

## **I-197 - AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO HIDRÁULICO TURBULENTO EM FLOCULADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO MODELAGEM MATEMÁTICA**

**Mariângela Dutra de Oliveira<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (IFES) – Campus Vitória

**Rodrigo de Araujo Costa<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).

**Bruno Furieri<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Doutor pelo Département Énergétique Industrielle da Ecole des Mines de Douai (França). Diploma de doutorado revalidado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES): título obtido de Doutor em Engenharia Ambiental. Professor do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

**Enilene Regina Lovatte<sup>(4)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Professora do curso Técnico em Segurança do Trabalho do Instituto Federal de Educação do Espírito Santo (IFES) - Campus Vitória.

**Maurício Sartori<sup>(5)</sup>**

Engenheiro de Minas pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre e Doutor em Engenharia Ambiental pelo Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Professor do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) – Campus Vitória.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Vitória, 1729 – Jucutuquara – Vitória – ES – CEP: 29040-780 – Brasil – Tel: +55 (27) 99969-2509 – e-mail: mariangeladutra@ifes.edu.br

### **RESUMO**

A relação entre os parâmetros de qualidade da água e parâmetros de projeto é fundamental para garantia da eficiência do processo de tratamento. Normas técnicas e valores usuais da literatura e de operação são normalmente utilizados por projetistas para definição de parâmetros operacionais. A simulação numérica computacional, ainda pouco utilizada, pode ser uma excelente ferramenta auxiliar na elaboração de projetos mais eficientes, econômicos e otimizados. O presente trabalho utilizou o código computacional Fluent da Ansys, na investigação do desempenho de floculadores hidráulicos de fluxo vertical. Foram definidos domínio e malhas computacionais e modelo de turbulência para prescrever alguns parâmetros operacionais. O pós processamento permitiu analisar como a geometria das passagens e das câmaras influenciam no escoamento dentro do floculador e consequente eficiência por meio da análise da velocidade, tensão de cisalhamento, pressão, intensidade de turbulência, linhas de corrente e vetores velocidade. As passagens centralizadas e mais alongadas diminuíram a magnitude da velocidade e permitiram uma energia cinética turbulenta melhor distribuída ao longo do floculador. As passagens intercaladas proporcionaram um fluxo mais espiralado, percorrendo da direita à esquerda, oportunizando maior chance de choques entre as partículas. De modo geral, o melhor comportamento teve menores magnitudes de velocidade, melhor distribuição de TKE e menor cisalhamento nas paredes e efeito de jato. A simulação numérica computacional associada a normas técnicas pode ser bastante útil ao projetista, permitindo a tomada de decisões mais rápida e levando a projetos de floculadores mais eficientes em estações de tratamento

**PALAVRAS-CHAVE:** CFD, Floculador Hidráulico, Otimização, Escoamento Turbulento.

## INTRODUÇÃO

Dentre os principais desafios de projeto e operação da indústria de água está o atendimento aos requisitos de qualidade, garantindo, assim, a eficiência do processo de tratamento, envolvendo nestes estudos os custos de investimento, operação e manutenção. Isto implica o uso de ferramentas de modelagem preditiva e simulação numérica e experimental que são capazes de explicar a interação múltipla entre todos os parâmetros de qualidade do fluido e de projeto do processo. Porém, mesmo sabendo a importância que o conhecimento dos fenômenos físicos tem sobre a eficiência de reatores hidráulicos, ainda é recente a aplicação de ferramentas numéricas de dinâmica dos fluidos computacional na hidráulica.

As simulações numéricas para a modelagem matemática das equações de transporte que regem os escoamentos são efetuadas em softwares de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*), devendo passar por processo de validação por meio de ensaios experimentais. Neste âmbito, a CFD pode ser útil para novas concepções, ou propor melhorias, de plantas de tratamento de água e a eficiência do processo, permitindo conceber processos de tratamento de água mais fiáveis e rentáveis. Além disso, permite a obtenção de detalhadas distribuições dos mais variados parâmetros: velocidade (magnitude, direção, sentido e gradiente), pressão, concentração de produtos químicos e tensão cisalhante (BRIDGEMAN; JEFFERSON; PARSONS, 2010).

A necessidade de aumentar a capacidade da estação de tratamento da água e de distribuição da água tratada ocorre em resposta ao rápido crescimento de muitos centros urbanos, exigindo a construção não só de novas instalações ou expansão de instalações já existentes, mas também e principalmente que haja a otimização de suas unidades, seja por meio do aumento da eficiência ou pela redução de produtos químicos utilizados no processo, por exemplo (DI BERNARDO et al., 2017).

Os projetos de Estações de Tratamento de Água (ETA) para Abastecimento não contemplam, via de regra, resultados detalhados da dinâmica de escoamento turbulento no interior dos reatores hidráulicos. O dimensionamento dessas unidades é realizado com base em parâmetros hidráulicos presentes em normas técnicas, como a NBR 12.216/1992, que foram concebidos a partir de características médias e usuais desses parâmetros. Na prática da operação de ETA, possíveis reduções de eficiência no tratamento, com impactos econômicos e ambientais, podem ser mais facilmente diagnosticadas com um conhecimento detalhado das características do escoamento hidráulico nesses reatores (HELLER; PÁDUA, 2010a; HELLER; PÁDUA, 2010b).

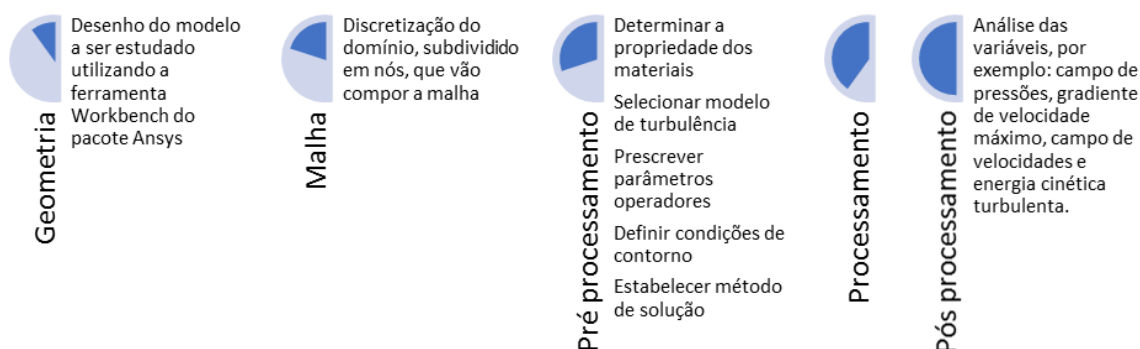
## OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi realizar modelagem matemática e computacional de um floculador hidráulico chicanado de fluxo vertical e investigou-se a possível otimização de desempenho com base nas informações detalhadas do escoamento obtidas pela modelagem.

## METODOLOGIA

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) utiliza a aplicação de modelos de predição das propriedades do escoamento em ambiente computacional, buscando obter soluções numéricas por meio da discretização do meio contínuo e aproximação das variáveis de interesse em pontos do domínio (WOLS, 2011).

Um dos softwares de CFD mais comumente utilizado é o Ansys Fluent. As principais etapas utilizadas nas simulações numéricas de escoamentos turbulentos são destacadas na Figura 1.



**Figura 1: Fluxograma das etapas principais de uma simulação numérica computacional**

Seu funcionamento consiste inicialmente em desenhar a geometria da estrutura em que se deseja fazer o estudo, onde posteriormente será criada uma malha computacional que definirá o tamanho e a forma dos volumes que as equações governantes serão computadas no sistema onde ocorre o escoamento. A solução numérica é obtida mediante discretização do domínio, no qual o meio contínuo é subdividido em pontos, chamados de nós, que vão compor essa malha. As equações governantes (conservação de massa ou continuidade e conservação de quantidade de movimento) também são discretizadas e aplicadas sobre essa malha de nós, obtendo-se os valores para cada variável das equações em cada nível temporal. Quanto mais refinada a malha, mais precisa será a solução e maior será o esforço computacional. Depois, é preciso determinar a propriedade dos materiais em estudo, selecionar um modelo de turbulência apropriado e prescrever parâmetros operadores para a análise, definir as condições de contorno do escoamento, e estabelecer um método de solução. Após essas etapas, as ferramentas de pós processamento irão permitir a visualização do domínio e a malha computacional, construir contornos das variáveis escalares, vetores de velocidade, entre outros.

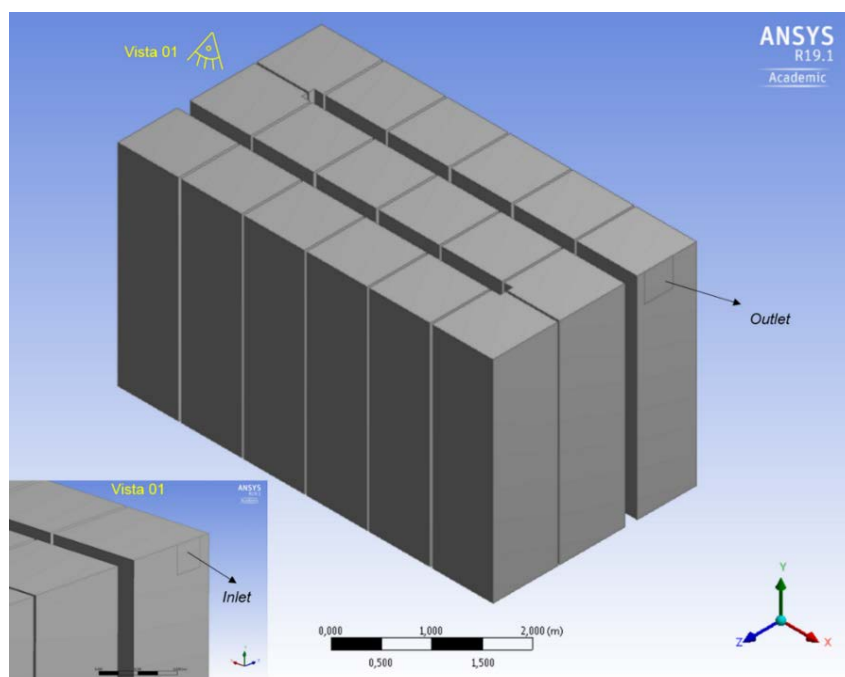
Toda análise de CFD é validada comparando os resultados obtidos com dados alcançados experimentalmente. O procedimento de validação consiste na comparação dos resultados numéricos de uma simulação específica construída equivalente, em termos de geometria e condições de contorno, a um modelo físico do qual os resultados da simulação numérica serão comparados. O estudo utilizado para validação foi o de Lovatte et al. (2015), onde a geometria é um canal retangular de dimensões  $2\pi\delta$ ,  $\pi\delta$  e  $\delta$  nas direções longitudinal, transversal e normal ao escoamento, respectivamente, onde  $\delta$  foi adotado como 1,0 metro.

Foram geradas três malhas para o desenho do canal mencionado, sendo uma mais refinada, uma mediana e uma grosseira. Isto foi feito para perceber a influência do refinamento da malha nos resultados das simulações, chamado de “teste de malha”. Com os resultados, foi possível perceber que a melhor malha seria a mediana, pois apresentou bom resultado e demandando menor esforço computacional.

Foram testados 4 modelos de turbulência para determinar qual seria o mais apropriado. São eles: *k-ε realizable*, *k-ω SST*, *k-ε RNG* e *k-ε standard*. Todos estão dentro da metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Com os resultados de cada modelo, o escolhido foi o *k-ε realizable*, apresentando resultados satisfatórios e demandando menor esforço computacional.

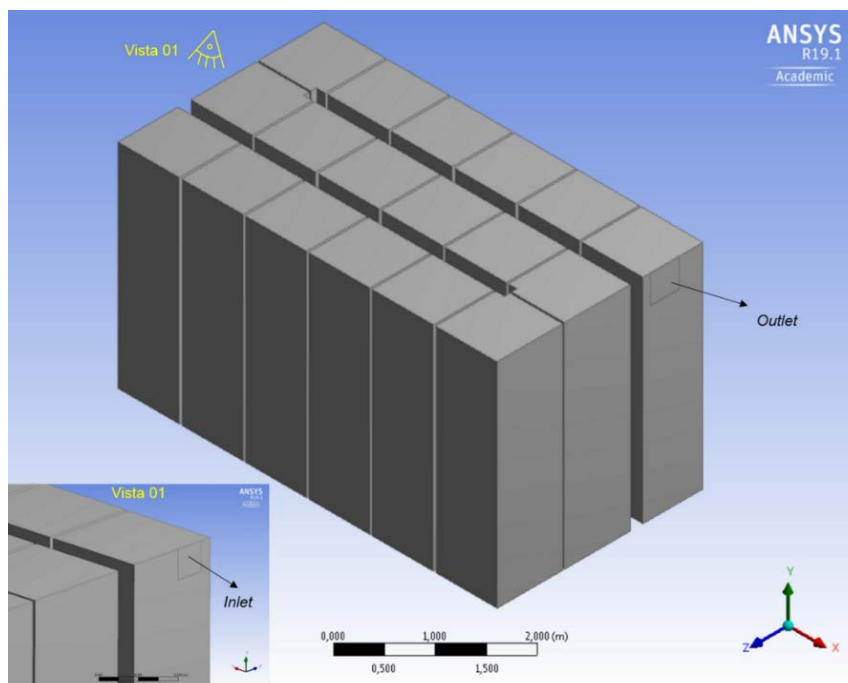
Com o modelo validado, foram feitas simulações para flocladores hidráulicos de chicanas de fluxo vertical, amplamente utilizados no Brasil, onde contavam com uma porta de entrada para receber o fluido (água) e uma porta de saída (DI BERNARDO et al., 2017). Os desenhos foram criados no *DesignModeler* por meio da ferramenta *Workbench*, do Ansys. Cabe ressaltar que foi estudado, a partir de revisão na literatura, os efeitos dos parâmetros hidráulicos sobre o floclador e estes foram tomados em consideração na hora do desenho da geometria.

A Figura 2 representa a geometria base do presente trabalho. Este floclador de chicanas de fluxo vertical foi baseado no projeto de uma estação já em operação. A Figura 2 mostra o desenho da geometria para uma das simulações, com 5,25 metros na direção longitudinal ao fluxo (eixo-x), 3,00 metros na direção transversal (eixo-y), e 2,85 metros na direção normal (eixo-z). O *inlet* representa a entrada do fluido no floclador, com dimensões de 0,25x0,25m neste caso. Já o *outlet* é onde ocorre a saída do fluido, com dimensões de 0,40x0,40m.



**Figura 2: Geometria base para o flocculador de fluxo vertical**

A Figura 3 mostra o interior do flocculador, sendo possível observar as passagens entre as câmaras do flocculador. Além deste caso, chamado de caso A, outros três casos foram simulados (B, C e D), variando as dimensões do flocculador, das passagens e a vazão de entrada.



**Figura 3: Detalhamento das passagens no caso A**

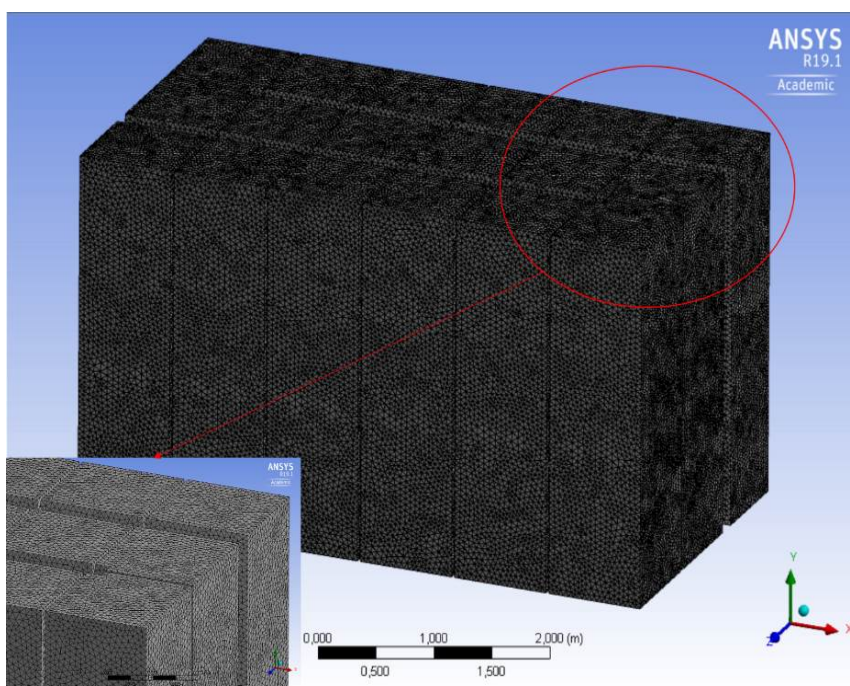
O caso B fez uma mudança sutil em relação ao caso A, invertendo as dimensões das duas primeiras passagens (P01 e P02), ficando mais baixas e alongadas, de tamanho 0,25x0,20m. As demais dimensões foram mantidas.

As passagens superiores localizadas nas bordas foram mais afastadas, ficando a uma distância de 10cm das paredes.

Para o caso C, as dimensões do floculador e das câmaras se mantiveram, sendo alteradas somente as dimensões das passagens. Todas as passagens ficaram centralizadas às chicanas e com formato retangular.

No caso D foram alteradas as dimensões das câmaras, chicanas e passagens. O volume total do floculador não foi alterado. Todas as chicanas continuaram com 3,0 m de altura e 0,03 m de espessura, porém passaram a ter 0,60 m de largura (inclusive as da curva). Já as câmaras passaram a ter comprimento de 1,0m, apresentando forma retangular, e não mais quadrada. O floculador do caso D ficou com 6,15m de comprimento (eixo-x), 3,0m de altura (eixo-y) e 2,16m de largura (eixo-z). Todas as passagens são centralizadas e apresentaram o mesmo comprimento de 0,40m, sendo variada apenas a altura.

A malha computacional foi criada no *Meshing*, que faz parte do pacote de *softwares* da Ansys. Para o caso A, B e C foi definido o tamanho de elemento 0,045m, enquanto para o caso D o valor foi de 0,040m, para que todos apresentassem o mesmo número de elementos, no caso, 3 milhões. A Figura 4 representa a malha computacional gerada para o caso A.



**Figura 4: Malha computacional do caso A**

A simulação computacional foi realizada no *software* Ansys Fluent versão 19.0 e a Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados. Foram utilizados dois computadores para o processamento, cada um com 16GB de memória RAM e processador Intel Core i7 de 4 processadores.



**Tabela 1: Resumo da modelagem matemática adotada**

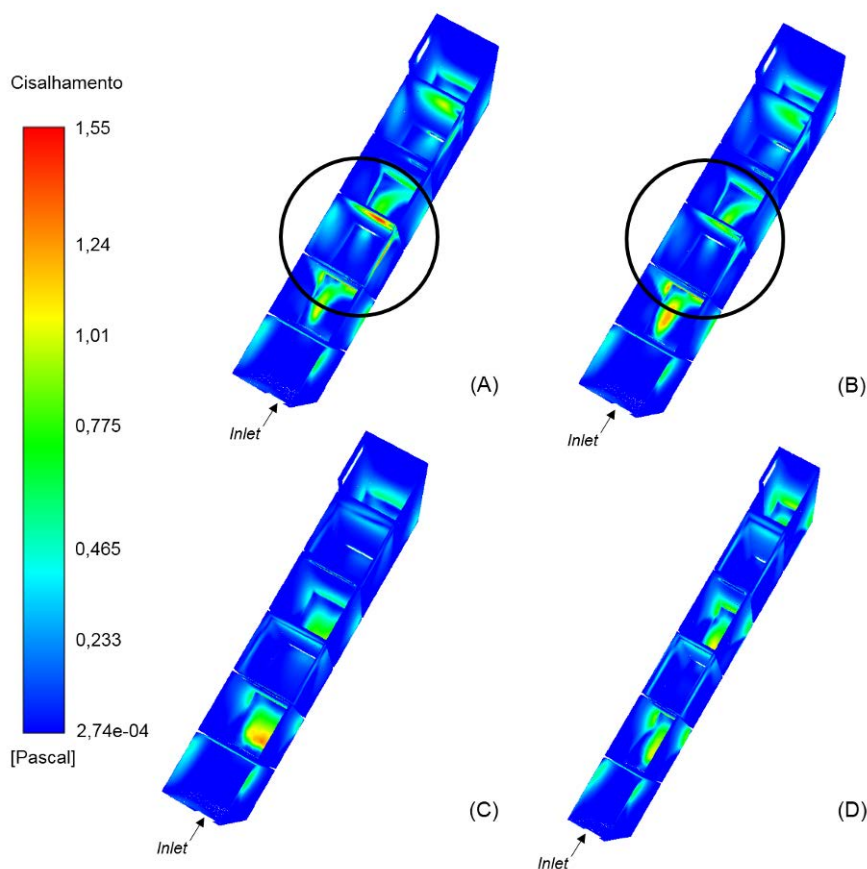
<b>Modelo de Turbulência</b>	<i>k-ε realizable</i>	
<b>Tratamento perto das paredes</b>	<i>Enhanced wall treatment</i>	
<b>Fluido do escoamento</b>	Água	
<b>Condições de contorno</b>	Entrada	Tipo: <i>velocity-inlet</i>
		Método de especificação da turbulência: <i>intensity and hydraulic diameter</i> , sendo a intensidade de turbulência de 5% e o diâmetro hidráulico de 0,25 m.
	Saída	Tipo: <i>pressure-outlet</i>
	Superfície livre	Tipo: <i>wall</i>
		<i>Shear condition: specified shear</i> , sendo 0 Pa em todos os componentes.
	Chicanas	Tipo: <i>wall</i>
		<i>Shear condition: no slip</i>
<b>Métodos de solução</b>	Acoplamento de pressão-velocidade: <i>coupled</i>	
	Discretização espacial	Gradiente: <i>Green-Gauss Cell Based</i>
		Pressão: <i>second order</i>
		<i>Momentum: second order upwind</i>
		Energia cinética turbulenta: <i>second order upwind</i>
		Taxa de dissipação turbulenta: <i>second order upwind</i>
	<i>Pseudo transient</i>	
<b>Residual monitors</b>	Critério de convergência absoluto: 0,000001	

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quanto à da geometria, primeiramente foi analisado o cisalhamento, importante para a verificar a ocorrência de quebra dos flocos formados. A Figura 5 mostra o cisalhamento na primeira fileira para os quatro casos, por ser a região onde há maior influência deste parâmetro. O presente trabalho não determinou valores de tensões de cisalhamento que promovem a quebra dos flocos, porém há grandes chances de que um cisalhamento mais alto nas paredes, além do efeito de jato nas passagens entre as câmaras, ocasionarem a quebra dos flocos.

Os casos A e B apresentaram mais regiões com maiores valores para o cisalhamento, principalmente nas paredes e nas regiões onde ocorrem os efeitos de jato. Os dois círculos pretos, dos casos A e B, destacam o cisalhamento nas primeiras passagens. O cisalhamento no caso B diminuiu consideravelmente nas paredes e houve diminuição do efeito de jato, porém acarretou um leve incremento no cisalhamento nas primeiras passagens, perceptível pelo aumento da coloração amarela perto da passagem. Embora o caso C também tenha apresentado um pico semelhante aos casos A e B, há menor cisalhamento nessa geometria, com as passagens alongadas e centralizadas, diminuindo inclusive o efeito de jato, tendo o cisalhamento maior influência no chão após as passagens. Já o caso D demonstrou o menor cisalhamento dentre os casos, por conter passagens centralizadas e mais alongadas quando comparadas às dos casos A e B, além de maior comprimento das câmaras, o que permite diminuir a influência do efeito de jato.

Por ser bastante similar ao caso A com relação aos parâmetros analisados, a única análise passível de discussão envolvendo o caso B foi quanto ao cisalhamento. O afastamento das passagens com distância mínima de 10 cm das paredes no caso B minimizou o processo de cisalhamento observado no caso A, quando essa distância nas passagens superiores era menor que 5cm, acarretando em um menor cisalhamento nas paredes

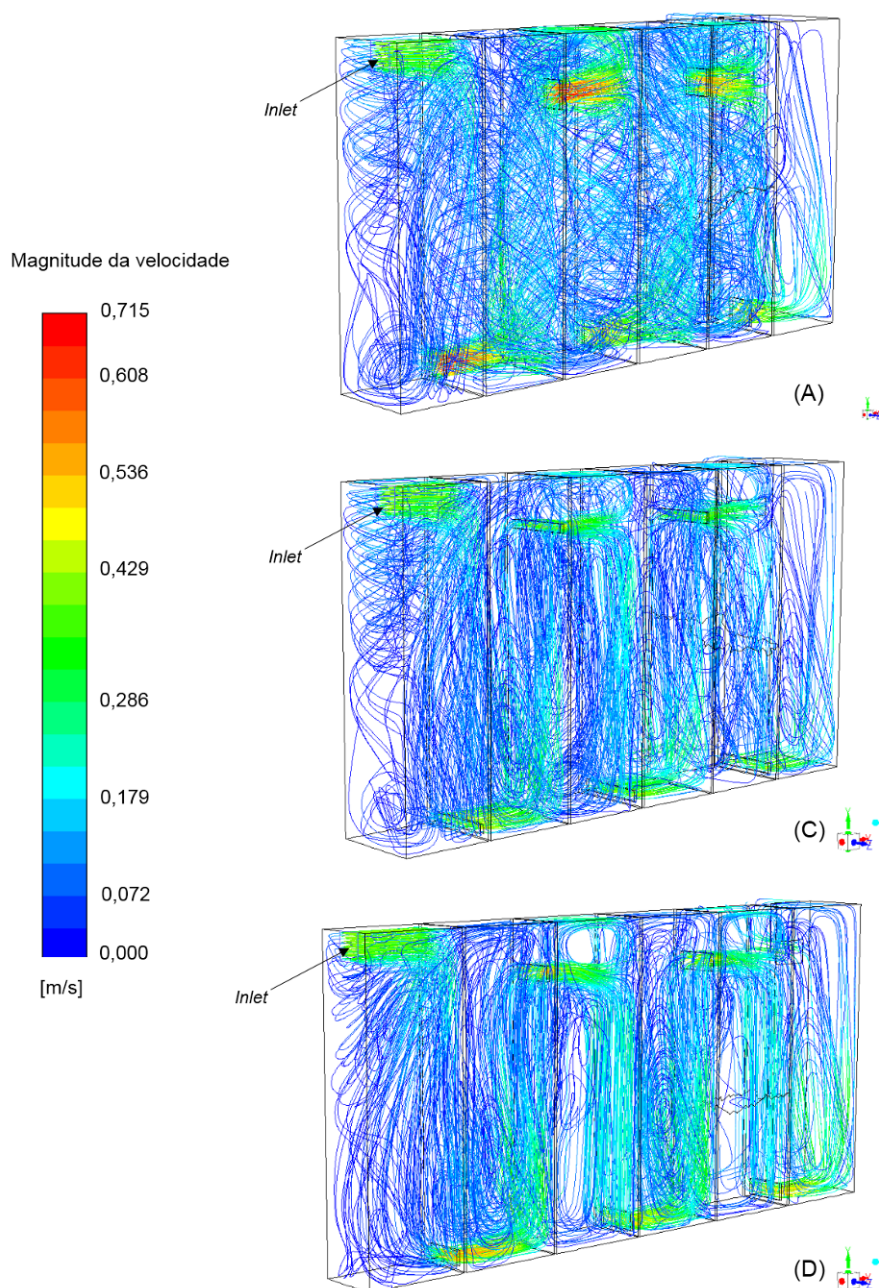


**Figura 5: Comparação do cisalhamento na primeira fileira para os quatro casos**

Deste ponto do trabalho em diante, apenas os casos A, C e D serão comparados para os outros parâmetros.

A Figura 6 mostra as linhas de trajetória do escoamento para os casos A, C e D. É interessante notar que em todos os casos, o pico da velocidade ultrapassou os  $0,40\text{m.s}^{-1}$ , valor acima do recomendado pela NBR 12216/92. O caso A foi o que apresentou maior pico na velocidade, ultrapassando  $0,70\text{m.s}^{-1}$ , indicado pela cor vermelha nas primeiras passagens da figura, enquanto os casos C e D ficaram na ordem de  $0,60\text{m.s}^{-1}$ .

O interessante das linhas de trajetória é notar como o escoamento se comporta dentro do floculador. Na terceira câmara, por exemplo, há uma divisão em duas zonas logo após a passagem, percebida mais claramente no caso D. Também é possível notar que o caso D tem um escoamento com um padrão mais bem definido, possivelmente devido ao maior comprimento de suas câmaras, enquanto os casos A e C apresentam um escoamento mais disperso, com comportamento mais aleatório, o que é melhor para o choque entre as partículas para a formação de flocos. Todavia, o caso A, com suas passagens alternadas, permitem que o escoamento faça um movimento mais espiralado que o caso C.



**Figura 6: Linhas de trajetória para os casos A, C e D**

Em relação à energia cinética turbulenta (TKE), a Figura 7 apresenta os resultados obtidos para os casos A, C e D, em um plano a meia altura. Apesar do caso C ter o menor pico de TKE, cerca de  $0,00563 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , ele apresenta menor perda de energia ao longo das câmaras, mantendo certa turbulência até mesmo na última fileira, quando comparado aos casos A e D. O caso A apresenta seus maiores valores de TKE ao redor das paredes, devido a característica das passagens intercaladas, ao contrário do caso C e D, onde os valores de TKE são maiores no centro das câmaras por causa das passagens centralizadas. O trabalho não contemplou os valores limites de TKE para que haja agregação ou desagregação de flocos, porém supõe-se que seja interessante certa turbulência durante todo o floculador para a formação de flocos, o que o caso C consegue com maior sucesso.

Comparando os resultados de magnitude da velocidade, considerando H como a altura do floculador, a Figura 8 apresenta três planos, o superior a  $0,85H$ , o do meio a  $0,50H$  (meia altura), e o inferior a  $0,025H$ .



Todos os casos apresentaram formação de zonas mortas, perceptível através da coloração azul escura apresentada nos planos, principalmente nos centros das câmaras, resultado semelhante ao obtido por Bridgeman, Jefferson e Parsons (2010). O escoamento tem um caminho preferencial pelos contornos da parede da chicana, observado inclusive na Figura 6, fazendo com que a velocidade no centro de todas as câmaras seja nula ou muito baixa. Contudo, as passagens mais largas e centralizadas dos casos C e D permitem que a velocidade se distribua sobre toda a área da câmara mostrada nos planos inferior e superior, observadas pela coloração esverdeada na primeira e segunda fileira, e azul clara na terceira fileira. O caso A, no entanto, isso ocorre basicamente na área da dimensão da passagem, que é menor, deixando mais zonas mortas nos planos inferior e superior.

Conforme já comentado nas linhas de trajetória, houve pontos em que a velocidade nas passagens ficou fora dos padrões, ou seja, superou o valor máximo usual de  $0,40\text{m.s}^{-1}$ . O caso A foi o mais impactado em relação a esse excesso, que atingiu valor superior a  $0,70\text{m.s}^{-1}$ . O caso C ficou mais equilibrado, com máxima pouco menor que  $0,60\text{m.s}^{-1}$ .

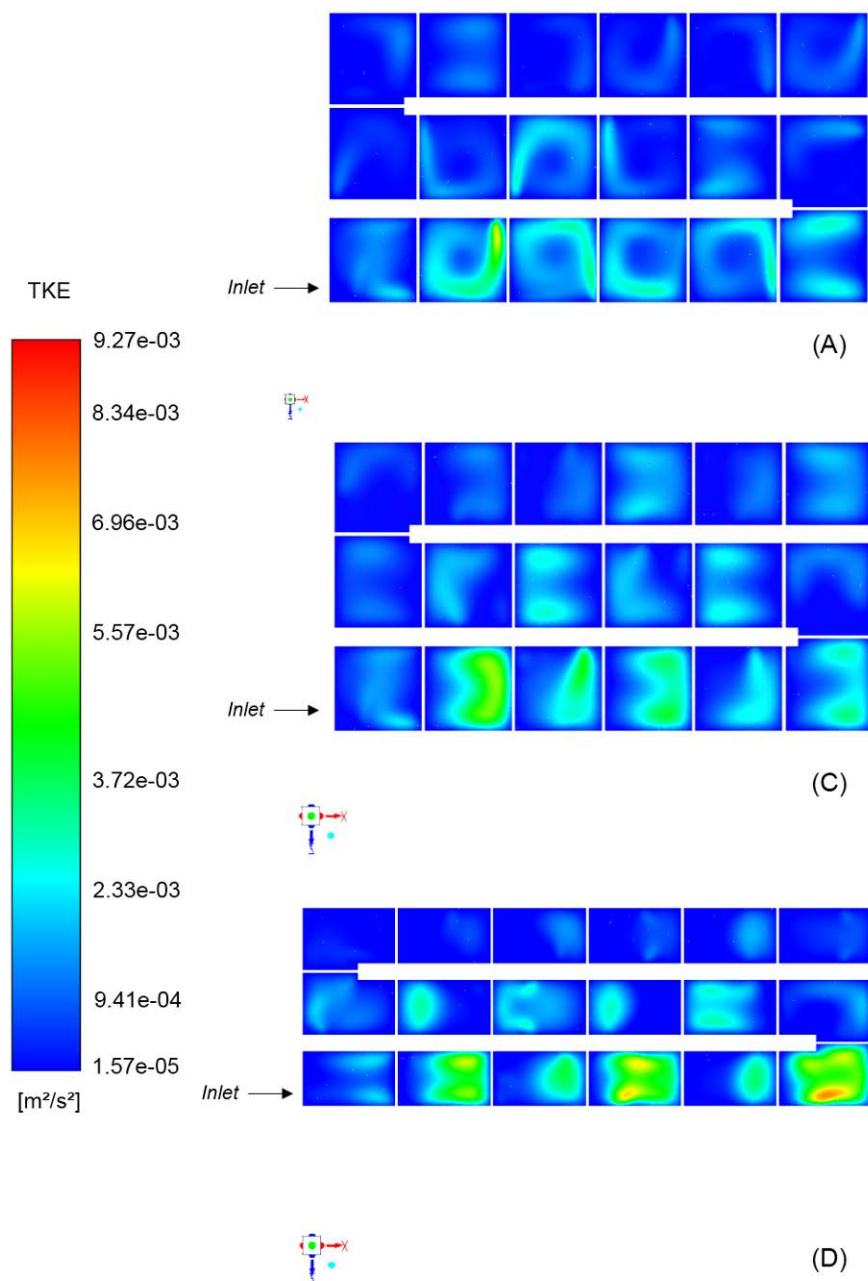
Essa figura 9 em corte permite visualizar as zonas de recirculação, mais notoriamente na terceira e quinta câmaras nos casos C e D. O caso A também mostra várias zonas de recirculação ao longo da altura das câmaras, caracterizados pelos diferentes fluxos circulares. Nos planos em corte dos casos C e D, também há essas zonas de recirculação ao longo da altura, porém com menos frequência e em pontos mais centrais com baixa velocidade.

Já para a influência da vazão, analisando os casos, o escolhido para uma análise de influência da vazão foi o caso C, levando em consideração a redução do efeito de jato no cisalhamento, a energia cinética turbulenta agindo durante todo o escoamento e apresentar o menor pico de velocidade, fatores que podem contribuir para a melhor formação dos flocos.

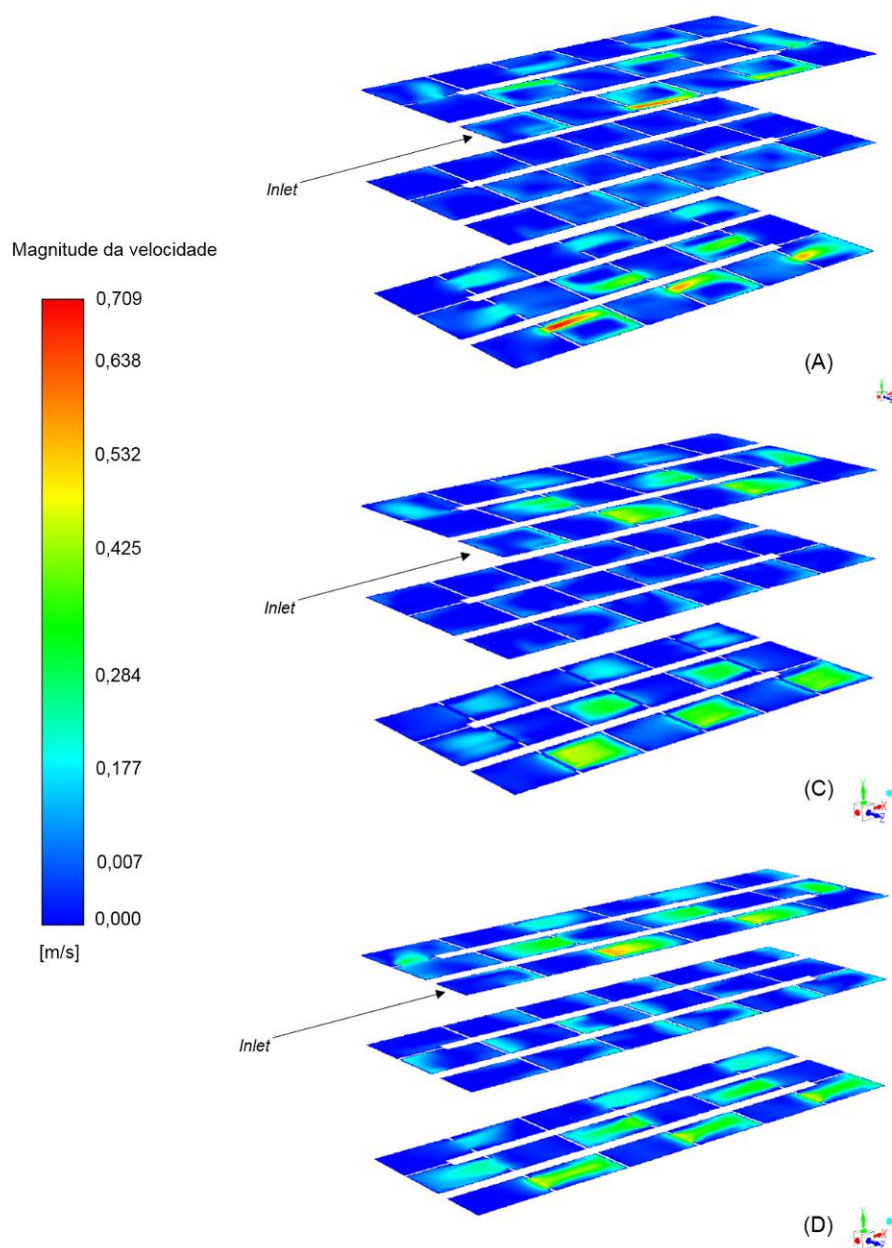
A influência da vazão foi analisada levando em consideração a condição operacional que ocorre quando uma das unidades de floculação está em manutenção e/ou limpeza e a outra unidade deve operar com um acréscimo de vazão por um determinado período de tempo (tempo de lavagem do floculador). Foram analisadas as vazões de projeto ( $0,025\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ), 25% acima ( $0,03125\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e 50% acima ( $0,0375\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

O padrão do escoamento se mantém com as diferentes vazões, o que muda é a intensidade em cada caso, sendo, obviamente, maior de acordo com o aumento da vazão.

Quanto à magnitude da velocidade, que já apresentava pico acima do usualmente aceito ( $0,40\text{m.s}^{-1}$ ), com o aumento das vazões, a velocidade também aumenta consideravelmente, chegando a  $0,713\text{m.s}^{-1}$  para a vazão aumentada em 25% e  $0,856\text{m.s}^{-1}$  para a vazão 50% maior do que a vazão de projeto, valores fora da NBR 12.216/1992, que podem prejudicar a formação de flocos e reduzir a eficiência do floculador.

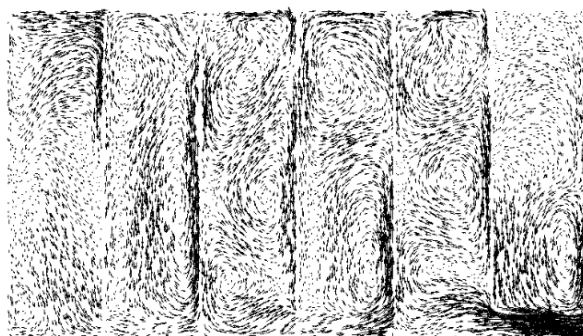


**Figura 7: TKE para os casos A, C e D**

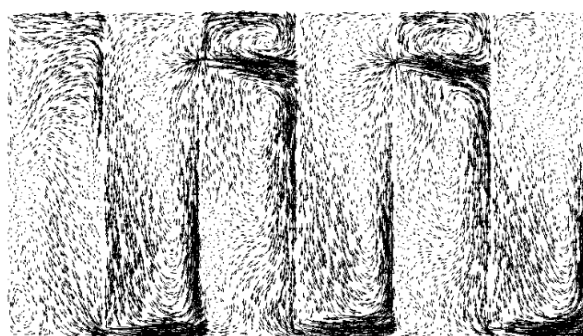


**Figura 8: Magnitude da velocidade para os casos A, C e D**

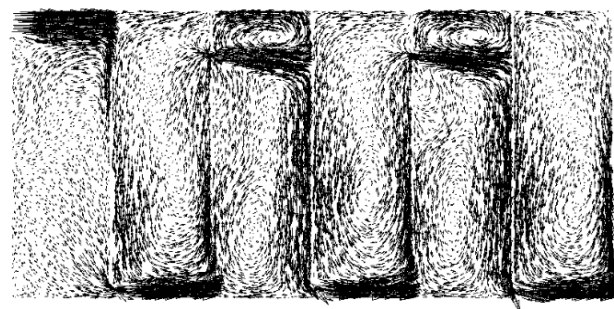
A figura 9 mostra os vetores de magnitude da velocidade em planos que cortam a primeira fileira ao meio, para os casos A, C e D. Em razão da menor largura da câmara no caso D, os vetores possuem maior magnitude porque o plano corta parte da entrada do fluxo. Por conter passagens alternadas perto das paredes, o plano do caso A não as mostrou na imagem como nos casos C e D, que estão centralizadas. Entretanto, o corte no meio da primeira fileira foi escolhido para ter o mesmo critério de análise do escoamento no meio das câmaras.



(A)



(C)



(D)



**Figura 9: Vetores de magnitude de velocidade em corte para os casos A, C e D**

Essa figura 9 em corte permite visualizar as zonas de recirculação, mais notoriamente na terceira e quinta câmaras nos casos C e D. O caso A também mostra várias zonas de recirculação ao longo da altura das câmaras, caracterizados pelos diferentes fluxos circulares. Nos planos em corte dos casos C e D, também há essas zonas de recirculação ao longo da altura, porém com menos frequência e em pontos mais centrais com baixa velocidade.

Já para a influência da vazão, analisando os casos, o escolhido para uma análise de influência da vazão foi o caso C, levando em consideração a redução do efeito de jato no cisalhamento, a energia cinética turbulenta agindo durante todo o escoamento e apresentar o menor pico de velocidade, fatores que podem contribuir para a melhor formação dos flocos.



A influência da vazão foi analisada levando em consideração a condição operacional que ocorre quando uma das unidades de floculação está em manutenção e/ou limpeza e a outra unidade deve operar com um acréscimo de vazão por um determinado período de tempo (tempo de lavagem do floculador). Foram analisadas as vazões de projeto ( $0,025\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ), 25% acima ( $0,03125\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e 50% acima ( $0,0375\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

O padrão do escoamento se mantém com as diferentes vazões, o que muda é a intensidade em cada caso, sendo, obviamente, maior de acordo com o aumento da vazão.

Quanto à magnitude da velocidade, que já apresentava pico acima do usualmente aceito ( $0,40\text{m}.\text{s}^{-1}$ ), com o aumento das vazões, a velocidade também aumenta consideravelmente, chegando a  $0,713\text{m}.\text{s}^{-1}$  para a vazão aumentada em 25% e  $0,856\text{m}.\text{s}^{-1}$  para a vazão 50% maior do que a vazão de projeto, valores fora da NBR 12.216/1992, que podem prejudicar a formação de flocos e reduzir a eficiência do floculador.

## CONCLUSÕES

O trabalho permitiu verificar a utilização de modelagem matemática computacional como uma ferramenta auxiliar na elaboração de projetos mais eficientes de estações de tratamento de água.

Até hoje muitos projetistas se baseiam somente em normas técnicas e valores usuais da literatura e de operação. A ferramenta computacional serve para complementar, permitindo uma avaliação sob uma nova ótica, inclusive com auxílio visual. As imagens geradas com o resultado da simulação permitem várias constatações que auxiliam no diagnóstico de problemas, e, por conseguinte, na elaboração de soluções.

As simulações dos diferentes casos possibilitaram analisar como a geometria das passagens e das câmaras influenciam no escoamento dentro do floculador. As passagens centralizadas e mais alongadas diminuíram a magnitude da velocidade e permitiram uma energia cinética turbulenta mais bem distribuída ao longo do floculador. Já as passagens intercaladas do caso A e B proporcionam um fluxo mais espiralado, percorrendo da direita à esquerda, até chegar à outra passagem, podendo oportunizar maior chance de choques entre as partículas.

De modo geral, dentre os casos apresentados, o caso C apresentou melhor comportamento em comparação aos outros casos, com menor pico de magnitude de velocidade, melhor distribuição de energia cinética turbulenta e menor cisalhamento nas paredes e efeito de jato.

O presente trabalho concluiu que a combinação da modelagem matemática com as normas técnicas é muito útil ao projetista, permitindo tomar melhores decisões que aumentam a eficiência do floculador. Vale ressaltar que esta é uma pesquisa inicial, o que permite mais análises e discussões à medida que mais trabalhos sobre floculadores hidráulicos de chicanas de fluxo vertical forem desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992. 18 p.
2. BRIDGEMAN, J.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S.A. The development and application of CFD models for water treatment flocculators. *Advances in Engineering Software*, v. 41, n. 1, p. 99-109, 2010.
3. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P. E.N. Métodos e técnicas de tratamento de água. 3. ed. São Carlos: LDiBe Editora, 2017. 1246 p.
4. HELLER, L.; PÁDUA, V.L. Abastecimento de água para consumo humano. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010a. v. 1.
5. HELLER, L.; PÁDUA, V.L. Abastecimento de água para consumo humano. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010b. v. 2.
6. LOVATTE, E.R. Estudo da transferência de massa por volatilização de compostos odorantes a partir de superfícies líquidas quiescentes. 2015. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
7. WOLS, B. CFD in drinking water treatment. Holanda: International Water Association, 2011.