

## **INFLUÊNCIA DO MODELO DE TURBULÊNCIA NA MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE FLOCULADORES TUBULARES HELICOIDAIS OPERANDO EM CONDIÇÕES DE BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS**

*Bruno Peterle Vaneli<sup>1</sup>; Maurício Sartori<sup>2</sup>; Danieli Soares de Oliveira<sup>3</sup>; Edmilson Costa Teixeira<sup>4</sup>*

**Resumo** – A modelagem numérica computacional tem auxiliado no entendimento do escoamento no interior dos Floculadores Tubulares Helicoidais. Tais floculadores têm apresentado valores mais constantes de mistura (mensurado pelo gradiente de velocidade) ao longo de sua extensão devido à sua configuração helicoidal, a qual submete o escoamento a constantes mudanças de direção. No estudo de modelagem numérica do escoamento em condutos helicoidais uma dúvida que se apresenta diz respeito à forma mais adequada de se modelar a turbulência quando o escoamento acontece com Número de Reynolds (Re) menor do que o Re crítico, que é mais elevado do que o de um tubo reto. Assim, este artigo apresenta análise de valores de velocidades axial resultantes do emprego de 6 (seis) modelos de turbulência e também do modelo laminar, para uma configuração helicoidal operando com  $Re = 2000$  – considerado regime laminar. Verificou-se que todos os modelos de turbulência adotados, exceto o modelo  $\kappa - \varepsilon$ , produziram erros semelhantes ao modelo laminar quando comparados aos dados experimentais.

**Palavras-Chave** – Modelagem numérica do escoamento, modelos de turbulência, Floculadores Tubulares Helicoidais.

## **INFLUENCE OF THE TURBULENCE MODEL IN THE COMPUTATIONAL NUMERICAL MODELLING OF TUBULAR HELICAL FLOCCULATORS OPERATING UNDER CONDITIONS OF LOW REYNOLDS NUMBER**

**Abstract** – Computational numerical modelling have been helping the understanding of flow inside tubular helical flocculators. They have presented more constant values of mixing along its length (given by the velocity gradient) due to the helical configuration, which makes the flow undertake constant changes in direction. In the numerical modelling of flows in helical ducts a question which is still open refers to the most adequate way of modelling turbulence in case of flows with Reynolds Number (Re) smaller than its critical value, which is higher than critical value for straight pipes. Thus, this paper presents an analysis of axial velocities resulting from the application of 6 (six) turbulence models, and a laminar model, to a helical flocculator, operating with Re equal to 2000 – which corresponds to laminar regime. As a result it was found that all turbulence models employed, except the  $\kappa - \varepsilon$  model, produced similar errors to the laminar model when compared to the experimental data.

**Keywords** – Numerical modeling, turbulence models, Tubular Helical Flocculators.

<sup>1</sup> Pesquisador Associado. LabGest/DEA-CT/UFES; [brunopvaneli@hotmail.com](mailto:brunopvaneli@hotmail.com).

<sup>2</sup> Professor do IFES/Cachoeiro de Itapemirim; doutorando em Eng. Ambiental – UFES; [m.sartori.rs@gmail.com](mailto:m.sartori.rs@gmail.com).

<sup>3</sup> Professora do IFES / Cariacica; doutoranda em Eng. Ambiental – UFES; [danieli\\_soares@yahoo.com.br](mailto:danieli_soares@yahoo.com.br).

<sup>4</sup> Professor do Departamento de Eng. Ambiental / UFES. **Autor correspondente.** [edmilson Teixeira@hotmail.com](mailto:edmilson Teixeira@hotmail.com).

## 1. INTRODUÇÃO

O escoamento através de um tubo curvo tem sido intensivamente estudado, em parte devido à sua importância prática na área de engenharia, mas também, devido ao interesse físico em escoamentos secundários causados pela força centrífuga provocada pela curvatura do tubo (Yamamoto *et al.*, 1995).

As tubulações helicoidalmente enroladas também possuem muitas aplicações práticas, tais como, trocadores de calor, concentradores espirais, geradores de vapor helicoidais e refrigeradores, e podem também ser encontradas na natureza em vasos de sangue e em dutos de água nos vegetais (Yu *et al.*, 2003). Além destas aplicações, alguns autores (Grohmann *et al.*, 1981; Al-Hashimi e Ashjyan, 1989; Carissimi, 2003; Silva, 2007; Oliveira, 2008), entre outros, têm testado este tipo de configuração helicoidal como floculadores hidráulicos aplicados ao tratamento de água. Este tipo de floculador, denominado de Floculador Tubular Helicoidal (FTH), vem se mostrando promissor devido a sua alta eficiência (Silva, 2007; Oliveira, 2008).

A sua configuração helicoidal torna o escoamento muito diferente do que ocorre num tubo reto, pois promove a formação de escoamento secundário perpendicular ao escoamento principal, que é característico de condutos curvados (Berger *et al.*, 1983). Ele é uma consequência da curvatura do tubo, e é composto por um par de vórtices que giram em sentidos opostos (Germano, 1989). Deste modo, entender o comportamento hidrodinâmico do fluido no interior deste tipo de unidade helicoidal é de extrema importância para otimização do processo. Uma ferramenta que auxilia este entendimento é a modelagem numérica computacional por permitir a simulação de diversas configurações sem a necessidade de implementação dos respectivos modelos físicos, geralmente dispendiosos (Sartori, 2006).

Uma dúvida em relação à modelagem numérica computacional dos reatores helicoidais é quanto à utilização ou não de modelo de turbulência quando simulando casos onde o Número de Reynolds ( $Re$ ) é menor do que o  $Re$  crítico, que caracteriza o final do regime laminar. Esta dúvida persiste, uma vez que, como apresentado por Vashisth *et al.* (2008), diversos autores têm proposto modelos para previsão do  $Re$  crítico para tubos helicoidalmente enrolados. Em todos os modelos, observa-se que a turbulência é atrasada, sendo percebido experimentalmente o fim do regime laminar com valores de  $Re$  superiores aos observados em tubos retos.

Neste contexto, pretende-se avaliar qual o efeito de se utilizar ou não modelos de turbulência na modelagem numérica do escoamento em tubos helicoidais operando com número de Reynolds abaixo do seu valor crítico, que é consideravelmente superior ao verificado em tubos retos (Cioncolini e Santini, 2006) e ainda comparar os resultados produzidos pelos modelos com os dados experimentais obtidos por Yu *et al.* (2003).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Dados experimentais

Utilizou-se neste estudo os dados de Yu *et al.* (2003) que mediram experimentalmente valores de velocidade axial do escoamento em tubos helicoidais. As medições foram sempre realizadas terceira volta de cada configuração de reator, ao longo de dois diâmetros perpendiculares da seção de escoamento, um horizontal e outro vertical. O fluido empregado no experimento foi uma mistura de etanol e álcool benzílico ( $930-980 \text{ kg/m}^3$ ). Além disto, a maior incerteza das componentes de velocidade axial medidas foi da ordem de 6%.

Para a modelagem numérica, reproduziu-se somente um dos casos de Yu *et al.* (2003). A configuração helicoidal estudada tem raio ( $a$ ) de 4,7 mm, raio de enrolamento ( $R_c$ ) de 63,7 mm, distância entre voltas ( $H$ ) de 31,8 mm e a hélice possui 4 voltas. Esta configuração foi estudada para

$Re = 2000$ , obtido por meio da equação 1. Onde,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $a$  é o raio do tubo,  $v$  a velocidade média e  $\mu$  a viscosidade dinâmica.

$$Re = \frac{2a\rho v}{\mu} \quad (1)$$

A figura 1 representa um esquema da geometria estudada.

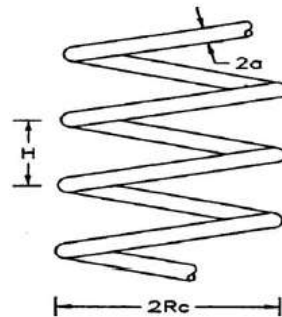


Figura 1: Esquema representativo da geometria estudada  
Fonte: adaptado de Yu *et al.* (2003)

## 2.2. Ferramenta computacional utilizada

Neste trabalho, foi utilizado o *software* comercial CFX versão 13.0 para a avaliação do escoamento no interior de floculadores tubulares helicoidais, empregando uma malha, que pode ser vista na figura 2 (a), com refinamento próximo a parede, resultando em 661.383 elementos que correspondem a 624.150 nós. Adotou-se vazão mássica de  $0,01767 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  na entrada e na saída do reator e condição de não deslizamento nas paredes. Além disto, na simulação numérica, adotou-se fluido incompressível, escoamento permanente e isotérmico. Foram utilizados como critério de convergência e esquema de interpolação, respectivamente, erro máximo de  $10^{-4}$  e *high resolution*.

Os resultados foram avaliados em um plano na terceira volta do reator, perpendicular ao seu eixo principal. Além disto, foram criadas neste plano, linhas horizontais e verticais coincidentes com o centro do plano, com a finalidade de amostrar valores de velocidades axial calculados pelo modelo, para posterior comparação com os dados experimentais. A figura 2 (b) apresenta a geometria do reator, o plano na terceira volta, e as linhas de amostragem de velocidade axial criados no *software* comercial CFX.

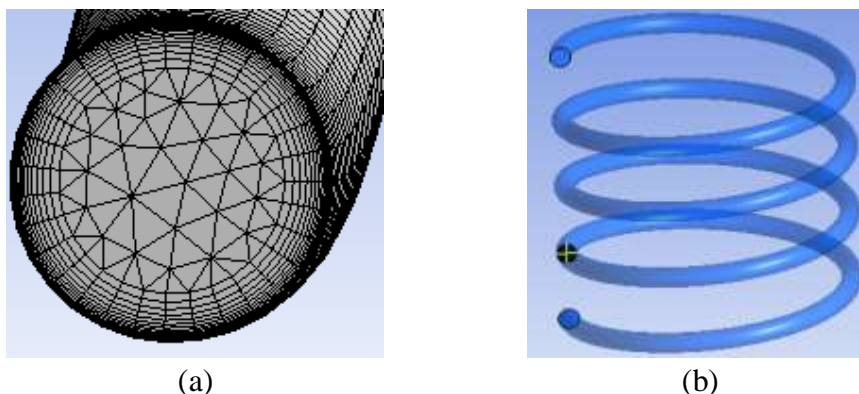


Figura 2- (a) Malha criada para as simulações; (b) Plano e suas linhas de amostragem

### 2.3. Modelos de turbulência

Neste trabalho foram utilizados os modelos de turbulência  $\kappa - \varepsilon$ ,  $\kappa - \omega$ , BSL, SST, BSI Reynolds Stress e  $\omega$ - Reynolds Stress.

Os quatro primeiro modelos citados são modelos baseados no conceito de viscosidade turbulenta e na hipótese de Boussinesq. Esta hipótese assume que as Tensões de Reynolds estão relacionadas com os gradientes médios de velocidade do escoamento e com a viscosidade turbulenta, de forma análoga as tensões definidas pela Lei da Viscosidade de Newton. Eles basicamente calculam alguns parâmetros como  $\kappa$  (energia cinética turbulenta) e  $\varepsilon$  (taxa de dissipação de energia cinética turbulenta), por exemplo, através de equações diferenciais, a fim de descobrir o valor da viscosidade turbulenta e conseqüentemente as Tensões de Reynolds. Já os dois últimos modelos citados, são modelos de Tensão de Reynolds que utilizam uma equação diferencial específica para calcular o Tensor de Reynolds. Como o tensor é simétrico, estes modelos calculam apenas seis das nove componentes que possui.

Inicialmente foi simulado o escoamento sem o emprego de modelos de turbulência e, em seguida, empregaram-se todos os modelos descritos acima. Os valores de velocidade axial produzidos em cada simulação foram comparados com os valores medidos por Yu *et al.* (2003). A comparação foi feita por meio do cálculo do erro médio (E.M) e do erro máximo (E.máx), para as linhas de amostragem horizontal e vertical, possibilitando avaliar qual modelo melhor se ajustava aos dados experimentais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os erros produzidos pelos modelos em relação aos dados experimentais de velocidade axial, para a simulação com valor de  $Re = 2000$ , estão descritos na tabela 1.

Tabela 1– Erros máximo (E.máx) e médio (E.M) entre valores de velocidade axial medidos e calculados, considerando diferentes modelos de turbulência

Modelos	Linha Horizontal		Linha Vertical	
	E.M (%)	E.máx (%)	E.M (%)	E.máx (%)
Laminar	5,72	57,64	7,7	71,27
$\kappa - \varepsilon$	11,7	215,39	32,22	334,63
$\kappa - \omega$	5,6	43,98	7,2	61,20
SST	5,4	45,06	7,3	62,14
BSL	5,7	43,98	7,5	61,35
BSI Reynolds Stress	5,2	44,99	6,8	61,68
$\omega$ -Reynolds Stress	5,2	44,90	6,9	61,62

Nesta tabela, observa-se que, tanto na linha de amostragem horizontal quanto na vertical, os erros produzidos com a utilização dos modelos de turbulência foram ligeiramente menores ao caso sem o emprego destes, com exceção do modelo  $\kappa - \varepsilon$  que desviou consideravelmente dos dados experimentais. Observa-se na figura 3 (a) e (b), o perfil de velocidade axial resultantes da simulação com o modelo  $\kappa - \varepsilon$ , nas linhas horizontal e vertical, respectivamente, comparado com os dados experimentais. Na ordenada apresentam-se os valores de velocidade axial normalizados pela velocidade média do escoamento e na abscissa a posição normalizada pelo raio do tubo.

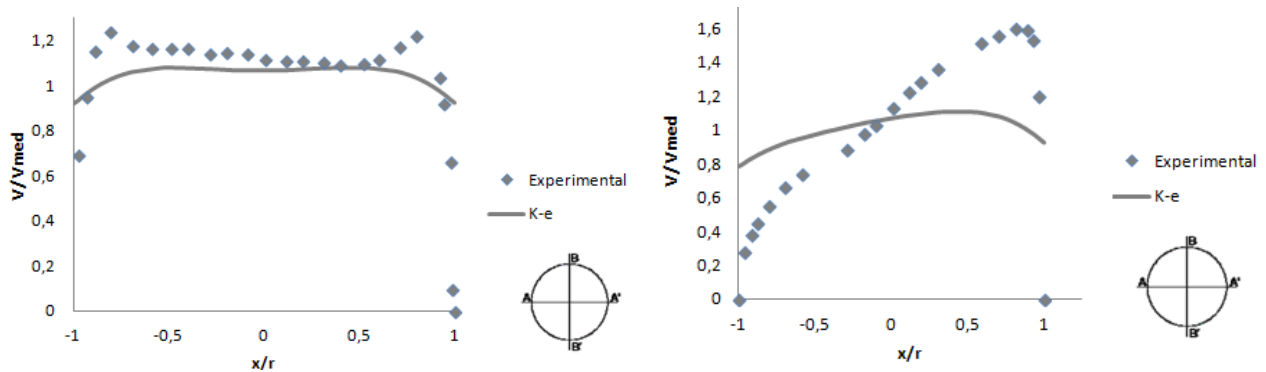


Figura 3- Perfil de velocidade: (a) Horizontal- AA'; (b) Vertical-BB'

Este resultado referente ao modelo  $\kappa - \varepsilon$  corrobora com Castiglia *et al.* (2010) que estudaram o escoamento e a transferência de calor em um tubo helicoidal e concluíram que o modelo  $\kappa - \varepsilon$  não é o mais indicado para modelá-lo, pois subestima o valor do fator de atrito do mesmo e não produz uma boa estimativa dos perfis de velocidades e de temperatura se comparado a modelos que utilizam a equação  $\omega$ , como o  $\omega$ -Reynolds Stress e SST, ou a modelos de simulação numérica direta (DNS).

Para a discussão dos resultados obtidos com a utilização dos modelos de turbulência optou-se pelo uso do modelo  $\kappa - \omega$  visto que este produziu desvios análogos aos demais modelos (exceto  $\kappa - \varepsilon$ ) e apresenta um custo computacional menor por ser um modelo mais simples.

As figuras 4 e 5 mostram os perfis de velocidade axial resultantes da simulação de ambos modelos: laminar e  $\kappa - \omega$ , comparados com os dados experimentais, na linha de amostragem horizontal e vertical, respectivamente.

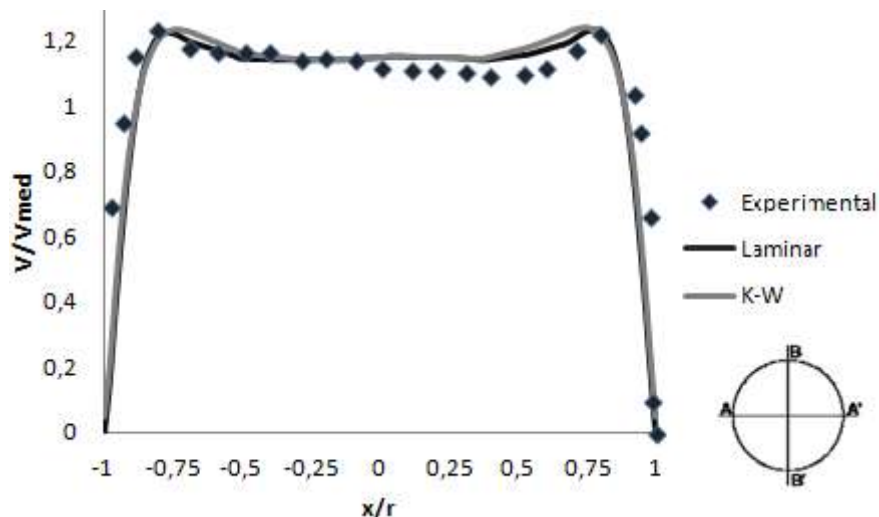


Figura 4: Perfil horizontal (AA') de velocidade axial normalizada



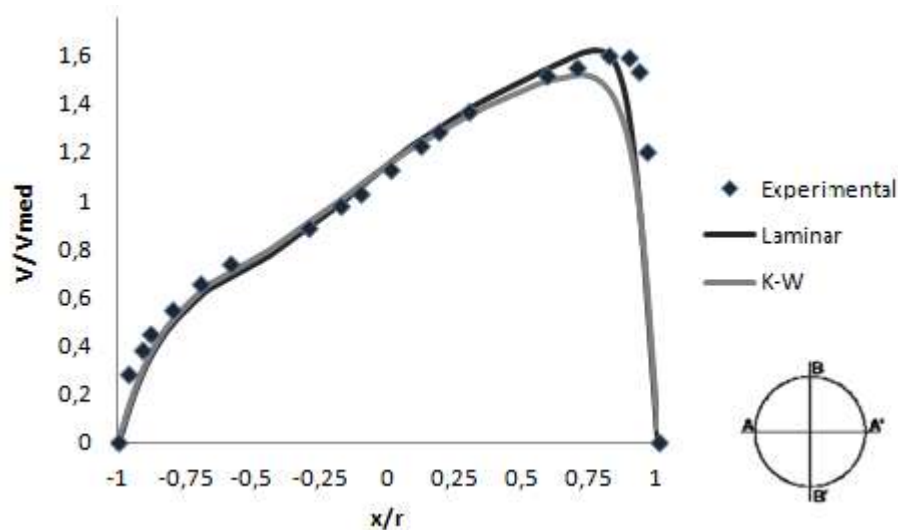


Figura 5: Perfil vertical (BB') de velocidade axial normalizada

Considerando que a incerteza da medida é da ordem de 6%, ambos modelos produziram erros semelhantes. Contudo, observa-se uma ligeira melhora na representação dos dados experimentais, por parte do modelo  $\kappa - \omega$  na linha de amostragem vertical e na redução dos erros máximos.

Para a avaliação deste resultado foram investigadas as regiões do escoamento nos perfis AA' e BB', onde o modelo de turbulência gerou menores erros que o laminar. Com base nesta investigação, foram definidas três zonas: duas próximas as paredes ( $-1 \leq x/r \leq -0,79$  e  $0,79 \leq x/r \leq 1$ ) e uma central ( $-0,78 \leq x/r \leq 0,78$ ).

Como pode ser observado na figura 4, o perfil de velocidade gerado pelo modelo  $\kappa - \omega$  tende a se aproximar mais do perfil experimental do que o perfil gerado pelo modelo laminar, principalmente próximo às paredes do tubo. Este fato pode ser observado na tabela 2, que relaciona os erros que ambos os modelos produziram em relação aos dados experimentais para três intervalos de posição no perfil horizontal AA'.

Tabela 2– Erro médio referente à aplicação dos modelos em cada zona do perfil AA'

Zona	E.M (%) $\kappa - \omega$	E.M (%) Laminar
$-1 \leq x/r \leq -0,79$	16,5	19,4
$-0,78 \leq x/r \leq 0,78$	2,98	2,3
$0,79 \leq x/r \leq 1$	13,8	17,1

Nota-se da tabela 2 que o modelo  $\kappa - \omega$  produz menores erros que o modelo laminar próximo a parede do tubo. Como instruído em CFX (2010), uma das vantagens da formulação  $\kappa - \omega$  é justamente o tratamento próximo à parede para simulações com baixos números de Reynolds e gradientes de pressão adversos.

Já na região central do escoamento onde os efeitos de parede são menores, ambos os modelos se aproximam bastante dos dados experimentais, produzindo erros similares. A diferença de ordem de grandeza entre os erros produzidos pelos modelos próximos à parede e na região central do escoamento se deve principalmente à diferença de magnitude dos valores de velocidade, que na parede tendem a zero e no centro possuem valores mais altos.

Assim como no perfil AA', o perfil BB' do modelo  $\kappa - \omega$  se aproxima mais do experimental que o modelo laminar, principalmente próximo a parede do tubo. Isto pode ser observado na tabela 3, que associa os erros que ambos os modelos produziram em relação aos dados experimentais para três intervalos de posição no perfil vertical BB'.

Tabela 3 – Erro médio referente à aplicação dos modelos em cada zona do perfil BB'

Zona	E.M (%) $\kappa - \omega$	E.M (%) Laminar
$-1 \leq x/r \leq -0,79$	27,3	32,3
$-0,78 \leq x/r \leq 0,78$	2,4	2,8
$0,79 \leq x/r \leq 1$	21,3	22

Analisando a tabela 3 verifica-se que no perfil vertical, o modelo  $\kappa - \omega$  também produz erros menores que o modelo laminar próximo da parede. Já na região central do escoamento, ambos os modelos produziram erros similares.

Desta forma, apesar dos modelos laminar e  $\kappa - \omega$  produzirem globalmente erros semelhantes tanto no perfil horizontal quanto vertical, nota-se que o modelo de turbulência resolve melhor o escoamento que ocorre próximo à parede do tubo, minimizando a magnitude dos erros gerados nestas regiões.

#### 4. CONCLUSÕES

Com este trabalho, pôde-se avaliar a influência de vários modelos de turbulência na modelagem do escoamento que ocorre em tubos helicoidais, operando a baixo número de Reynolds. Verificou-se que, mesmo o escoamento sendo considerado laminar, tanto o modelo laminar quanto os modelos de turbulência (com exceção do  $\kappa - \varepsilon$ ) produziram resultados semelhantes. Além disto, dentre os modelos de turbulência utilizados, aquele que se mostrou mais vantajoso foi o modelo  $\kappa - \omega$ , por representar bem os dados experimentais, ser um modelo simples e apresentar menor custo computacional.

#### REFERÊNCIAS

- AL-HASHIMI, M. A. I.; ASHJYAN, A. S. K. Effectiveness of helical pipes in the flocculation process of water. *Filtration and separation*, v. 26. n. 6. p. 422-429, 1989.
- BERGER, S. A.; TALBOT, L. Flow in curved pipes. *Annual review of fluid mechanics*, v. 15. p. 461-512, 1983.
- CARISSIMI, E. *Reator gerador de flocos - RGF: concepção e desenvolvimento básico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- CASTIGLIA, F.; CHIOVARO, P.; CIOFALO, M.; DI LIBERTO, M.; DI MAIO, P.A.; DI PIAZZA, I.; GIARDINA, M.; MASCARI, F.; MORANA, G.; VELLA, G. *Modelling flow and heat transfer in helically coiled pipes. Part 3: Assessment of turbulence models, parametrical study and proposed correlations for fully turbulent flow in the case of zero pitch*. Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, 2010.
- CFX (2010), Manual do CFX-13.0, ANSYS Technology.
- CIONCOLINI, A.; SANTINI, L. *An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes*. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2006, 30 (4), 367;

- GERMANO, M. The Dean equations extended to a helical pipe flow. *Journal of fluid mechanics*, v. 203. jun. p. 289-305, 1989.
- GROHMANN, A.; REITER, M.; WIESMANN, U. New flocculation units with high efficiency. *Water science tecnologia*, v. 13. n. 11/12. p. 567-573, 1981.
- OLIVEIRA, D. S. *Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de flocculadores tubulares helicoidais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008;
- SARTORI, M. *Caracterização hidrodinâmica de flocculadores tubulares helicoidais por meio de simulação numérica tridimensional*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006;
- SILVA, R. C. *Avaliação da influência da geometria e Dinâmica do escoamento de Flocculadores Tubulares Helicoidais na Redução de Turbidez, utilizando Modelagem Física*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, universidade Federal do Espírito santo, Vitória, 2007;
- VASHISTH, S.; KUMAR, V.; NIGAM, K.; A Review on the Potential Applications of Curved Geometries in Process Industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*; v.47; p.
- YU, B.; ZHENG, B.; LIN, C. X.; PEÑA, O. J.; EBADIAN, M. A. Laser doppler anemometry measurements of laminar flow in helical pipes. *Experimental thermal and fluid science*, V. 27. n.8. p. 855-865, 2003.
- YAMAMOTO, K., AKITA, T., IKEUCHI, H., KITA, Y., 1995. Experimental study of the flow in a helical circular tube. *Fluid Dynamics Res.* 16, 237–249.