor de V pode-se também visualizar um extreitamento do jato seguido de uma nova expansão, fenômeno esse que ocorre simultaneamente com o surgimento de oscilações no alinhamento do jato com o escoamento cruzado, como pode ser visualizado na figura (6).

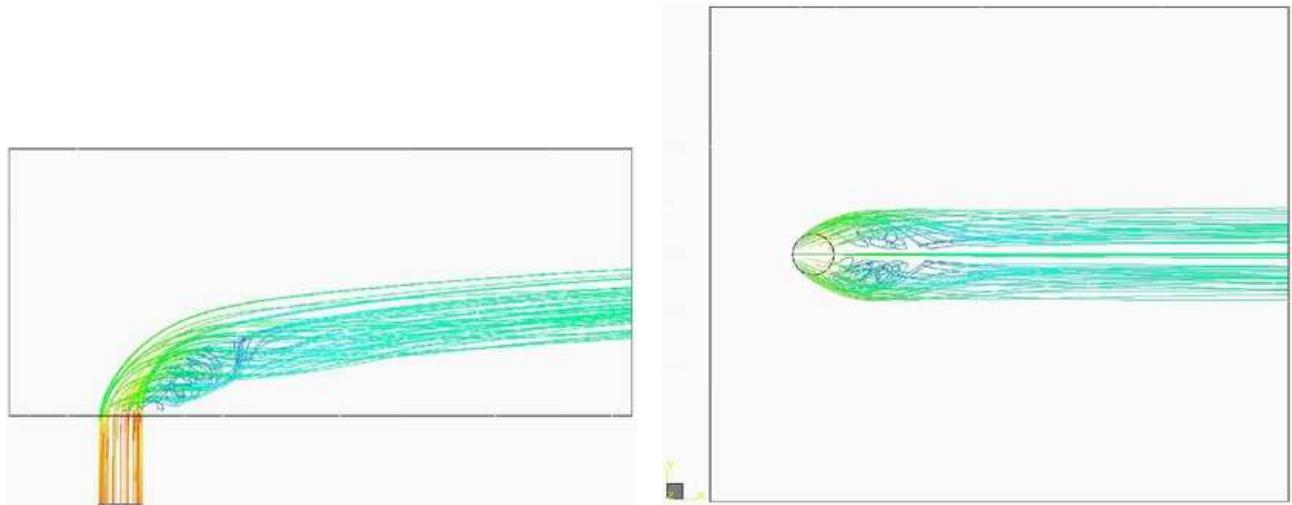


Figure 3: Linhas de Corrente sem Swirl nos planos XZ e XY

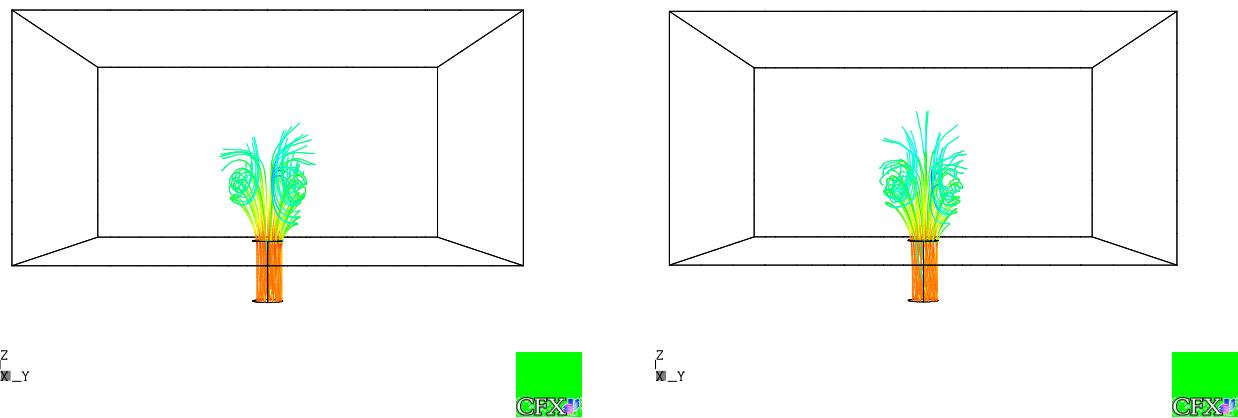


Figure 4: Linhas de Corrente (YZ) ( $S=1.14$  e  $S=1.28$ )

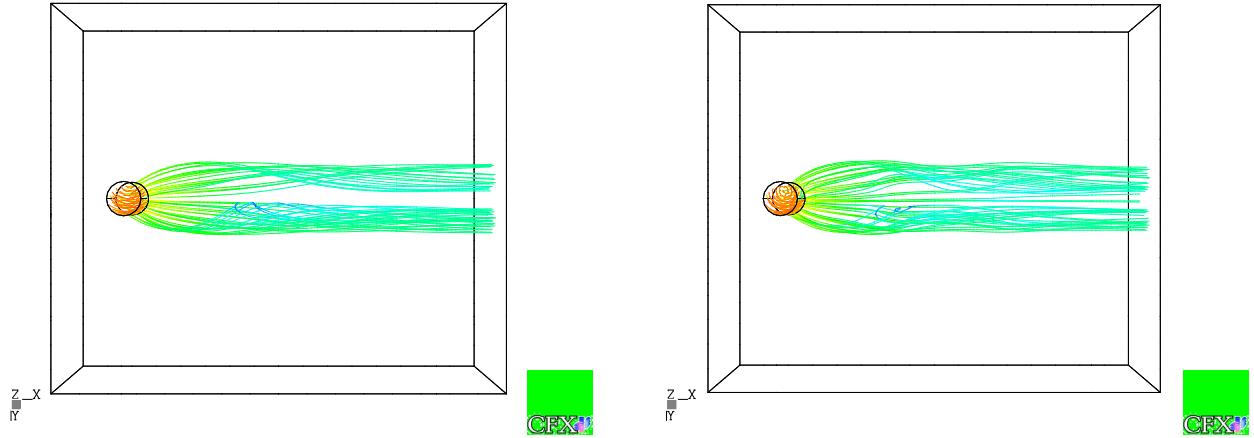


Figure 5: Linhas de Corrente (XY) ( $S=1.14$  e  $S=1.28$ )

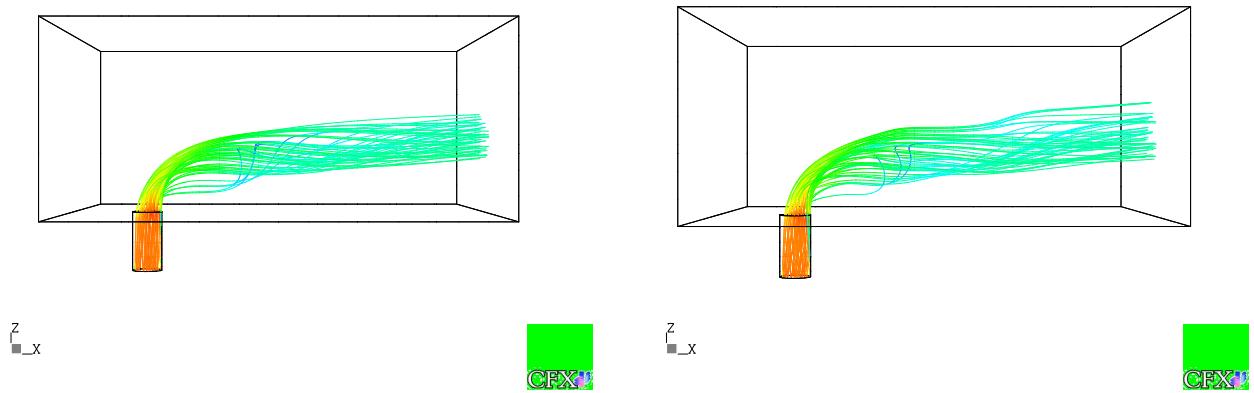


Figure 6: Linhas de Corrente (ZX) ( $S=1.14$  e  $S=1.28$ )

Analizando os campos de velocidade  $V$  pode-se notar que com o aumento do numero de Swirl há um aumento da expansão do “corpo” do jato (principalmente para a direita) acompanhado de um aumento nas componentes  $V$  da velocidade. Outro fenômeno que aumenta de intensidade com o aumento do numero de Swirl é a inibição da esteira turbulenta.

Analizando os campos de velocidade  $W$  pode-se notar que o lado direito do jato tende a ter sua trajetória mais ascendente e a gerar uma maior zona de recirculação. Pode-se constatar também a existência de uma grande região com velocidades  $W$  maiores que zero acima do jato e que as regiões com velocidades  $W$  negativas que ficam ao redor do jato são bem maiores que as equivalentes para jatos sem Swirl. A intensidade de ambos os fenômenos descritos nesse parágrafo aumenta com o aumento do numero de Swirl.

Com o aumento do numero de Swirl os perfis de velocidade do jato vão se alterando e a trajetória do jato vai se tornando instável e começa a oscilar. Uma forma de visualizar esse fenômeno é através dos perfis de velocidade na direção do escoamento cruzado ( $U$ ) no plano de simetria do jato. Na figura (7) estão representados esses perfis para um jato sem swirl obtidos experimentalmente por Crabb *et al* [1] e numericamente por Novgorodcev [4] e perfis obtidos para jatos com numeros de swirl 1.14 e 1.28 em duas posições  $x=2D$  e  $x=4D$

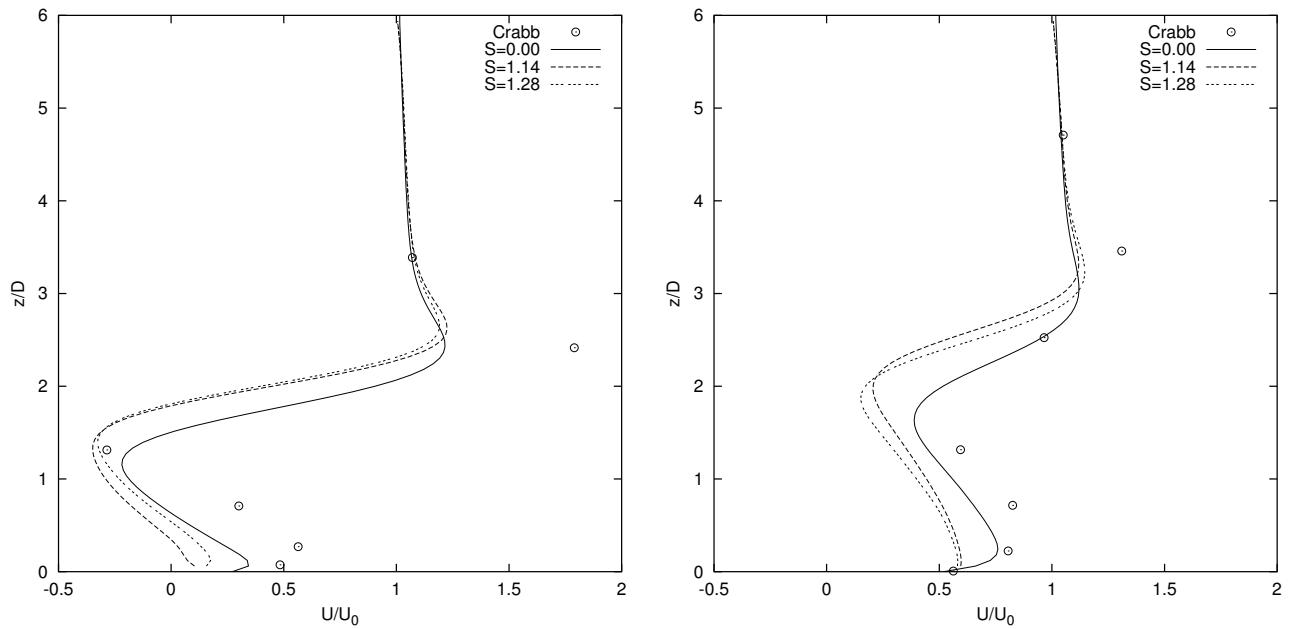


Figure 7: Perfis de velocidade vertical ( $x=2D$  e  $x=4D$ )

#### 4. Conclusão

Foram simulados jatos com dois números de Swirl distintos (0.14 e 0.28), com resultados muito bons. As visualizações geradas a partir dessas simulações permitiu a comprovação do aumento da assimetria, da difusão do jato e da instabilidade do mesmo com o aumento do numero de Swirl. Foi também notada uma inibição da esteira turbulenta proporcional ao aumento do numero de Swirl.

#### 5. Bibliografia

- [1]Crabb D., Durão D.F.G. and Whiterlaw J.H.; A round jet normal to a cross flow, ASME J. of Fluid Eng.,103:142-153,1981.
- [2]Brasil Jr., A.C.P.; Simulation Numerique par Elements Finis des Ecoulements Turbulents Tridimensionnels Avec Dispersion: Approches Eulerienne et Lagrangienne, L'Ecole Centrale de Lyon, 92-42, 1992
- [3]Brasil Jr., A.C.P. and Novgorodcev Jr., A.R.; 3D jet simulation using four turbulent model, COBEM 2003
- [4]Margason R.J.; Fifty Years of Jet in Cross Flow Research, AGARD meeting, 1, 247-2, 1993.
- [5]Novgorodcev Jr., A.R.; Simulação Numérica de Jato 3D - Influência do Swirl, Dissertação de Graduação do curso de Engenharia Mecânica, UnB, 2003
- [6]Wilcox, D.C.; Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Califórnia, USA, 1993
- [7]Yagci H. and Kavasaoglu M.S., Navier-Stokes Analysis of a Swirling Jet in Crossflow, AGARD meeting, 38, 1993.

# Influência do “swirl” sobre o jato livre 3D

**André Reinaldo Novgorodcev Junior**

E-mail: andrernjr@yahoo.com

**Antonio C. P. Brasil Junior**

E-mail: brasiljr@unb.br

Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Mecânica.

LEA - Laboratório de Energia e Ambiente.

70910-900 Brasília. DF. Brazil.

**Abstract:** *The 3D free jet in a cross flow is a classic and complex case of 3D flow with many industrial applications. In this problem fluid is injected from an orifice with diameter  $D$ , velocity  $w_i$  in a cross flow with velocity  $U_0$ . The objective of this work is study the influence of the swirl component on the behavior and topology of the free jet. Numerical simulations will be done with the commercial software C.F.X. 5.5. The  $k - \varepsilon$  model will be adopted to model the turbulence. The numerical results will be compared with experimental and numerical results without swirl.*

**Keywords:** *Free Jet, 3D Jet, Numerical Simulation, Swirl*