

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DA CAIXA DE ENTRADA PRIMÁRIA DA MÁQUINA SETE

COMPUTATIONAL FLOW ANALYSIS OF THE PRIMARY HEADBOX OF PAPER MACHINE NUMBER SEVEN

Rogério Dias de Oliveira^{1*}, Ivo Neitzel², Luiz Renato Pesch³, Alexandre Marconi de Souza da Costa¹, Nehemias Curvelo Pereira¹

^{1*} Autor para contato: Universidade Estadual de Maringá - UEM, Departamento de Engenharia Química, Maringá, PR, Brasil; (44) 3028-3990; e-mail: rogeriodo@gmail.com

² Faculdade de Telêmaco Borba - FATEB, Telêmaco Borba, PR

³ Klabin Papéis Monte Alegre, Fazenda Monte Alegre, Telêmaco Borba, PR

Recebido para publicação em 30/01/2007

Aceito para publicação em 06/08/2007

RESUMO

A caixa de entrada é o primeiro equipamento em uma máquina de papel. Sua função mais importante é distribuir a suspensão de fibras de maneira uniforme ao longo da tela formadora da máquina de papel. Os fenômenos de escoamento que ocorrem no interior da caixa de entrada são relacionados a diversas propriedades do papel, tais como perfil de gramatura, perfil de orientação de fibras e formação. A geometria interna da caixa de entrada, as passagens de fluxos e a turbulência gerada nessas passagens são muito importantes. Este trabalho teve por objetivo obter informações a respeito do comportamento do fluxo de suspensão de celulose no interior da caixa de entrada primária da máquina (MP-7) da Klabin Papéis Monte Alegre. Para alcançar esse objetivo foram empregadas técnicas de fluidodinâmica computacional. Simulações para o coletor, o banco de tubos e o bocal foram realizadas simultaneamente. Devido à complexidade da geometria da caixa de entrada, a mesma foi simplificada nas análises de fluidodinâmica computacional.

Palavras-chave: caixa de entrada, fluidodinâmica computacional, produção de papel

ABSTRACT

The headbox is the first equipment in a paper machine. The most important function of the headbox is to distribute the fiber suspension along the forming table of the paper machine. The flow phenomenon inside the headbox is related to

several properties of the final paper, such as the grammage profile, the fiber orientation profile and the formation. The internal geometry of the headbox, the flow passages and the turbulence generated in these passages are of great importance. Thus, the aim of this work was to obtain information related to the behavior of the fiber suspension flow inside the primary headbox of paper machine number seven at Klabin Papéis Monte Alegre. In order to achieve this objective, computational fluid dynamics techniques were used. Simulations for the manifold, the tube bank and the nozzle were performed simultaneously. Due to its complexity, the geometry of the headbox was simplified in the analysis of the computational fluid dynamics.

Key words: headbox, computational fluid dynamics, paper production.

1. Introdução

A caixa de entrada tem por finalidade distribuir a suspensão de fibras de maneira uniforme ao longo da largura da tela formadora da máquina de papel. Apesar do projeto da caixa de entrada depender de variáveis como tipo de papel a ser produzido e velocidade da máquina, as caixas de entrada hidráulicas apresentam componentes comuns que desempenham funções também comuns. De acordo com Gullichsen e PaulaPuro (2000) esses componentes são o coletor, o banco de tubos e o bocal. O primeiro é responsável pela distribuição da massa ao longo da largura da máquina. O banco de tubos é introduzido para melhorar o perfil transversal do fluxo e gerar a turbulência necessária para quebrar os flocos de massa. Por fim, o bocal tem a função de acelerar a massa até a velocidade do jato.

O objetivo do presente trabalho foi estudar o fluxo de suspensão de celulose no interior da caixa de entrada primária da máquina sete da Klabin Papeis Monte Alegre. Para alcançar esse objetivo, foram utilizadas técnicas de fluidodinâmica computacional.

Alguns trabalhos na literatura mostram os resultados da modelagem matemática e simulação numérica de escoamentos no interior de caixas de entrada. No trabalho de Hämäläinen (1993) o fluxo foi descrito como bidimensional e o modelo de turbulência empregado foi o modelo k- ϵ com as funções de parede. Utilizou-se o método de elementos finitos na solução das equações diferenciais parciais. Para simular o banco de tubos empregou-se uma condição de contorno específica usando a técnica da homogeneização. O efeito de dispositivos de controle utilizados na operação

de caixas de entrada tais como perfil de abertura do lábio e abertura de válvula de recirculação do coletor foram estudados por Lee e Pantaleo (1998). Para a modelagem do escoamento turbulento foi utilizado o modelo k- ϵ . Os autores correlacionaram o perfil de orientação de fibras medido experimentalmente com o chamado ângulo de fluxo obtido numericamente a partir dos resultados de fluidodinâmica computacional. Bandhakawi e Aidun (1999) realizaram um estudo do escoamento turbulento no bocal de uma caixa de entrada empregando dois modelos de turbulência. Inicialmente foi utilizado o modelo k- ϵ aproximando o tensor de Reynolds pela técnica de renormalização de grupos (modelo RNG), o qual é derivado das equações instantâneas de Navier-Stokes. O outro modelo empregado na análise foi o modelo de tensão de Reynolds (RSM). Esse modelo resolve equações instantâneas para cada termo no tensor tensão de Reynolds. Hua et.al (2000) estudaram o fluxo turbulento em uma caixa de entrada. Foram calculados os fluxos de velocidades, pressões, energia cinética e dissipação de energia cinética no coletor, tubos difusores e seção de convergência simultaneamente. Para modelar o escoamento foram utilizadas as equações de Navier-Stokes com a média de Reynolds para fluidos incompressíveis. Para o tensor tensão de Reynolds foi utilizado o modelo k- ϵ padrão com as funções de parede. Parsheh (2003) realizou um estudo do fluxo em contrações com aplicações em caixa de entrada. Um dos objetivos do autor foi estudar a mistura de diferentes camadas na formação de uma folha de papel multicamada utilizando uma caixa de entrada estratificada. Para isso, foram utilizados dois modelos de turbulência,

o modelo k-ε e o modelo de tensões de Reynolds (RSM).

2. Métodos

2.1. Modelo Físico da Caixa de Entrada

A caixa de entrada primária da MP-7 é composta por dois coletores, mil e oitenta tubos difusores, bocal, além de um sistema de controle de perfil transversal de gramatura por consistência. Os tubos difusores são divididos em seis filas de cento e oitenta tubos. O coletor da linha base alimenta duas filas de tubos difusores enquanto o coletor da linha meio alimenta quatro filas. A largura total da caixa de entrada é de 6,741 m. Os tubos difusores apresentam três partes, sendo uma entrada cilíndrica, uma expansão e finalmente uma contração. A saída do tubo é retangular sendo seu comprimento total igual a 0,589 m. O comprimento do bocal é de 0,838 mm. A Fig. 1 mostra um esquema da caixa de entrada primária da máquina sete. Nessa figura, os dois dutos de seção quadrada que se afunilam em uma direção são os coletores. Após os

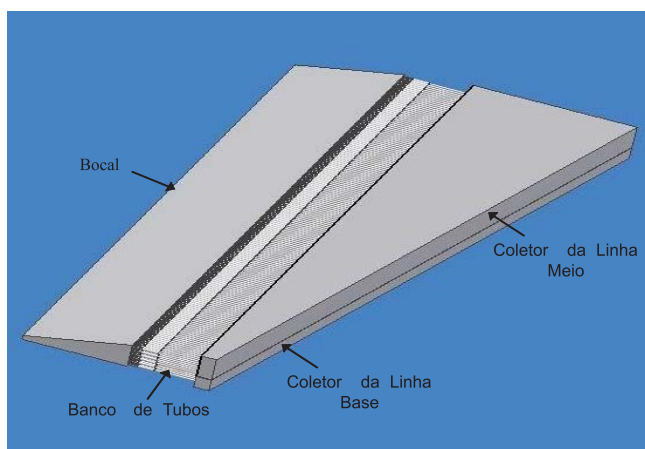


Figura 1 - Caixa de entrada primária da máquina sete.

2.2. Modelo Computacional da Caixa de Entrada

Devido a limitações computacionais, o modelo computacional da caixa de entrada foi simplificado. Desta forma, foram empregados na simulação vinte e cinco colunas de tubos difusores, resultando em um total de cento e cinquenta tubos. A largura da caixa de entrada neste modelo foi de 0,898 mm. A Fig. 2 mostra o modelo computacional utilizado. Mesmo com a

simplificação da geometria, a malha computacional gerada apresentou mais de 1,2 milhões de volumes de controle.

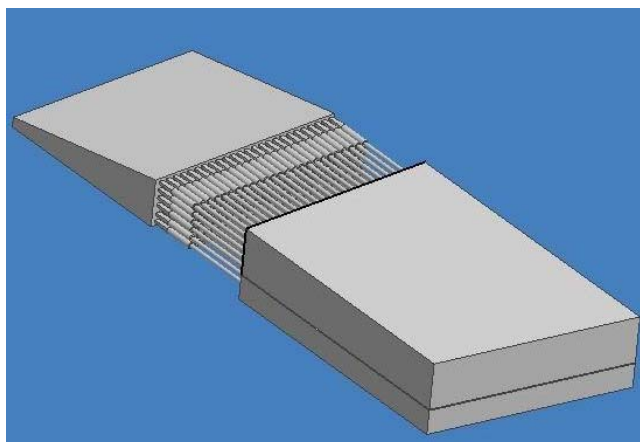


Figura 2 - Modelo computacional empregado nas simulações.

Neste estudo as propriedades da suspensão de celulose foram consideradas iguais as da água e o escoamento foi considerado incompressível. Para a modelagem do escoamento turbulento foram utilizadas as médias de Reynolds para as equações de Navier-Stokes. Para maiores detalhes a respeito da modelagem de escoamentos turbulentos o leitor é recomendado a consultar a referência Bandhakawi e Aidun (1999). As Equações (1) e (2) abaixo foram empregadas para a conservação da quantidade de movimento e conservação da massa no regime turbulento, respectivamente.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla \bar{p} + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \hat{\tau} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

Em que:

\vec{u} = Vetor velocidade dado pela média temporal;

\vec{u}' = Vetor velocidade dado pela flutuação da

velocidade no tempo;

p = Pressão;

\vec{g} = Aceleração gravitacional;

ρ = Densidade;

$\hat{\tau}$ = Tensor tensão cinético e tensor

tensão de Reynolds;

O emprego das médias de Reynolds para as

equações de Navier-Stokes reduz o esforço computacional na solução de problemas de fluidodinâmica computacional. Entretanto, a utilização dessas equações introduz novos termos não conhecidos como o tensor tensão de Reynolds. Esse problema é conhecido como problema de fechamento e em princípio seria possível obter equações para esses novos termos, porém essas novas equações iriam conter novas variáveis. Desta forma, de acordo com Bandhakavi e Aidun (1999) e Hämäläinen (1993) é necessário introduzir um modelo de turbulência que relacione os termos não conhecidos das Equações (1) e (2) com termos conhecidos para fechar o conjunto de equações governantes.

Alguns modelos para o tensor tensão de Reynolds utilizam a hipótese de viscosidade turbulenta baseada em uma analogia entre movimentos molecular e turbulento. Desta forma, turbilhões de viscosidade são visualizados como moléculas, colidindo e trocando quantidade de movimento e obedecendo a leis similares a teoria cinética dos gases. Isto permite a descrição do tensor tensão de Reynolds de acordo com a Eq. (3) (Ranade, 2002):

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_T \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

δ_{ij} é conhecido como delta de Kronecker. A energia cinética turbulenta, k , pode ser expressa pela Eq. (4):

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (4)$$

Na Eq. (3), μ_T é conhecido como viscosidade turbulenta ou de turbilhão que em contraste com a viscosidade molecular não é uma função do fluido, mas sim do estado de escoamento do fluido.

Se a viscosidade e a energia cinética turbulenta forem conhecidas, a substituição da Eq. (3) em (1) leva a um conjunto fechado de equações.

No modelo $k-\varepsilon$ a viscosidade turbulenta é modelada utilizando duas variáveis, a energia cinética turbulenta média (k) e a dissipação de energia cinética turbulenta (ε). Nesse modelo, a viscosidade turbulenta é dada pela Eq. (5):

$$\mu_T = \rho C_\mu \mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

em que C_μ é um coeficiente empírico, cujo valor é 0,09. Para fechar o conjunto de equações, é necessário obter valores para k e ε . Valores locais para k e ε são obtidos resolvendo suas equações de conservação, que segundo Bandhakavi e Aidun (1999) podem ser escritas como:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u \cdot \nabla k} \right) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u \cdot \nabla \varepsilon} \right) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

G_k representa a geração (ou produção) de energia cinética turbulenta. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ são constantes empíricas cujos valores são respectivamente 1,44 e 1,92. σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos efetivos para k e ε e seus valores são 1,0 e 1,3 respectivamente.

Para a modelagem do escoamento na região próxima à parede foram utilizadas as funções de parede. Na utilização das funções de parede, um perfil universal de velocidades é assumido, como mostrado na Eq. (8).

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln y^+ + B \quad (8)$$

em que $K=0,5$ é a constante de van Karmann, B é uma constante empírica de valor 5 e u^+ e y^+ são definidos pelas Eqs. (9) e (10), respectivamente:

$$u^+ = \frac{U_t}{\sqrt{\tau_w/p}} \quad (9)$$

$$y^+ = \frac{\rho n_p \sqrt{\tau_w/p}}{\mu} \quad (10)$$

Nessas equações, n_p é a distância da camada em que a função de parede será utilizada até a parede, U_t é a componente da velocidade tangencial a parede e τ_w é a tensão de cisalhamento na parede. Considerando que o escoamento está em equilíbrio local, o que significa que a produção e a dissipação de energia cinética turbulenta são iguais, pode-se escrever segundo Launder e Spalding (1974):

$$\tau_w = \frac{k\rho C_\mu^{1/4} \sqrt{k} U_t}{\ln(y^+ E)} \quad (11)$$

em que E é uma constante empírica igual a 9,793.

Segundo Ranade (2002), a equação para a energia cinética turbulenta pode ser resolvida em todo o domínio do escoamento, inclusive próximo à parede. A condição de contorno imposta na parede é representada pela Eq. (12).

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

em que n é a coordenada normal à parede. A equação de conservação para ε não é resolvida próximo à parede, mas sim calculada segundo a Eq. (13).

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{kn_p} \quad (13)$$

As condições de contorno utilizadas neste trabalho foram pressões de entrada e pressões de saída nos coletores das linhas base e meio e pressão na saída do bocal. Os valores utilizados para essas condições de contorno foram dados reais de operação da máquina sete.

3. Resultados e Discussões

Análise do Fluxo nos Coletores

Em uma caixa de entrada, a suspensão de fibras entra pelos coletores, sendo que uma parcela é recirculada pela saída dos coletores e o restante segue para a o banco de tubos, o bocal e finalmente para a tela

formadora da máquina de papel. São comuns na indústria de papel os termos direção da máquina e direção cruzada da máquina, ou direção MD e direção CD respectivamente. A direção CD representa o sentido de fluxo de massa que entra pelos coletores e é recirculada pela saída dos mesmos. A direção MD representa o sentido de fluxo de massa que entra pelo banco de tubos e segue no sentido do bocal e tela formadora. Na Fig. 3 é mostrada a distribuição de velocidade na direção cruzada da máquina em três seções dos coletores. A velocidade CD na linha base é superior à velocidade CD na linha meio e pode-se notar que a velocidade CD apresenta uma pequena queda ao longo dos coletores. Na Fig. 4 está ilustrada a distribuição de velocidade na direção da máquina. Na entrada dos coletores, a direção do fluxo é predominantemente na direção CD. Devido a isso, a velocidade MD nessa região é baixa, em torno de 0,1 m/s. Ao longo dos coletores uma quantidade de massa é distribuída no banco de tubos o que faz com que o fluxo se direcione na direção MD. Isso causa um aumento da velocidade na direção da máquina, como pode ser visto na Fig. 4. É possível notar que a velocidade na direção MD é maior na região próxima a entrada dos tubos difusores. Nas três seções mostradas na Fig. 4, nota-se que a velocidade MD na região próxima a entrada dos tubos difusores é maior na região central da geometria da caixa de entrada simulada.

Com base na Fig. 3 e na Fig. 4 não é possível observar pontos de baixa velocidade que poderiam originar bolas de massa. Devido à geometria afunilada do coletor zonas de recirculação poderiam aparecer no mesmo, porém isso não é notado.

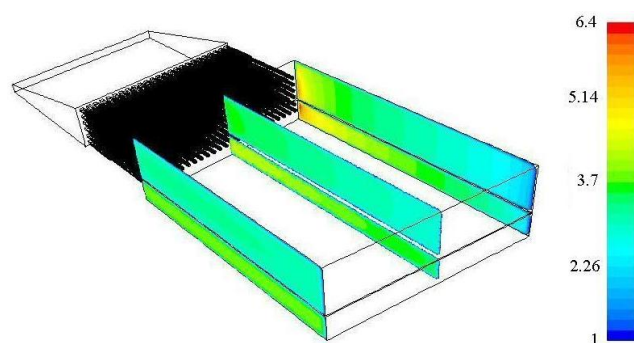


Figura 3 - Contorno de velocidade na direção cruzada da máquina nos coletores, em m/s.

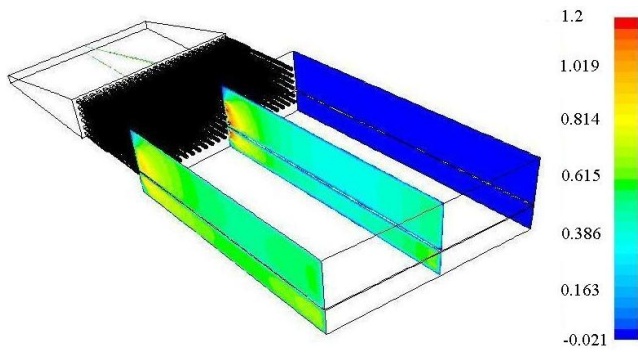


Figura 4 - Contorno de velocidade na direção da máquina nos coletores, em m/s.

Análise do Fluxo nos Tubos Difusores

Ao longo dos tubos coletores uma parte da suspensão é direcionada no sentido da máquina ao entrar nos tubos difusores. Na Fig. 5 é mostrada a entrada dos quatro primeiros tubos pertencentes a uma fila da linha meio. Nessa figura, é mostrado o contorno de velocidade na direção da máquina e os vetores velocidade. Os vetores indicam a direção, o sentido e o módulo da velocidade resultante. Pode-se notar que a velocidade MD é irregular na seção mostrada dos tubos, ou seja, a velocidade MD é menor no lado do tubo voltado para a entrada de massa no coletor. Nessa figura, a entrada de massa é pelo lado direito.

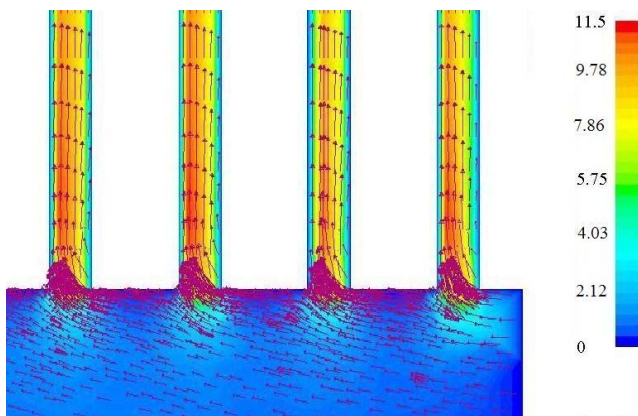


Figura 5: Contorno de velocidade MD na entrada dos tubos difusores, em m/s.

O fluxo segue pelos tubos difusores até a expansão, mostrada na Fig. 6. Durante a expansão, zonas de baixa pressão fazem com que regiões de recirculação com elevadas intensidades de turbulência apare-

çam. Essa região é responsável por gerar uma melhor dispersão das fibras e uniformizar o perfil transversal de velocidade no tubo. Na Fig. 7, é mostrada a seção do banco de tubos após a expansão. Nessa região, não é possível observar a não uniformidade da velocidade na direção MD apresentada pelo fluxo na entrada dos tubos, conforme discutido anteriormente (Fig. 5). Desta forma, a Fig. 7 mostra que a expansão nos tubos difusores da caixa de entrada primária da MP-7 é capaz de corrigir a não uniformidade do perfil transversal de velocidade presente na entrada dos tubos.

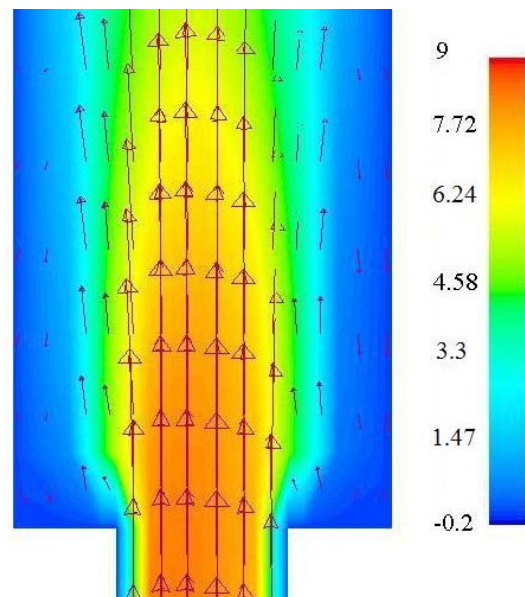


Figura 6 - Contorno de velocidade MD na expansão dos tubos difusores, em m/s.

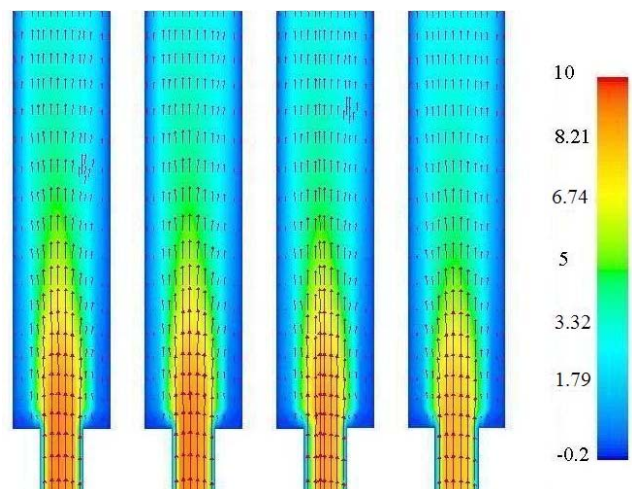


Figura 7 - Contorno de velocidade MD após expansão dos tubos difusores, em m/s.

Análise do Fluxo no Bocal

Ao sair do banco de tubos, a massa segue para o bocal. Uma de suas funções é acelerar o fluxo até a velocidade desejada e alinhar o fluxo na direção da máquina, reduzindo a velocidade na direção CD para controlar o perfil de orientação das fibras. Nas Figuras 8, 9 e 10 a seguir são mostrados contornos de velocidade na direção MD e vetores velocidade. Na Fig. 8, é mostrada a saída de três tubos, sendo que os dois tubos inferiores pertencem à linha base, enquanto o superior faz parte da linha meio. Nota-se que existem zonas de recirculação e que o fluxo nessa região é completamente desordenado. Essas zonas de recirculação aparecem nas regiões entre as saídas dos tubos difusores. Também é possível notar que o escoamento nas saídas dos tubos apresenta comportamento não homogêneo, ou seja, a saída de cada tubo difusor apresenta um comportamento diferente no perfil de fluxo. Devido a isso, para estudar o fluxo na seção de convergência da caixa de entrada, o modelo computacional empregado deve compreender o coletor, o banco de tubos e o bocal. O estudo da seção de convergência separada utilizando condições de contorno iguais para a saída de cada tubo coletor pode levar a resultados duvidosos. Na Fig. 9, é apresentada a saída de seis tubos difusores e uma maior parcela do bocal. Nota-se que o fluxo começa a alinhar-se na direção MD. Na Fig. 10, a saída do bocal é mostrada. Observa-se que nessa região o fluxo está praticamente alinhado na direção MD.

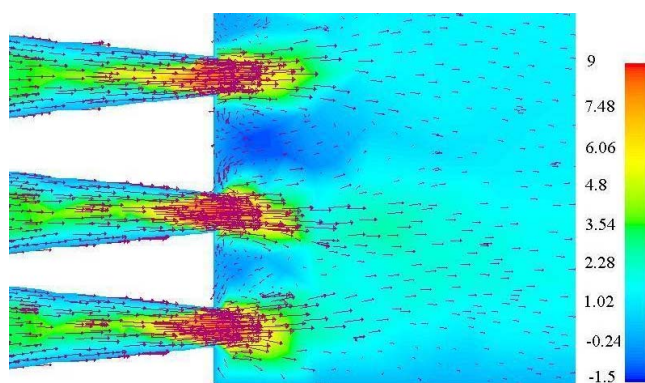


Figura 8 - Contorno de velocidade MD na saída do banco de tubos, em m/s.

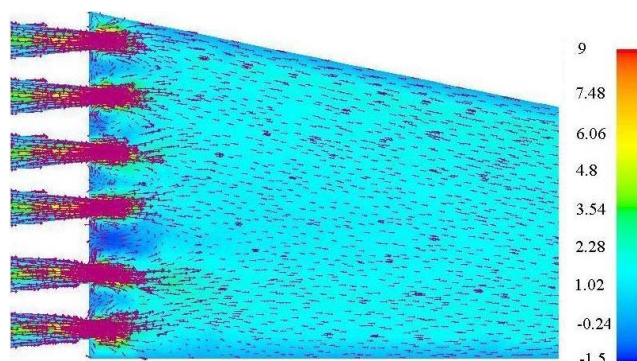


Figura 9 - Contorno de velocidade MD mostrando o desenvolvimento do fluxo no bocal, em m/s.

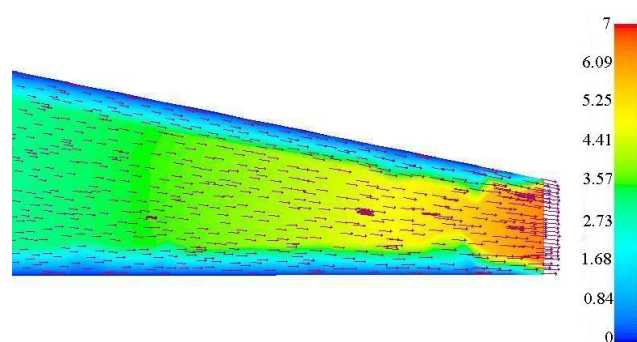


Figura 10 - Contorno de velocidade MD mostrando a saída do bocal.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Klabin Papéis Monte Alegre pelo suporte financeiro e técnico para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. BANDHAKAVI, V. AND AIDUN, C. Analysis of Turbulent Flow in the Converging Zone of a Headbox. *In: Engineering/Process and Product Quality Conference and Trade Fair, 1999* Anaheim, CA, USA, 12-16 September, Vol.3, pp 1135-1154.
2. GULLICHSEN, J. AND PAULAPURO, H. Papermaking Science and Technology, Book 8, Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Fapet Oy, Helsinki, Finland, 2000.
3. HÄMÄLÄINEN J. Mathematical Modelling and Simulation of Fluid Flows in the Headbox of a Paper Machine. 1993. Ph.D. thesis, Faculty of Mathematics and Natural Sciences of the University of Jyväskylä, 1993.
4. HUA, L., HE, P., SALCUDEAN, M., GARTSHORE, I. AND

BIBEAU, E. Turbulent Flow in a Hydraulic Headbox. *In*: TAPPI Papermakers Conference and Trade Fair, 2000, Vancouver, BC, Canada, 16-19 April, Vol.2, pp 695-700.

5. LAUNDER, B.E. AND SPALDING, D.B The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v.3, p.269-289, 1974.

5. LEE, J.J.G AND PANTALEO, S.B. Headbox Flow Analysis. *In*: 84th Annual Meeting Technical Section, Montreal, 1998,

Canada, 27-30 January, Vol.2, pp B339-B344.

6. PARSHEN, M. Flow in Contractions with Application to Headboxes. 2003. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, FaxénLaboratoriet, Stockholm, Sweden. 2003.

7. RANADE, V.V. Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering. *Process System Engineering System*. San Diego, California, USA, 2002.