

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

*“Estudo Hidrodinâmico de Floculadores Mecanizados
Aplicados ao Tratamento de Água”*

JESUS LEONARDO CESTARI

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Libânio
Co-Orientador: Prof. Dr. Tsunao Matsumoto

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Ilha Solteira – SP
abril/2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- C422e Cestari, Jesus Leonardo.
Estudo hidrodinâmico de flocladores mecanizados aplicados ao tratamento de água / Jesus Leonardo Cestari. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011
76 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2011
- Orientador: Marcelo Libânio
Co-orientador: Tsunao Matsumoto
Inclui bibliografia
1. Tratamento de água. 2. Floclação mecanizada. 3. Estudo hidrodinâmico.
4. Curto-circuito.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo Hidrodinâmico de Flocoadores Mecanizados Aplicados ao Tratamento de Água

AUTOR: JESUS LEONARDO CESTARI

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCELO LIBÂNIO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área RECURSOS HÍDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO LIBÂNIO

Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos / Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte/MG

Prof. Dr. MILTON DALL AGLIO SOBRINHO

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LUIZ DI BERNARDO

Departamento de Hidráulica e Saneamento / Escola de Engenharia de São Carlos-USP

Data da realização: 08 de abril de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha amada esposa Naila
e aos meus pais Dorival e Lourdes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por me dar a capacidade de realizar mais um sonho, me abençoando grandemente neste projeto.

À minha esposa Naila, pelo amor, carinho, paciência e cumplicidade em todo o momento.

Aos meus pais, Dorival e Lourdes, que sempre me ajudaram e apoiaram incondicionalmente nesta longa jornada.

Ao meu irmão e amigo Eduardo que me apresentou Ilha Solteira e me incentivou.

Aos professores Milton Dall’Aglia Sobrinho e Tsunao Matsumoto do Departamento de Engenharia Civil (DEC) que me ensinaram o caminho da vitória. Ao querido professor da UFMG e orientador Marcelo Libânio pela oportunidade de participar deste projeto, pelo apoio material e estrutural e pelas orientações que foram de grande valia para a realização deste.

Ao laboratório Central da UNESP, na pessoa do técnico Cavassano pelo grande empenho na construção e funcionamento do projeto.

Aos meus cunhados e sobrinho, Marlon, Silmara e Rafael, pelas orações, incentivo e momentos de descontração que me fizeram seguir em frente.

Aos meus sogros, Naor e Miriam, que me apoiaram e colaboraram materialmente.

Aos meus avôs, por consideração, Francisco e Leonilda, pelo carinho a mim dispensado e principalmente por suas orações.

Aos amigos Edvan, Cidão e Gustavo pelo apoio na realização dos ensaios hidrodinâmicos.

Aos meus queridos amigos Antonio Marcos, Sara, Gabi, Cleber, Elisângela (Li) Enzo, Carlos, Loana, Nice, Jonas, Maicon e Queila.

Aos companheiros de trabalho na cidade de Riolândia, Ricardo e Antonio Carlos, que me deram a ajuda necessária para realizar os ensaios finais sem interrupção.

RESUMO

CESTARI, J. L. Estudo hidrodinâmico de floculadores mecanizados aplicados ao tratamento de água. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2011.

Utilizando-se um floculador mecanizado com quatro câmaras foram realizados ensaios hidrodinâmicos com o traçador cloreto de sódio obtendo-se curvas de distribuição dos tempos de residência (DTR) e os tempos de residência médios para os tempos de residência teórico de 29,54 min, 22,15 min e 14,77 min respectivamente para o floculador operando com 04, 03 e 02 câmaras. Entre as câmaras de floculação havia quatro diferentes posições de passagens, sendo duas em cima “D” e “E” (respectivamente Direita superior e Esquerda superior) e duas embaixo “d” e “e” (respectivamente direita inferior e esquerda inferior). Levando-se em consideração que a entrada de água era realizada na passagem “e”, foram combinadas quatro configurações de passagem para floculador de 04 câmaras (**eEeEe** , **eDeDe** , **edede** e **eeee**) e uma quinta empregando-se anteparos (**e/e/e/e**). As mesmas configurações foram estendidas ao floculador operando com 03 e 02 câmaras. Procurou-se avaliar nos floculadores, operando sob as diferentes configurações de passagem apresentadas acima, a magnitude dos efeitos dos curtos-circuitos de acordo com os estudos pré-definidos. Tais estudos combinaram o sentido de rotação dos agitadores (sentido alternado e mesmo sentido de rotação ao longo das câmaras) com a constância ou a variação do gradiente de floculação, além de um estudo com os agitadores desligados. Observou-se, após a análise das curvas DTR, que as configurações **edede** e **e/e/e/e** para floculador de 04 câmaras, estendidas aos floculadores de 03 e 02 câmaras, apresentaram menor incidência de curtos-circuitos que a configuração **eEeEe**. A colocação do anteparo que gerou a configuração **e/e/e/e** para floculador de 04 câmaras, estendida aos floculadores de 03 e 02 câmaras, mostrou-se uma alternativa eficiente somente na ausência da agitação, promovida pelos agitadores. Para floculador de 04 câmaras não se nota a influência dos parâmetros, sentido do agitador e a constância ou variação do gradiente de velocidade, sobre a DTR.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de água. Floculação mecanizada. Estudo hidrodinâmico. Curto-circuito.

ABSTRACT

CESTARI, J. L. Hidrodinamic study of mechanized flocculation applied to water treatment. 2011. 78 f. Dissertation (Mastering in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

Using a mechanical flocculator with four flocculation chambers, hydrodynamic tests were conducted using sodium chloride as a tracer resulting in curves of the residence time distribution (RTD) and the mean residence times for the theoretical residence time of 29.54 min, 22.15 min and 14.77 minutes, respectively for the flocculator with 04, 03 and 02 chambers. Between the flocculation chambers had four different positions of passages, two on top "D" and "E" (respectively upper right and upper left) and two down "d" and "e" (respectively lower right and lower left). Taking into account that the entry of water has always been held in the lower left passage "e" for the flocculator with 04 chambers, four different configurations were combined (eEeEe, eDeDe, edede and eeeee) and a fifth employing shields (e/e/e/e/e). The same settings were extended to the flocculator operating with three and two chambers. Was evaluated in flocculation unit, operating under the different configurations of passage, the magnitude of the effects of short circuits according to the studies previously defined. These studies combined the direction of rotation of the agitator with the velocity gradient and a study of the rioters off. Was observed after analysis of the curves RTD, that the settings edede and e/e/e/e/e to flocculators of 04, 03 and 02 chambers, showed a lower incidence of short-circuits that configuration eEeEe. The placement of the bulkhead, which generated the configuration e/e/e/e/e, showcases itself as an efficient alternative only in the absence of agitation, promoted by agitators. Flocculator with 04 chambers, one does not notice the influence of parameters direction of the agitator and the constancy or variation of velocity gradient on the RTD.

KEYWORDS: Water Treatment. Mechanical flocculation. Hydrodynamic study. Short-circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Causas dos desvios dos modelos de escoamentos ideais.....	16
Figura 3.2 – Curva de DTR ou curva E.....	23
Figura 3.3 – Experimento do tipo pulso e a curva concentração pelo tempo.....	24
Figura 3.4 – Transformação da curva E em E_0	25
Figura 3.5 – Curvas de DTR para modelos de tanques em série.....	27
Figura 4.1 – Planta e corte A-A da unidade de floculação mecanizada.....	29
Figura 4.2 – Corte B-B da unidade de floculação mecanizada.....	30
Figura 4.3 – Etapas da construção das câmaras de floculação.....	30
Figura 4.4 – Unidade de floculação mecanizada com 04 câmaras.....	30
Figura 4.5 – Esquema da instalação experimental.....	31
Figura 4.6 – Equipamentos empregados na realização dos ensaios.....	32
Figura 4.7 – Configuração eEeEe da unidade de floculação com 04 câmaras.....	33
Figura 4.8 – Configuração eDeDe da unidade de floculação com 04 câmaras.....	34
Figura 4.9 – Configuração edede da unidade de floculação com 04 câmaras.....	34
Figura 4.10 – Configuração eeeee da unidade de floculação com 04 câmaras.....	35
Figura 4.11 – Configuração e/e/e/e da unidade de floculação com 04 câmaras.....	36
Figura 4.12 – Curva para determinação da rotação do agitador.....	39
Figura 5.1 – Estudos realizados na configuração eEeEe – Floculador de 04 câmaras.....	45
Figura 5.2 – Estudos realizados na configuração eDeDe – Floculador de 04 câmaras.....	46
Figura 5.3 – Estudos realizados na configuração edede – Floculador de 04 câmaras..	46
Figura 5.4 – Estudos realizados na configuração eeeee – Floculador de 04 câmaras..	46
Figura 5.5 – Estudos realizados na configuração e/e/e/e – Floculador de 04 câmaras.....	47
Figura 5.6 – Estudos realizados na configuração eEeE – Floculador de 03 câmaras..	48
Figura 5.7 – Estudos realizados na configuração eDeD – Floculador de 03 câmaras..	48
Figura 5.8 – Estudos realizados na configuração eded – Floculador de 03 câmaras...	49
Figura 5.9 – Estudos realizados na configuração eeee – Floculador de 03 câmaras...	49
Figura 5.10 – Estudos realizados na configuração e/e/e/e – Floculador de 03 câmaras.....	49
Figura 5.11 – Estudos realizados na configuração eEe – Floculador de 02 câmaras..	50

Figura 5.12 – Estudos realizados na configuração eDe – Floculador de 02 câmaras..	51
Figura 5.13 – Estudos realizados na configuração ede – Floculador de 02 câmaras..	51
Figura 5.14 – Estudos realizados na configuração eee – Floculador de 02 câmaras..	51
Figura 5.15 – Estudos realizados na configuração e/e/e – Floculador de 02 câmaras.	52
Figura 5.16 – Estudo 05 em floculador de 04 câmaras.....	53
Figura 5.17 – Estudo 05 em floculador de 03 câmaras.....	54
Figura 5.18 – Estudo 05 em floculador de 02 câmaras.....	54
Figura 5.19 – Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração edede.....	56
Figura 5.20 – Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração eEeEe.....	56
Figura 5.21 – Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração e/e/e/e.....	57
Figura 5.22 – Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração eEeE.....	58
Figura 5.23 – Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração e/e/e.....	59
Figura 5.24 – Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração eEe.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Nomenclatura das posições das passagens no floculador.....	33
Tabela 4.2 – Nomenclatura das configurações adotadas para os floculadores.....	36
Tabela 4.3 – Parâmetros adotados nos ensaios para floculador de 04 câmaras.....	37
Tabela 4.4 – Parâmetros adotados nos ensaios para floculador de 03 câmaras.....	37
Tabela 4.5 – Parâmetros adotados nos ensaios para floculador de 02 câmaras.....	38
Tabela 4.6 – Procedimento para obtenção das curvas normalizadas E_0 por θ	41
Tabela 5.1 – Soma dos erros quadráticos para floculador de 04 câmaras.....	55
Tabela 5.2 – Soma dos erros quadráticos para floculador de 03 câmaras.....	57
Tabela 5.3 – Soma dos erros quadráticos para floculador de 02 câmaras.....	59
Tabela 5.4 – Estatística descritiva das SEQ das configurações de passagem.....	61
Tabela 5.5 – Resultado do teste de significância para as diferenças entre as médias de SEQ.....	62
Tabela 5.6 – Tempo de residência médio adimensional para floculador de 04 câmaras.....	64
Tabela 5.7 – Tempo de residência médio adimensional para floculador de 03 câmaras.....	66
Tabela 5.8 – Tempo de residência médio adimensional para floculador de 02 câmaras.....	67
Tabela 5.9 – Estatística descritiva dos tempos de residência médio dimensionais das configurações de passagem.....	68
Tabela 5.10 – Resultado do teste de significância para as diferenças entre as médias dos tempos de residência médios dimensionais.....	69

LISTA DE ABREVIACÕES

A – Área sob a curva de concentração de traçador na saída em função do tempo [MTL⁻³]

c_i – concentração de traçador no tempo i [ML⁻³]

DTR – Distribuição de tempo de residência

E – Distribuição de idade de saída [T⁻¹]

E_θ – Distribuição de idade de saída adimensional

ETA – Estação de tratamento de água

Gf – Gradiente de velocidade médio de floculação [T⁻¹]

M – Massa de traçador [M]

N – Número de tanques em série

n – Número de câmaras em série

Q – Vazão de escoamento [L³/T]

T – Tempo de residência teórico [T]

Tf – Tempo de floculação [T]

t_m – Tempo de residência médio obtido a partir da curva DTR [T]

uT – Unidade de Turbidez

V – Volume [L³]

Δt_i – Intervalo de tempo

θ – Tempo adimensional

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	Objetivo geral.....	14
2.2.	Objetivos específicos.....	14
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1.	Modelos de escoamento.....	15
3.2.	Fatores intervenientes na floculação.....	17
3.2.1.	Tempo de residência ou tempo de floculação (T_f).....	17
3.2.2.	Gradiente de velocidade médio de floculação (G_f).....	18
3.2.3.	Geometria dos agitadores e reatores.....	20
3.3.	Técnica de estímulo e resposta.....	21
3.4.	Traçadores.....	21
3.5.	Curva E ou distribuição dos tempos de residência (DTR).....	22
3.5.1.	Métodos experimentais para determinação da curva E.....	23
3.5.2.	Experimento com a aplicação do tipo pulso.....	23
3.6.	Modelo para escoamento não ideal.....	26
3.6.1.	Modelo de tanques de mistura completa em série.....	26
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1.	Local de trabalho.....	28
4.2.	Descrição do aparato experimental.....	28
4.3.	Equipamento.....	32
4.4.	Procedimento experimental.....	32
4.4.1.	Montagem e descrição das configurações de passagem.....	32
4.4.2.	Gradiente de velocidade adotado e uso dos agitadores.....	36
4.4.3.	Medição da vazão e tempo de residência adotado.....	38
4.4.4.	Determinação da rotação e do gradiente de velocidade médio de floculação.....	39
4.4.5.	Preparo e injeção da solução de traçador.....	39
4.4.6.	Medição da condutividade e determinação da concentração.....	40

4.4.7.	Análise estatística dos dados experimentais.....	41
4.4.7.1.	Obtenção das curvas experimentais e dos tempos de residência médios...	41
4.4.8.	Método estatístico empregado na aderência da curva experimental a curva ideal e nos tempos de residência médios.....	42
5.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	43
5.1.	Definição dos estudos realizados em flocluladores de 04, 03 e 02 câmaras em série.....	43
5.1.1.	Floclulador de 04 câmaras em série.....	43
5.1.2.	Floclulador de 03 câmaras em série.....	44
5.1.3.	Floclulador de 02 câmaras em série.....	44
5.2.	Influência do sentido do agitador e do gradiente de velocidade sobre as diferentes configurações de passagem.....	45
5.2.1.	Floclulador de 04 câmaras em série.....	45
5.2.2.	Floclulador de 03 câmaras em série.....	48
5.2.3.	Floclulador de 02 câmaras em série.....	50
5.3.	Influência das configurações de passagem na ausência da agitação.....	53
5.3.1.	Floclulador de 04 câmaras em série.....	53
5.3.2.	Floclulador de 03 câmaras em série.....	53
5.3.3.	Floclulador de 02 câmaras em série.....	54
5.4.	Análise da aderência dos resultados experimentais ao modelo de tanques em série.....	55
5.4.1.	Floclulador de 04 câmaras em série.....	55
5.4.2.	Floclulador de 03 câmaras em série.....	57
5.4.3.	Floclulador de 02 câmaras em série.....	59
5.4.4.	Análise estatística da SEQ.....	61
5.5.	Avaliação do tempo de residência médio.....	64
5.5.1.	Floclulador de 04 câmaras em série.....	64
5.5.2.	Floclulador de 03 câmaras em série.....	66
5.5.3.	Floclulador de 02 câmaras em série.....	67
5.5.4.	Análise estatística dos tempos de residência médios adimensionais.....	68
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	71
7.	REFERÊNCIAS.....	73
8.	ANEXO.....	76

1. INTRODUÇÃO

Para a maioria dos mananciais subterrâneos, como forma de tratamento, apenas a desinfecção faz-se necessária para adequação ao padrão de potabilidade vigente (BRASIL, 2004). Já para os mananciais superficiais, devido à pior qualidade da água bruta, tornam-se indispensáveis que as etapas de clarificação, filtração e desinfecção estejam presentes no tratamento.

Para estações de tratamento de água que emprega a tecnologia de tratamento convencional, a ineficácia da floculação, aumentará a afluência de partículas as unidades filtrantes, favorecendo a perspectiva de deterioração da água filtrada e reduzindo o intervalo entre lavagens podendo tornar o processo de potabilização antieconômico.

Vale afirmar que a floculação ocorre mesmo na ausência de uma unidade específica para tal finalidade, pois pode ocorrer nos interstícios do meio filtrante ou na própria camada-suporte para as unidades de filtração direta de escoamento descendente ou ascendente.

A etapa de floculação constitui-se em um conjunto de fenômenos físicos, nos quais se tencionam em última instância reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida, fornecendo condições como tempo e agitação, para que ocorram os choques entre as partículas objetivando a formação dos flocos a serem posteriormente removidos por sedimentação/flotação ou filtração (LIBÂNIO, 2010).

Nos recentes projetos de tratamento de água de médio e grande porte (vazão maior que 100 L/s), os sistemas de floculação mecanizados têm sido usualmente adotados no lugar dos hidráulicos.

Os sistemas de floculação hidráulicos apresentam alguns inconvenientes, como a pouca flexibilidade em relação à variação da vazão, impossibilidade de variar ou ajustar a gradiente de velocidade e podem apresentar perda de carga relativamente alta, quando comparado com os floculadores mecanizados. Apresentam como vantagens menores custos de implantação, operação e manutenção, e não exigir pessoal qualificado para operação e manutenção.

Os sistemas mecanizados apresentam diversas vantagens sobre os hidráulicos como a baixa perda de carga, facilidade de instalação em estações existentes e maior flexibilidade de operação em função das variações das características da água bruta. As

limitações referem-se ao consumo de energia, à maior probabilidade de curtos-circuitos e à necessidade de manutenção dos equipamentos.

A NBR 12216/92, norma técnica que regulamenta os projetos de estações de tratamento de água para fins de abastecimento, recomenda para flocladores mecanizados tempo de residência teórico de 30 a 40 min, em média 40 % maior que para projetos de flocladores hidráulicos (20 a 30 min). De forma implícita, os efeitos negativos de curto-circuito hidráulico são contemplados nas próprias recomendações normativas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1992).

Ainda sobre a NBR 12216/92, esta faz vaga menção com o intuito de evitar a passagem direta do fluxo de água através das câmaras, especificamente quanto à disposição das passagens que interliga uma câmara a outra. Desta forma, a definição do local das passagens com o objetivo de reduzir os efeitos de curto-circuito e/ou formação de zonas mortas, mostrou-se de grande interesse para o desenvolvimento desta pesquisa. Além disso, serão realizados estudos empregando-se anteparos a frente das passagens quando estas estiverem na mesma posição (alinhadas), almejando o mesmo objetivo descrito anteriormente.

Na literatura não há pesquisas que relaciona o comportamento hidrodinâmico de flocladores mecanizados em face da disposição e tipo de abertura, com ou sem o emprego de anteparos após as aberturas (similarmente ao funcionamento das unidades hidráulicas do tipo Alabama). Portanto, no presente projeto será avaliado o desempenho hidrodinâmico de uma unidade de floclação mecanizada operando com duas, três e quatro câmaras em série, a fim de que se possa concluir para qual configuração de passagens o curto-circuito hidráulico, a formação de zonas mortas ou regiões estagnadas tornam-se menos relevantes.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliação hidrodinâmica de unidades de floculação mecanizada de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo.

2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento hidrodinâmico de uma unidade de floculação mecanizada, dotados de agitadores com paletas giratórias paralelas ao eixo vertical, operando com duas, três ou quatro câmaras em série empregando a técnica de estímulo e resposta aplicando-se traçador.
- Avaliar a magnitude do curto-circuito hidráulico para em função:
 - Do tipo e das disposições das aberturas;
 - Da magnitude e da gradação ao longo das câmaras do gradiente de velocidade;
 - Do sentido da rotação do agitador.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Modelos de escoamento

As informações teóricas e experimentais sobre os tipos de escoamentos encontram-se em textos de autoria de Smith (1981), Denbigh e Turner (1984), AWWA (1991), Levenspiel (2000) e Fogler (2006).

Reatores são unidades que convertem reagentes em produtos, após um período de tempo pré-determinado. De acordo com o tipo de alimentação estas unidades podem ser classificadas em reator descontínuo ou de batelada e reator contínuo.

Nos reatores de batelada os reagentes são adicionados em condições pré-estabelecidas até que as reações ocorram. Ao término da reação paralisa-se a operação e removem-se os produtos. Estes reatores são usados em operações de pequena escala, por exemplo, para testar um novo processo que não tenha sido completamente desenvolvido e para reações de difíceis conversões em operações contínuas.

Nos reatores contínuos, os reagentes e produtos são, respectivamente, adicionados e retirados continuamente do reator. Estes reatores são empregados na maioria das vezes na produção em grande escala. Além disso, apresentam como vantagem a facilidade no controle das operações e maior constância na qualidade dos produtos.

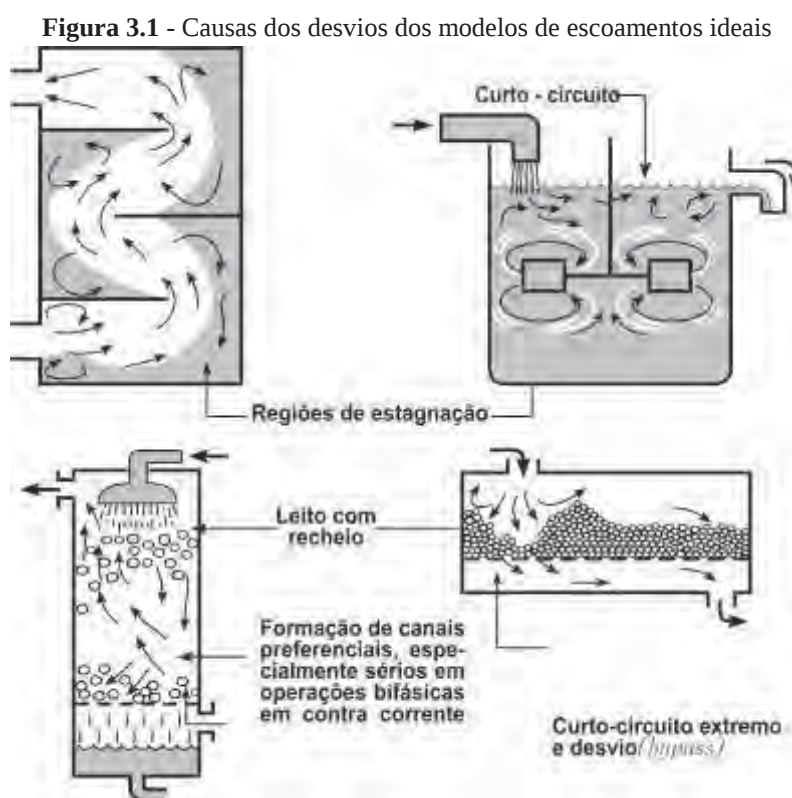
Os reatores podem apresentar dois tipos de modelos de escoamento ideal, do tipo pistão (*plug flow*) e do tipo mistura completa ou mistura perfeita (*perfect mixing*). Os reatores que apresentam o modelo de escoamento ideal do tipo pistão caracterizam-se por apresentar escoamento ordenado dos elementos do fluido, onde todas as moléculas de fluido possuem a mesma velocidade, levando, assim, o mesmo tempo para percorrer o reator, não havendo mistura. Por outro lado, nos reatores que apresentam o modelo de escoamento ideal do tipo mistura perfeita é caracterizado pela homogeneidade de qualquer propriedade do fluido, em qualquer ponto dentro do reator a qualquer tempo, não existindo variações espaciais de propriedades como, por exemplo, concentração e temperatura.

Na prática os reatores reais não seguem exatamente os modelos de escoamento ideal descritos anteriormente e apresentam escoamento arbitrário, ou seja, se aproximam mais de um ou de outro com maior ou menor desvio (LEVENSPIEL, 2000). O desvio

do escoamento ideal pode ser causado pela presença de curtos-circuitos, zonas mortas ou regiões estagnadas e recirculação do fluido, definidos a seguir:

- a) Curtos-circuitos: são caminhos preferenciais percorridos pelas moléculas de fluido;
- b) Zonas mortas ou regiões estagnadas: São regiões do reator caracterizadas pela baixa troca de massa e pequena quantidade de movimento com regiões adjacentes;
- c) Recirculação do fluido: retorno das partículas do fluido para o interior do reator.

Na Figura 3.1 são apresentadas as causas dos desvios dos modelos de escoamentos ideais.



Fonte: (LEVENSPIEL, 2000)

3.2. Fatores intervenientes na floculação

Alguns fatores tais como o gradiente de velocidade médio de floculação (G_f), que está relacionado à intensidade da mistura e o tempo de residência ou tempo de floculação (T_f), que corresponde ao tempo de agitação, constituem-se nos principais fatores intervenientes na floculação e nos principais parâmetros de projeto, seja para unidades hidráulicas ou mecanizadas. Além disso, em unidades mecanizadas a geometria das câmaras e do agitador possa ser mencionada como fatores secundários.

3.2.1. Tempo de residência ou Tempo de floculação (T_f)

O tempo residência teórico (T) é a razão entre o volume e a vazão afluenta a uma unidade. Verifica-se na prática que o tempo de floculação (T_f) aproxima-se do tempo de residência teórico (T) somente em unidades de floculação hidráulica do tipo de chicanas, devido ao elevado número de câmaras que faz com que o escoamento se aproxime do tipo pistão. Para unidades mecanizadas com pequeno número de câmaras em série, geralmente menor ou igual a quatro, os efeitos de curtos-circuitos reduzem o T_f . Nestes casos, parte da água permanece na unidade por um tempo inferior ao tempo de residência teórico, para a qual foram definidos os melhores parâmetros de coagulação e floculação.

Bratby (1981) ao estudar o tempo de floculação ótimo em reatores estáticos, desenvolveu a Equação 1 para tempo de residência teórico (T) equivalentes em unidades de floculação com escoamento contínuo, prevendo os efeitos de curto circuito.

$$T = T_f * \frac{n}{(n - 1)} \quad (1)$$

Na qual:

T : tempo de residência teórico (min);

T_f : tempo de residência ou tempo de floculação obtido em reatores estáticos ou jarteste (min);

n : número de câmaras em série.

Empregando a Equação 1 para uma unidade de floculação com três câmaras em série, o tempo de residência teórico (T) deveria ser aumentado de 42 para 63 min, ou seja, 50% maior para se obter a mesma eficiência em reatores estáticos.

A magnitude dos efeitos de curtos-circuitos relaciona-se diretamente com o número de câmaras em série. De acordo com Hudson Junior (1975) quando as unidades de floculação são compartimentadas, o tempo de residência da água floculada aumenta proporcionalmente com o aumento do número de câmaras que compõe tais unidades. Tal afirmação foi confirmada para uma unidade de floculação composta por uma única câmara, onde 39% da vazão afluenta deixam a unidade por um tempo inferior à metade do tempo de residência teórico, ao passo que, para uma unidade composta por cinco câmaras, apenas 11% da vazão deixa a unidade de floculação neste tempo.

Levando em consideração que a NBR 12216/92 faz vaga menção à disposição das aberturas entre as câmaras, Libânio (1995) recomenda, ainda que sem se basear estudos experimentais, que a localização das aberturas seja no fundo da unidade de floculação em lados alternados, acoplados a anteparos impelindo o escoamento no sentido ascendente visando à redução dos efeitos de curto-circuito sem elevar o número de câmaras frente aos custos dos equipamentos.

Os efeitos de curtos-circuitos em unidades de floculação mecanizada podem ser avaliados fazendo ensaios de traçador, com uso da técnica de estímulo e resposta, que consiste na adição de traçador na entrada da unidade, medindo-se sua concentração na saída. Desta forma, o conhecimento das características hidráulicas das unidades de floculação é uma importante ferramenta na determinação dos ensaios de tratabilidade, especialmente em reatores estáticos, que podem ser executados de acordo com as características da unidade avaliada (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

3.2.2. Gradiente de velocidade médio de floculação (G_f)

Os parâmetros G_f e T_f são os principais parâmetros a serem adotados no dimensionamento de unidades de floculação, seja mecanizado ou hidráulico. Para tanto, a Norma 12216/92 determina que na ausência de ensaios de floculação o G_f esteja compreendido entre 70 e $10s^{-1}$, respectivamente para o primeiro e último compartimento.

Estudos demonstram que a redução do G_f ao longo do tempo é de fundamental importância na formação dos flocos, visto que no início da etapa de

floculação agitação mais intensa é necessária para aumentar a probabilidade de contato entre as partículas desestabilizadas, de modo a formarem flocos, devendo-se reduzir a agitação posterior para diminuir a quebra dos flocos formados. A importância da gradação do Gf ao longo do tempo pode ser verificada na melhoria da água decantada.

Pádua (1994) ao desenvolver uma nova metodologia para relacionar Gf e o Tf ótimos para unidades de flocculação com escoamento contínuo a partir de ensaios realizados em reatores estáticos do tipo *jarteste*, comprovou que a gradação do Gf ao longo do tempo da primeira para a última câmara resultou em turbidez remanescente menor que quando o Gf ótimo era constante ao longo do tempo, para o mesmo Tf. Além disso, o autor observou que em unidades de escoamento contínuo, mesmo com os melhores resultados obtidos com a gradação do Gf, a turbidez remanescente ainda foi maior que aquela obtida em reatores estáticos. O autor concluiu que o pior resultado se deve a ocorrência de curtos-circuitos na unidade com escoamento contínuo.

A gradação dos gradientes de velocidade ao longo das câmaras de flocculação baseia nos mecanismos de agregação e ruptura dos flocos. No início da flocculação, as partículas encontram-se dispersas na água, de modo que devem ser empregados valores de Gf relativamente altos para aumentar a probabilidade de contato das partículas previamente desestabilizadas, para que assim formem os flocos.

Segundo Di Bernardo e Di Bernardo (2001) a redução do tempo de flocculação em unidades de flocculação com escoamento contínuo é possível a partir do emprego da metodologia descrita por Pádua (1994) adotando o escalonamento do gradiente de velocidade na flocculação. Tal assertiva foi confirmada pelos autores quando estudaram duas amostras diferentes de água bruta, amostras I e II, empregando condições semelhantes de coagulação, mistura rápida, flocculação e sedimentação.

Para amostra de água I, coagulada com cloreto férrico, para representar as melhores condições de flocculação, foram adotados os parâmetros Tf de 20 min e Gf constante de 20s^{-1} que resultasse na menor turbidez remanescente igual a 1,4 uT para uma unidade de flocculação de 03 câmaras em série. Os resultados mostraram que o escalonamento decrescente do Gf de 55, 30 e 20s^{-1} , respectivamente para a primeira, segunda e terceira câmara, possibilitou reduzir em 25% o Tf necessário para conseguir a mesma eficiência na remoção de turbidez.

Para amostra de água II, coagulada com sulfato de alumínio, foram adotados os parâmetros Tf de 20 min e Gf constante de 20s^{-1} resultando turbidez remanescente de 0,2 uT para uma unidade de flocculação de 04 câmaras. Os resultados mostraram que o

escalonamento decrescente do Gf de 55, 20, 20 e $20s^{-1}$, respectivamente para a primeira, segunda, terceira e quarta câmara, não possibilitou a redução do Tf que resultasse na mesma eficiência obtida com os parâmetros anteriores.

Os autores concluíram que a possível redução no tempo total de floculação decorrente da gradação do gradiente de velocidade na unidade de floculação, visando a obter a mesma eficiência na remoção da turbidez que aquela obtida com o gradiente de velocidade ótimo constante na floculação, é dependente da qualidade da água bruta, do tipo de coagulante, da velocidade de sedimentação e do número de câmaras em série.

3.2.3. Geometria dos agitadores e reatores

Letterman et al. (1973) realizaram estudos para verificar a influência da geometria das câmaras e dos equipamentos de agitação no processo de coagulação na floculação. Os autores estudaram câmaras de face quadrada e cilíndrica em planta e combinaram dois diferentes tipos de agitadores hélice e turbina. Conduzindo os ensaios para floculação com Gf de $10s^{-1}$ e variando o Tf (0, 15, 30, 45 e 60 minutos) e mantendo constante o tempo de sedimentação em 30 minutos, os autores concluíram que a câmara de face quadrada produziu turbidez remanescente ligeiramente menor quando empregado agitador do tipo turbina, após determinarem os parâmetros da mistura rápida e dosagem de coagulante que levassem a melhor eficiência na coagulação. Apesar da pequena supremacia alcançada nestas condições, a redução de custo pelo aproveitamento das paredes torna praticamente unânime a construção em concreto ou alvenaria de unidades de seção quadrada. As unidades de seção circular têm seu emprego restrito às estações pré-fabricadas.

Hanson e Cleasby (1990) estudaram os efeitos da diferença de geometria dos agitadores sobre uma suspensão de caulinita, concluindo que a ruptura dos flocos, para temperatura de $5^{\circ}C$ é mais acentuada no agitador tipo turbina, comparada ao de paletas. Porém para temperatura de $20^{\circ}C$ não houve diferença significativa no comportamento dos dois tipos de agitadores.

Para Libânio (2010) nas unidades de floculação com tempo de residência menor é de se esperar que os reatores de base quadrada apresentem desempenho inferior quando comparados aos de base circular, em função dos efeitos de curtos-circuitos associados à maior probabilidade de zonas mortas. Porém, para tempos de detenção

mais longos a forma do reator possivelmente não interferirá na eficiência da floculação e o desempenho da unidade será governado pelo número de câmaras e pela disposição das passagens.

3.3. Técnica de estímulo e resposta

O conhecimento da distribuição do tempo de residência (DTR) de elementos de fluido é utilizado para caracterizar o grau de não idealidade do escoamento. Esta informação pode ser facilmente determinada pela técnica de estímulo e resposta.

Segundo Levenspiel (2000), a técnica de estímulo e resposta consiste em verificar a resposta do sistema a um estímulo qualquer. Em geral, adiciona-se quantidade conhecida de traçador na corrente que entra no recipiente, registrando sua saída com tempo, na corrente que deixa o recipiente. Qualquer sinal de entrada de traçador pode ser usado como estímulo, destacando-se pulso, degrau, casual ou periódico. No entanto, será considerada apenas a função pulso para o estudo em questão por ser mais simples de ser aplicada, além de atender de forma plenamente satisfatória ao que se propõe este trabalho.

3.4. Traçadores

A obtenção de curvas DTR, empregando a técnica de estímulo e resposta, requer a utilização de materiais traçadores adequados para um dado sistema em questão.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), alguns fatores são determinantes na escolha do traçador como a vazão afluente a estação, o tamanho das unidades, a qualidade da água e o custo do produto, podendo ser empregados corantes (fluoresceína, rodamina), sais (fluoreto de sódio, fluoreto de potássio, cloreto de cálcio, cloreto de sódio, hipoclorito de sódio) e bases (hidróxido de sódio). Tanto o cloreto de cálcio quanto o cloreto de sódio são amplamente empregados em estudos hidrodinâmicos de unidades de tratamento de água. Os mesmos autores ainda recomendam que antes da escolha do traçador as seguintes considerações devam ser feitas:

- I. Que sua concentração na água bruta seja consistentemente baixa e aproximadamente constante;
- II. Que não reaja com compostos presentes na água; e

III. Que seja facilmente detectado e medido na água.

3.5. Curva E ou distribuição dos tempos de residência (DTR)

De acordo com Levenspiel (2000), os elementos de fluido que adotam caminhos diferentes através do reator levam tempos diferentes para percorrer todo o recipiente. Assim, a distribuição destes tempos para a corrente de fluido deixando o reator denomina-se distribuição de idade de saída, E (do inglês *exit*), ou distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido. É conveniente representar a DTR de modo que a área sob a curva seja igual à unidade (distribuição na forma normalizada), conforme descrita pela Equação 2:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad (2)$$

A fração da corrente de saída com idade (tempo despendido por aquele elemento no recipiente) entre t e $t + dt$ é representada pela Equação 3:

$$E dt \quad (3)$$

A fração mais nova que a idade t_1 é representada pela Equação 4:

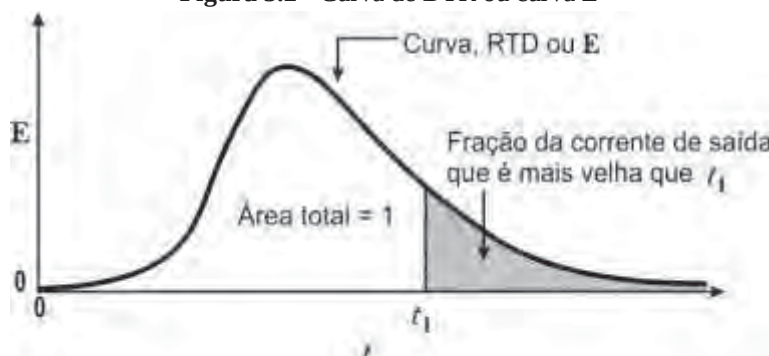
$$\int_0^{t_1} E dt \quad (4)$$

Enquanto que a fração de material mais velha que t_1 , mostrada como área sombreada na Figura 3.2, é apresentada pela Equação 5:

$$\int_{t_1}^{\infty} E dt = 1 - \int_0^{t_1} E dt \quad (5)$$

A curva E ou distribuição dos tempos de residência (DTR) é a distribuição necessária na avaliação do grau de desvio da idealidade do escoamento. A Figura 3.2 mostra a DTR normalizada.

Figura 3.2 - Curva de DTR ou curva E



Fonte: (LEVENSPIEL, 2000)

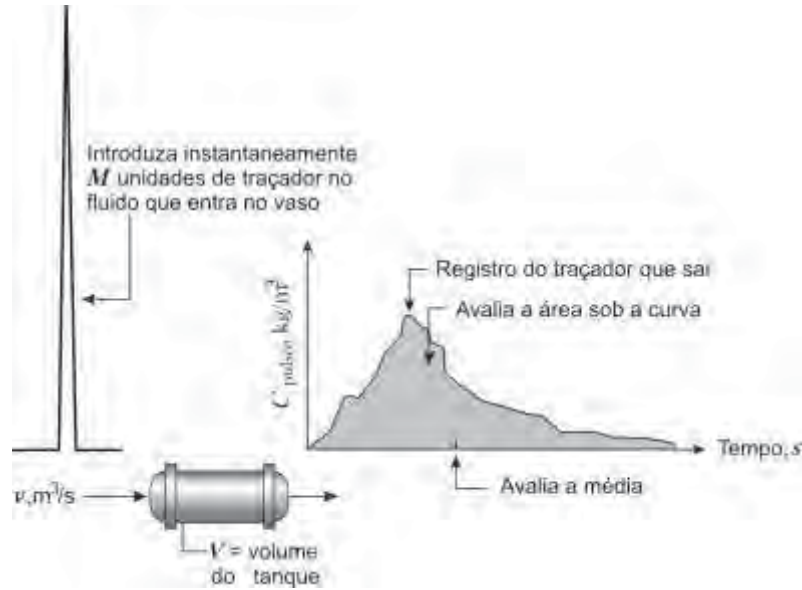
3.5.1. Métodos experimentais para determinação da curva E

A maneira mais simples e direta de determinar a curva E consiste no emprego de um traçador não reativo em um recipiente na qual se deseja avaliar. A forma de aplicação do traçador pode ser do tipo pulso, degrau, periódico e aleatório. Neste caso para a determinação da curva E, será empregada somente a aplicação do tipo pulso pela facilidade na interpretação dos resultados.

3.5.2. Experimento com a aplicação do tipo pulso

Segundo Levenspiel (2000), para encontrar a curva E para um recipiente com volume V , através do qual um fluido escoar com vazão Q , basta introduzir instantaneamente, no fluido que está entrando no recipiente, M unidades de um traçador e registrar a concentração e o tempo do traçador ao deixar o recipiente. Esta curva pode ser vista na Figura 3.3. No eixo das ordenadas tem a concentração C_{pulso} em função do tempo nas abscissas.

Figura 3.3 - Experimento do tipo pulso e a curva concentração pelo tempo



Fonte: (LEVENSPIEL, 2000)

A partir da obtenção da curva concentração versus tempo, pode ser realizado o cálculo da área (A) abaixo da curva, conforme mostra a Equação 6:

$$A = \int_0^{\infty} C \, dt \cong \sum_i c_i \cdot \Delta t_i = \frac{M}{Q} \quad (6)$$

Na qual:

c_i : Concentração de traçador no tempo i de coleta de amostra na saída da unidade;

Δt_i : Intervalo de tempo de coleta de amostra.

O tempo de residência médio (t_m) pode ser determinado empregando-se a Equação 7:

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t C \, dt}{\int_0^{\infty} C \, dt} = \frac{\sum_i t_i c_i \Delta t_i}{\sum_i c_i \Delta t_i} = \frac{V}{Q} \quad (7)$$

Segundo Rebhun e Argaman (1965), o tempo de residência médio (t_m) é um bom parâmetro para caracterizar a eficiência das unidades de floculação. Segundo os autores quando este parâmetro (t_m) é igual ao tempo de residência teórico (T) não há problemas

de escoamento com o reator. Porém para t_m menores que T , há formação de zonas mortas e consequentemente ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos.

Para encontrar a curva E a partir da curva concentração pelo tempo, basta simplesmente mudar a escala de concentração, de modo a fazer com que a área sob a curva seja igual à unidade. Assim, simplesmente dividem-se as leituras de concentração por M/Q , como mostrado na Equação 8:

$$E_i = \frac{c_i}{M/Q} \cong \frac{c_i}{\sum_i c_i \cdot \Delta t_i} \quad (8)$$

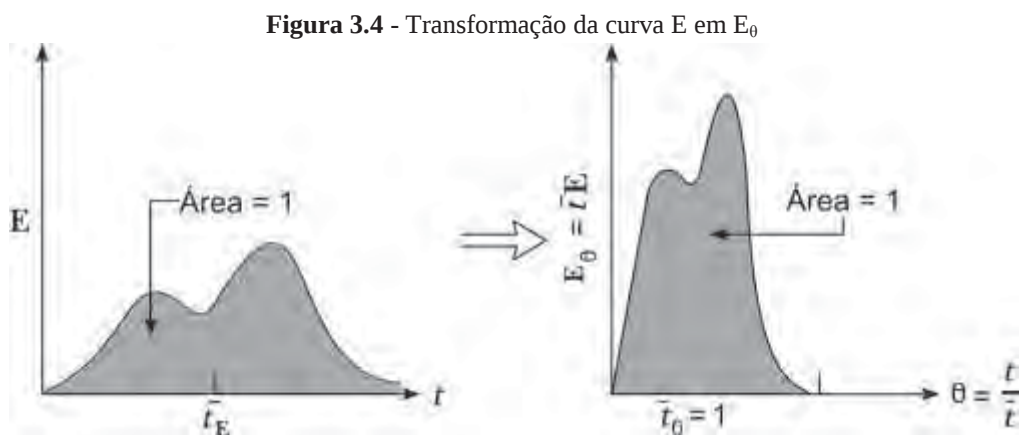
Na qual:

E_i : Distribuição de idade de saída no tempo i .

Outra forma de visualização da curva DTR provém da conversão da curva E para uma função E_θ , que adimensionaliza a escala de tempo, ao empregar um parâmetro $\theta = t/t_m$. Assim a nova função é obtida como mostrado na Equação 9:

$$E_\theta = t_m \cdot E_i = \frac{V}{Q} \cdot \frac{c_i}{M/Q} = \frac{V}{M} \cdot c_i \quad (9)$$

A Figura 3.4 apresenta a transformação da curva E em E_θ . Considere na Figura 3.4 a letra $\bar{t}$ como sendo t_m .



Fonte: (LEVENSPIEL, 2000)

3.6. Modelo para escoamento não ideal

De acordo com Levenspiel (2000) os modelos de escoamento são úteis para representar escoamentos em reatores, analogamente a flocluladores, e para diagnosticar problemas em escoamento, desta forma, é possível comparar as curvas obtidas experimentalmente com as curvas do modelo de escoamento ideal. Em flocluladores que apresentam curtos-circuitos, zonas mortas ou estagnadas, ou recirculação do fluido, as curvas DTR experimentais caracterizam-se por apresentarem respectivamente picos antecipados em relação ao tempo de residência teórico (T), longas caudas e oscilações na curva. Para o presente trabalho, o modelo de tanques em série foi escolhido por representar o escoamento em mistura nos flocluladores mecanizados.

3.6.1. Modelo de tanques de mistura completa em série

No modelo de tanques de mistura completa em série, N representa o número de reatores de mesmo volume, igualmente agitados, em série, através dos quais o fluido escoar. O grau de mistura é caracterizado pelo número de tanques (N). Desta forma, quanto maior o número de tanques – o que equivale ao número de câmaras do floclulador – mais baixo é o grau de mistura e, no caso limite de um número de tanques infinito, prevalece o escoamento pistonado (LEVENSPIEL, 2000). O delineamento das curvas ideais para este modelo é descrito na Equação 10:

$$E_{\theta} = N \frac{(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad (10)$$

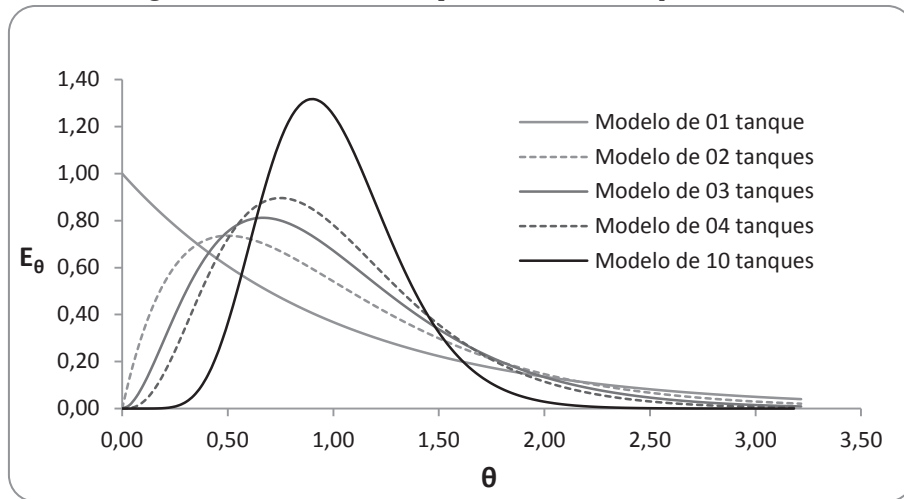
Na qual:

N: número de tanques;

θ : tempo de residência (adimensional).

Na Figura 3.5 são mostradas as curvas delineadas a partir da Equação 10.

Figura 3.5 - Curvas de DTR para modelos de tanques em série



Fonte: (ADAPTADO DE LEVENSPIEL, 2000)

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local de trabalho

O local de trabalho da presente pesquisa foram os Laboratórios de Hidrologia e Hidrometria e de Saneamento da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Ilha Solteira.

4.2. Descrição do aparato experimental

A unidade de floculação mecanizada de escoamento contínuo foi construída em acrílico transparente de 10 mm de espessura, com quatro câmaras em série de 144 L de volume útil cada, quadradas em planta, medindo 60x60 cm e altura útil de 40 cm, com passagens quadradas de 10x10 cm. Compartimentos de 36L foram anexados na entrada e saída do floculador para auxiliarem no funcionamento do aparato com vazão constante.

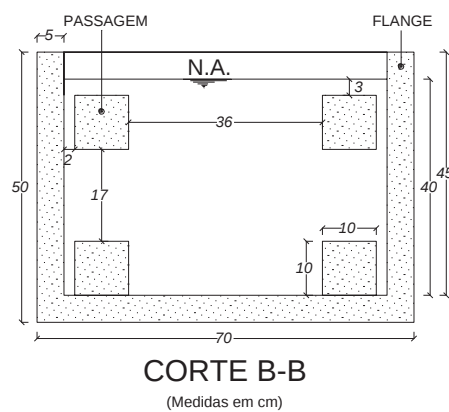
Os agitadores da unidade de floculação foram construídos em alumínio composto por quatro braços e duas paletas por braço. As paletas foram fixadas paralelas ao eixo vertical do agitador. As paletas foram dimensionadas com 35 cm de comprimento por 2,5 cm de largura. Para promover a agitação foram empregados motores do tipo moto-redutor, sendo um motor para cada agitador.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a planta e os cortes da unidade de floculação mecanizada e as Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as fases construtivas das câmaras da unidade de floculação.

A alimentação foi proporcionada por uma caixa de nível constante e a vazão foi regulada por meio de registro.

A retirada da água realizava-se por meio de vertedor do tipo tulipa, instalado na caixa de saída em local distante da abertura da última câmara. Tubulações em PVC, cotovelos, tês, registros e bomba foram empregados para compor o circuito hidráulico da unidade em estudo. A injeção do traçador foi realizada através de um dispositivo composto por reservatório, suportes de apoio, mangueiras e válvula. A Figura 4.5 apresenta o croqui do aparato experimental.

Figura 4.2 – Corte B-B da unidade de floculação mecanizada



Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.3- Etapas da construção das câmaras de floculação



Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.4 – Unidade de floculação mecanizada com 04 câmaras



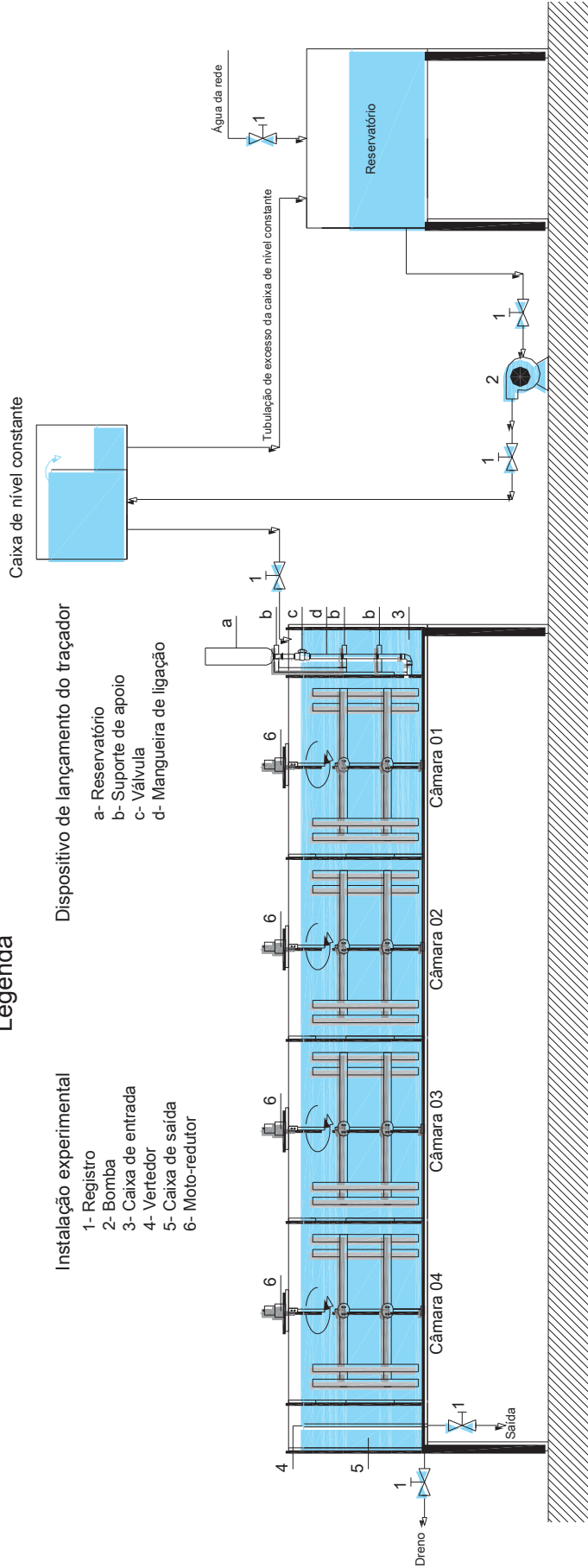
Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.5 - Esquema da instalação experimental

Legenda

- Instalação experimental
- 1- Registro
 - 2- Bomba
 - 3- Caixa de entrada
 - 4- Vertedor
 - 5- Caixa de saída
 - 6- Moto-reductor

- Dispositivo de lançamento do traçador
- a- Reservatório
 - b- Suporte de apoio
 - c- Válvula
 - d- Mangueira de ligação



Fonte: Cestari (2011)

4.3. Equipamentos

Na realização dos ensaios foi medido o parâmetro condutividade empregando três diferentes condutivímetros:

- a) Analion modelo C708;
- b) Digimed modelo DM 3;
- c) Analyser modelo 650.

Fontes de alimentação digital foram usadas para variar a tensão para obtenção da agitação desejada. A rotação da paleta do agitador, para caracterizar o gradiente de velocidade, foi medida manualmente com auxílio de um cronômetro. Outros equipamentos utilizados incluem balança analítica e vidrarias diversas de laboratório. A Figura 4.6 mostra os equipamentos empregados na realização dos ensaios.

Figura 4.6 – Equipamentos empregados na realização dos ensaios



Fonte: Cestari (2011)

4.4. Procedimento experimental

4.4.1. Montagem e descrição das configurações de passagem

Para a realização dos ensaios em floculadores de 04, 03 e 02 câmaras em série, o principal parâmetro de avaliação foi à combinação de diferentes configurações de passagem. Entre as câmaras havia quatro diferentes posições de passagem que interligava uma câmara a outra. Para tanto, fechavam-se três posições (com plástico acrílico e silicone) e mantinha-se apenas uma passagem aberta. Como a principal função

das passagens em flocladores mecanizados é apenas realizar a passagem de água floclada de uma câmara a outra, procurou-se avaliar as diferentes combinações de passagem na distribuição do tempo de residência (DTR).

Para melhor compreensão dos desenhos nomearam-se as quatro posições de passagem por letras. Adotou-se o sentido do escoamento de entrada de água como parâmetro inicial. Em planta e de montante para jusante, nomearam-se as passagens como mostrado na Tabela 4.1.

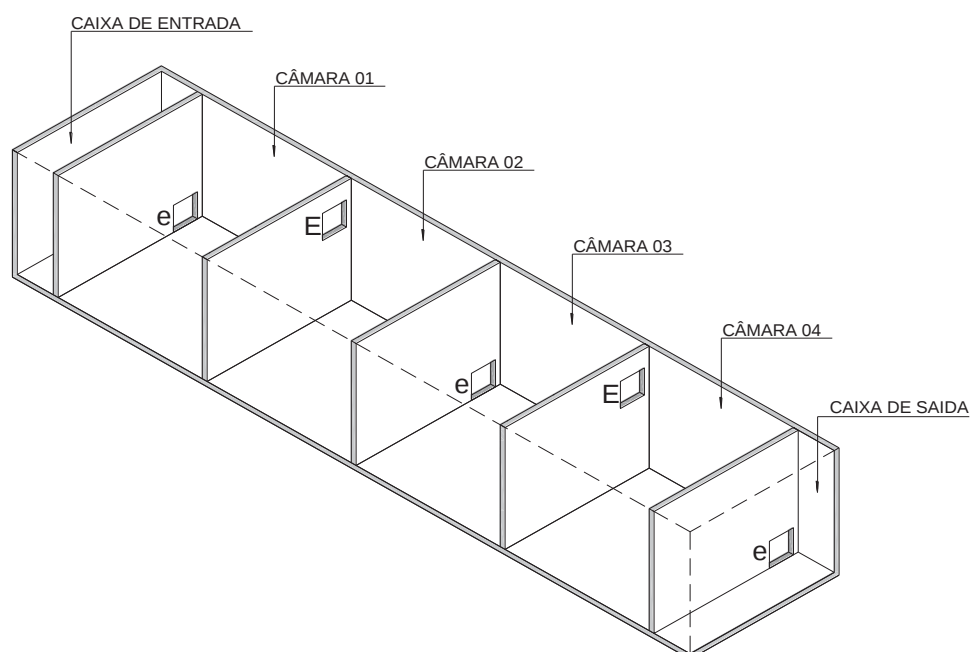
Tabela 4.1 – Nomenclatura das posições das passagens no floclador

Posição da passagem	Nomenclatura
Esquerda superior	E
Esquerda inferior	e
Direita superior	D
Direita inferior	d

Fonte: Cestari (2011)

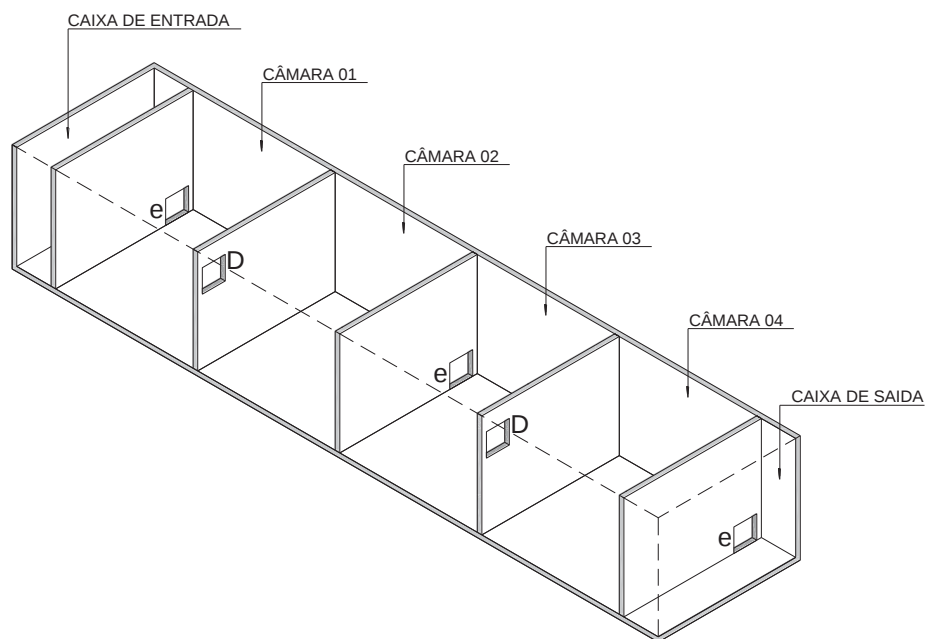
As figuras 4.7 a 4.10 mostram de forma detalhada as quatro diferentes configurações de passagem para o floclador de 04 câmaras. Os agitadores não são mostrados para facilitar o entendimento dos desenhos.

Figura 4.7 – Configuração eEeEe da unidade de floclação com quatro câmaras



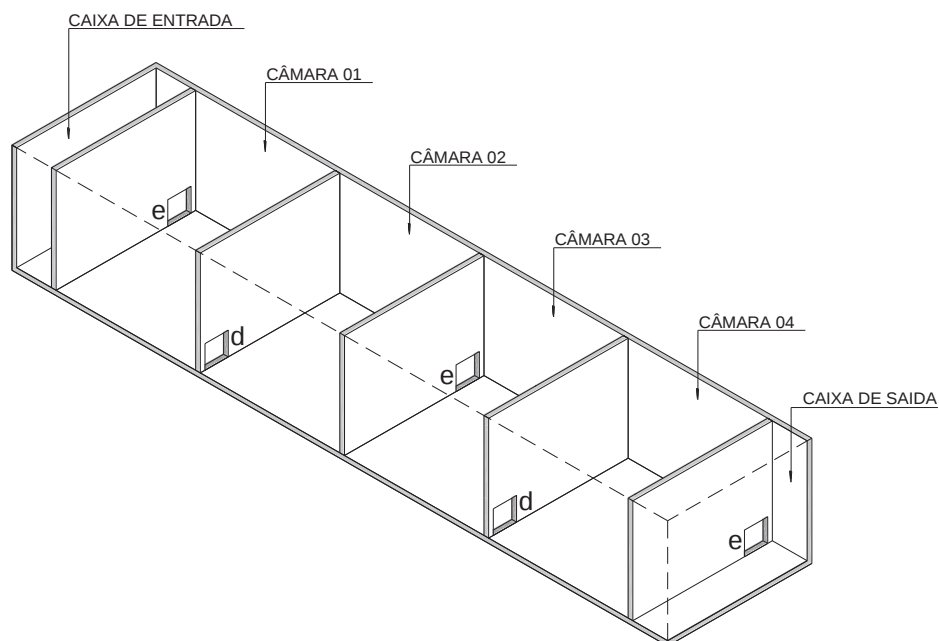
Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.8 – Configuração eDeDe da unidade de floculação com quatro câmaras



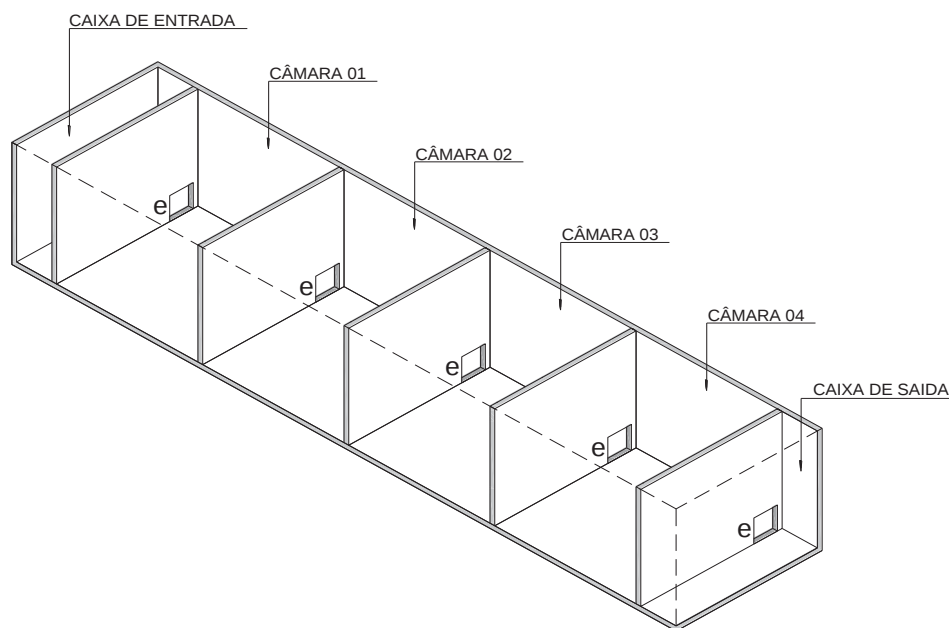
Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.9 – Configuração edede da unidade de floculação com quatro câmaras



Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.10 – Configuração eeeee da unidade de floculação com quatro câmaras



Fonte: Cestari (2011)

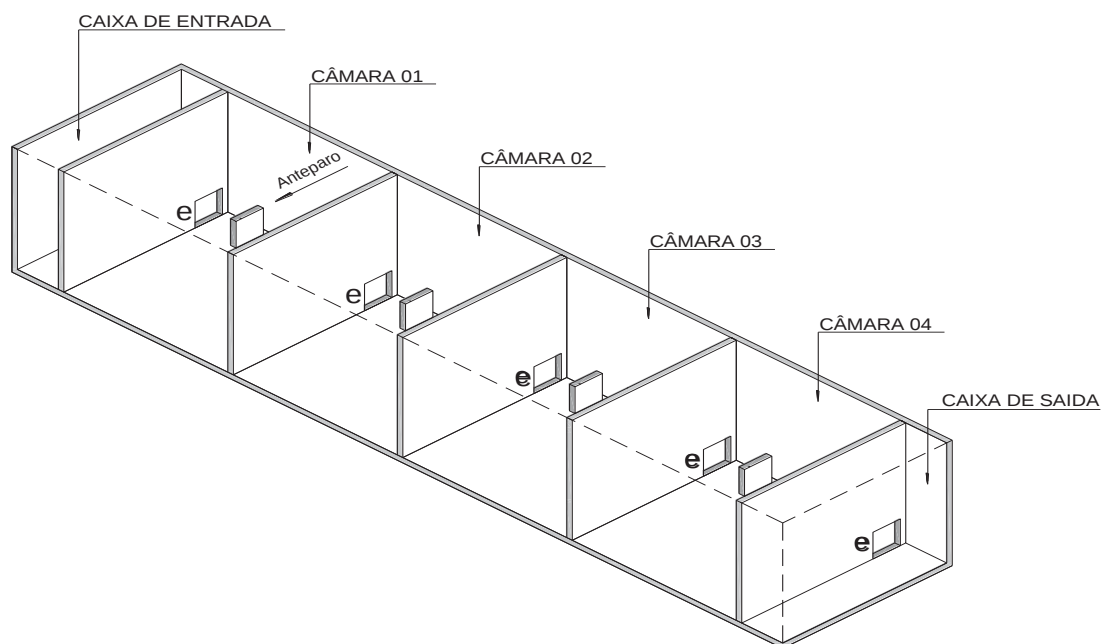
Uma quinta configuração avaliou a distribuição dos tempos de residência (DTR) empregando-se anteparos, distante a 10 cm, defronte às passagens. O objetivo do anteparo foi impelir o escoamento na direção ascendente, similar ao funcionamento dos floculadores hidráulicos do tipo Alabama. A Figura 4.11 mostra de forma detalhada a configuração estudada com uso de anteparo. Para representar o anteparo adotou-se o sinal de barra (/).

As configurações de passagem estudadas para floculadores de 04 câmaras foram também estudadas para 03 e 02 câmaras. Alterando o ponto de análise do efluente da saída da quarta câmara, para a saída da terceira e segunda câmara, foi possível realizar estudos respectivamente para floculador mecanizado de 03 e 02 câmaras. Desta forma, não houve necessidade de inserir os desenhos que representassem tais configurações. A Tabela 4.2 apresenta as nomenclaturas das configurações para os três floculadores estudados.

Tabela 4.2 – Nomenclatura das configurações adotadas para os floculadores

Número de câmaras e nomenclatura das configurações		
04 câmaras	03 câmaras	02 câmaras
eEeEe	eEeE	eEe
eDeDd	eDeD	eDe
edede	eded	Ede
eeee	eeee	eee
e/e/e/e	e/e/e/e	e/e/e

Fonte: Cestari (2011)

Figura 4.11 – Configuração e/e/e/e da unidade de floculação com quatro câmaras

Fonte: Cestari (2011)

4.4.2. Gradiente de velocidade adotado e uso dos agitadores

Para o estudo dos floculadores procurou-se avaliar o sentido de rotação do agitador para gradientes de velocidade constantes e variáveis. Para a escolha dos gradientes de velocidade variáveis levou-se em consideração a Norma 12216/92 que estabelece máximo e mínimo de 70 e 10 s⁻¹, respectivamente. Desta forma, foram definidos quatro estudos, além de um quinto com os agitadores desligados, descritos a seguir:

- Estudo 01: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf variável;
- Estudo 02: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário e horário e Gf variável;
- Estudo 03: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf constante;
- Estudo 04: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário e horário e Gf constante;
- Estudo 05: Agitadores desligados.

Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentados os parâmetros adotados para os floculadores.

Tabela 4.3 – Parâmetros adotados nos ensaios para floculador de 04 câmaras

Parâmetros		$Gf\ s^{-1}$			
Estudo	Sentido do agitador	Câmara 01	Câmara 02	Câmara 03	Câmara 04
01	Mesmo sentido	70	50	35	20
02	Sentido alternado	70	50	35	20
03	Mesmo sentido	35	35	35	35
04	Sentido alternado	35	35	35	35
05	Agitadores desligados	-	-	-	-

Fonte: Cestari (2011)

Tabela 4.4 – Parâmetros adotados nos ensaios para floculador de 03 câmaras

Parâmetros		$Gf\ s^{-1}$		
Estudo	Sentido do agitador	Câmara 01	Câmara 02	Câmara 03
01	Mesmo sentido	50	35	20
02	Sentido alternado	50	35	20
03	Mesmo sentido	35	35	35
04	Sentido alternado	35	35	35
05	Agitadores desligados	-	-	-

Fonte: Cestari (2011)

Tabela 4.5 – Parâmetros adotados nos ensaios para floculador de 02 câmaras

Parâmetros		Gf s ⁻¹	
Estudo	Sentido do agitador	Câmara 01	Câmara 02
01	Mesmo sentido	35	20
02	Sentido alternado	35	20
03	Mesmo sentido	35	35
04	Sentido alternado	35	35
05	Agitadores desligados	-	-

Fonte: Cestari (2011)

Procurou-se realizar a agitação, sempre que possível, no sentido contrário ao escoamento de entrada de água na câmara, para promover maior mistura e diminuir a probabilidade de se criar caminhos preferenciais ou curtos-circuitos.

Procurou-se avaliar a DTR para os floculadores de 04, 03 e 02 câmaras em série, aplicando os estudos de 01 a 05 (Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5) em cada configuração de passagem. Combinando os estudos com as diferentes configurações, foram realizados 25 ensaios para cada floculador, totalizando 75 ensaios.

4.4.3. Medição da vazão e tempo de residência adotado

Para a medição da vazão foram empregados proveta e cronômetro. Procedeu-se à medição da vazão volumetricamente na saída da unidade, em um período de tempo conhecido, adotando-se os valores médios. A vazão era aferida antes e após a realização de cada ensaio.

A vazão média foi mantida em 19,5 L/min para todos os ensaios, resultando três tempos de residência médios de 29.54, 22.15 e 14.77 min, respectivamente, para os floculadores de 04, 03 e 02 câmaras. Desta forma, o tempo de residência teórico (T) empregado para os floculadores, inferiores ao tempo mínimo recomendado pela NBR 12216/92 (30 min para unidades mecanizadas), não interferiu nos objetivos do trabalho, pois o presente trabalho não contemplou análises de eficiência de floculação.

4.4.4. Determinação da rotação e do gradiente de velocidade médio de floculação

Na determinação do Gf foi empregada a Equação 11, que relaciona o Gf em função da rotação do agitador.

$$y = 0,8402 * x^{0,6667} \quad (11)$$

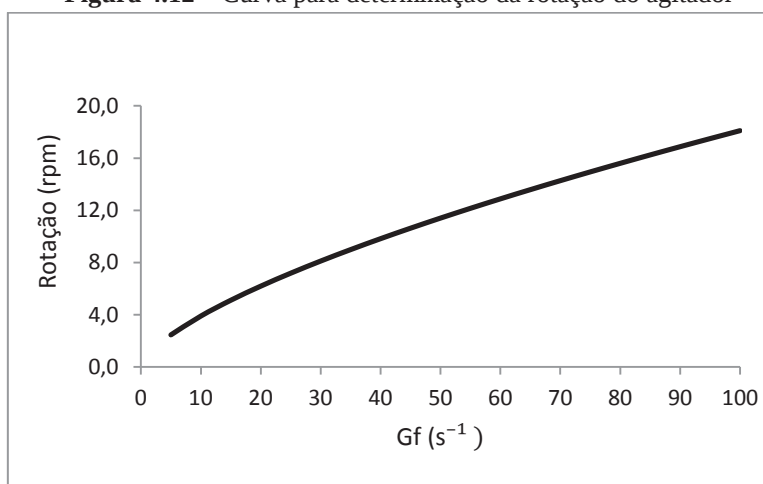
Na qual:

y = rotação do agitador (rpm);

x = gradiente de velocidade médio de floculação (s^{-1}).

Os dados da Figura 4.12 foram obtidos a partir da construção do floculador mecanizado, para facilitar a obtenção da rotação. A Figura 4.12 mostra a curva que relaciona Gf e a rotação do agitador.

Figura 4.12 – Curva para determinação da rotação do agitador



Fonte: Cestari (2011)

A mudança do sentido da rotação do agitador foi realizada invertendo-se os polos positivo e negativo na fonte de alimentação.

4.4.5. Preparo e injeção da solução de traçador

A solução de traçador, composta por 25g de cloreto de sódio (NaCl PA), 137,5 mL de etanol (álcool etílico PA) e água destilada, totalizando volume de 250mL, foi preparada no Laboratório de Saneamento da UNESP, que forneceu as vidrarias

necessárias e balança analítica para pesagem do sal. A adição do etanol se fez necessária para regulação da densidade da solução salina, reduzida até aproximar-se da densidade da água em estudo, evitando a estratificação do escoamento e acúmulo de traçador nas regiões baixas do floculador, seguindo as recomendações de Hudson Junior (1975).

O procedimento utilizado foi o mesmo para todos os ensaios, fazendo-se uso da técnica de estímulo e resposta. Procedeu-se a alimentação prévia dos floculadores, antes da injeção do traçador, até que o sistema entrasse em regime permanente.

Para injeção do volume de traçador, foi construído um dispositivo de injeção por gravidade, que injetava a solução no ponto central da passagem esquerda inferior que dá acesso à primeira câmara, sendo esta passagem adotada para todos os demais ensaios. O tempo de injeção, para que a mesma fosse considerada do tipo pulso, foi inferior a 3% do tempo teórico (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). O tempo de lançamento do traçador foi de aproximadamente 25s para todos os ensaios.

O dispositivo de lançamento de traçador era escorvado antes do seu uso para minimizar os efeitos das bolhas de ar da tubulação no escoamento. Este procedimento consistia no lançamento de água no reservatório e fechamento da válvula de modo que a água armazenada na mangueira não apresentasse bolhas. Em seguida o volume de traçador era colocado no reservatório e a válvula aberta para o lançamento. Após a abertura da válvula e o lançamento total do traçador, aproximadamente 50 mL de água destilada era lançada para evitar a perda de material no dispositivo.

4.4.6. Medição da condutividade e determinação da concentração

Imediatamente após a injeção do traçador, foram iniciadas as leituras da condutividade elétrica no efluente da unidade de floculação estudada. Desta forma, as leituras foram realizadas em intervalos de tempos regulares a cada 1 minuto. Foram realizadas as leituras de condutividade até três vezes o tempo teórico de residência (TEEFY, 1996).

As medidas da concentração do cloreto de sódio PA foram realizadas por meio de análise condutimétrica, que relaciona a condutividade total da solução com sua concentração. As análises foram realizadas por meio de célula de condutividade, não sendo necessária a coleta de amostras. Foram preparadas soluções de concentrações conhecidas, a partir das soluções-mãe e medidas as condutividades. Foi construído gráfico de concentração versus condutividade, verificando a ocorrência de faixa de

linearidade das respostas. Foram, então, obtidas as equações das retas para a calibração dos equipamentos (Anexo I). A temperatura da água afluenta a unidade de floculação foi monitorada em todos os ensaios e empregada na correção da condutividade elétrica.

4.4.7. Análise estatística dos dados experimentais

4.4.7.1. Obtenção das curvas experimentais e dos tempos de residência médios

A análise dos dados foi realizada a partir da metodologia proposta por Levenspiel (2000). As curvas experimentais de concentração (c) por tempo (t) foram normalizadas (área sob a curva igual a 1,0), obtendo-se as curvas de distribuição dos tempos de residência adimensional (E_θ) em função do tempo adimensional (θ). A Tabela 4.6 apresenta de forma resumida o procedimento para calcular as curvas normalizadas a partir dos dados experimentais.

Tabela 4.6 - Procedimento para obtenção das curvas normalizadas E_θ por θ .

Parâmetro	Definição
E_i	c_i / A
A	$\sum c_i \cdot \Delta t_i$
t_m	$\sum t_i \cdot E_i \cdot \Delta t_i$
θ	t_i / t_m
E_θ	$t_m \cdot E_i$

Em que:

c_i = concentração do traçador no tempo i

Δt_i = intervalo de tempo

E_i = distribuição de idade de saída

A = área sob a curva de concentração em função do tempo

t_m = tempo de residência médio obtido a partir das curvas experimentais

θ = tempo adimensional

E_θ = Distribuição de idade de saída adimensional.

Fonte: Cestari (2011)

As curvas obtidas experimentalmente foram comparadas com as curvas ideais, de acordo com o tipo de floculador estudado. Para representar o escoamento nos floculadores de 04, 03 e 02 câmaras em série, foram construídas curvas ideais utilizando o modelo de tanques em série empregando o número de tanques de acordo com o número de câmaras de cada floculador. Desta forma, inserindo-se o número de tanques

em função do tempo adimensional, é possível criar curvas que representem fielmente o escoamento desejado. Tal modelo foi escolhida por apresentar parâmetro único, o número de tanques em série.

A Equação 12 mostra como foram encontrado os valores da soma dos erros quadráticos (SEQ) a partir da comparação entre a curva experimental e ideal do modelo de tanques em série (AWWA, 1991).

$$SEQ = \sum (E_{\theta \text{ (curva do modelo)}} - E_{\theta \text{ (curva experimental)}})^2 \quad (12)$$

4.4.8. Método estatístico empregado na aderência da curva experimental a curva ideal e nos tempos de residência médios.

A análise estatística dos desvios das curvas experimentais em relação à curva ideal do modelo de tanques em série, utilizou a comparação entre as médias da soma dos erros quadráticos (SEQ) por meio de testes de significância da diferença entre médias. Na análise estatística dos tempos de residência médios empregou-se a comparação entre as médias.

O intervalo de confiança utilizado para rejeição das hipóteses de nulo foi de 95%. Entretanto, em amostras pequenas, o desvio padrão da amostra não é uma boa estimativa do desvio padrão da população. Por isso foi empregada a distribuição t (de Student), utilizada nos casos em que não é possível retirar grande número de amostras, para determinar o intervalo de confiança das médias amostrais. No teste de hipóteses para a diferença entre médias elas foram agrupadas duas a duas, e testadas conforme o procedimento usual do teste t para diferenças entre duas médias com números de amostras diferentes (STEEL; TORRIE, 1960).

Os testes foram realizados com todos os dados, sem a eliminação de pontos extremos (*outliers*).

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Definição dos estudos realizados em flocladores de 04, 03 e 02 câmaras em série

Por meio dos ensaios de estímulo e resposta e seguindo a metodologia proposta por Levenspiel (2000), foram obtidas as curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) experimentais úteis na avaliação do grau de desvio dos modelos de escoamento. Procurou-se comparar as curvas experimentais às curvas do modelo de tanques em série para as diferentes configurações de passagem estudadas, de acordo com a definição dos estudos para floclador de 04, 03 e 02 câmaras, definidos nos itens a seguir.

5.1.1. Floclador de 04 câmaras em série

Para o floclador de 04 câmaras definiram-se os cinco estudos, no que se refere ao sentido de rotação dos agitadores e à variação e constância do gradiente de velocidade ao longo das câmaras (quatro avaliações) e um único ensaio com os agitadores desligados. Desta forma, os cinco estudos são:

- Estudo 01: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf de 70, 50, 35 e 20 s^{-1} respectivamente para primeira, segunda, terceira e quarta câmara;
- Estudo 02: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário (primeira e terceira câmaras) e horário (segunda e quarta câmaras) e Gf de 70, 50, 35 e 20 s^{-1} respectivamente para primeira, segunda, terceira e quarta câmara.
- Estudo 03: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf constante de 35 s^{-1} para todas as câmaras.
- Estudo 04: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário (primeira e terceira câmara) e horário (segunda e quarta câmara) e Gf constante de 35 s^{-1} para todas as câmaras.
- Estudo 05: Agitadores desligados.

5.1.2. Floculador de 03 câmaras em série

Da mesma forma, para o floculador de 03 câmaras definiram-se os seguintes estudos:

- Estudo 01: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf de 50, 35 e 20 s^{-1} , respectivamente para primeira, segunda e terceira câmaras;
- Estudo 02: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário (primeira e terceira câmaras) e horário (segunda câmaras) e Gf de 50, 35 e 20 s^{-1} respectivamente para primeira, segunda e terceira câmaras.
- Estudo 03: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf constante de 35 s^{-1} para todas as câmaras.
- Estudo 04: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário (primeira e terceira câmaras) e horário (segunda câmaras) e Gf constante de 35 s^{-1} para todas as câmaras.
- Estudo 05: Agitadores desligados.

5.1.3. Floculador de 02 câmaras em série

Por fim, nas mesmas condições, para o floculador de 02 câmaras definiram-se os seguintes estudos:

- Estudo 01: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf de 35 e 20 s^{-1} respectivamente para primeira e segunda câmaras;
- Estudo 02: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário (primeira câmara) e horário (segunda câmara) e Gf de 35 e 20 s^{-1} respectivamente para primeira e segunda câmaras.
- Estudo 03: Agitadores operando no mesmo sentido de rotação, ou seja, todos no sentido anti-horário e Gf constante de 35 s^{-1} para todas as câmaras.

- Estudo 04: Agitadores operando em sentidos alternados de rotação, ou seja, anti-horário (primeira câmara) e horário (segunda câmara) e G_f constante de 35 s^{-1} para todas as câmaras.
- Estudo 05: Agitadores desligados.

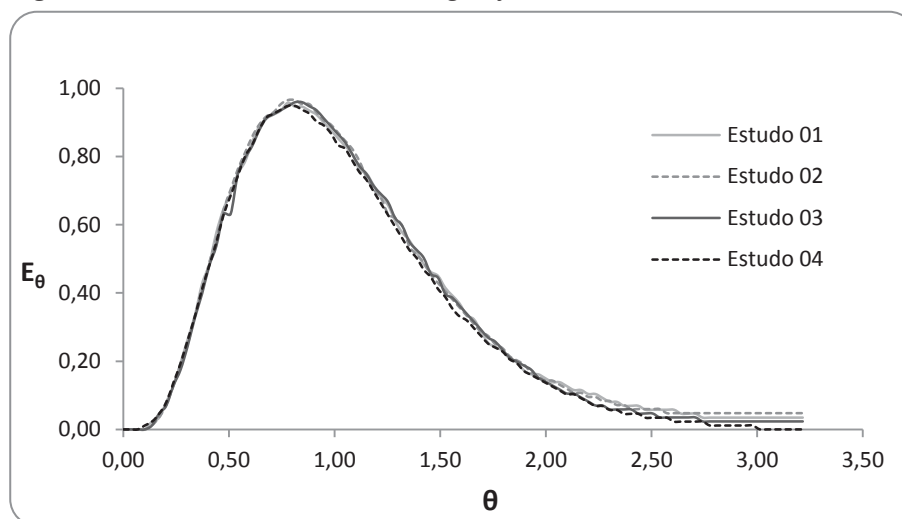
5.2. Influência do sentido do agitador e do gradiente de velocidade sobre as diferentes configurações de passagem

Nas curvas de distribuição dos tempos de residência (DTR) apresentadas a seguir, tem-se no eixo das ordenadas o parâmetro E_θ que representa a distribuição de idade de saída adimensional e no eixo das abscissas o parâmetro θ que representa o tempo adimensional.

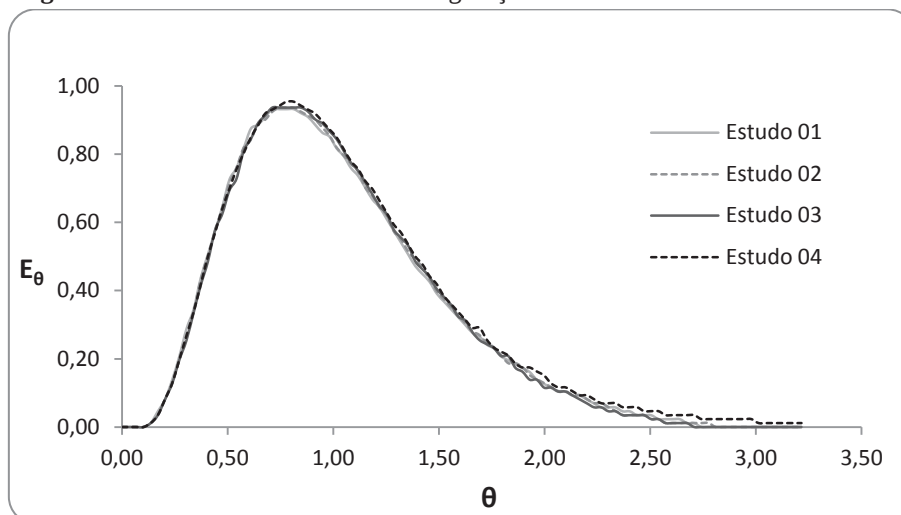
5.2.1. Floculador de 04 câmaras em série

Nas Figuras 5.1 a 5.5 são apresentadas as curvas das DTR para as configurações **eEeEe**, **eDeDe**, **edede**, **eeeee** e **e/e/e/e**, nas quais foram realizados os estudos 01, 02, 03 e 04.

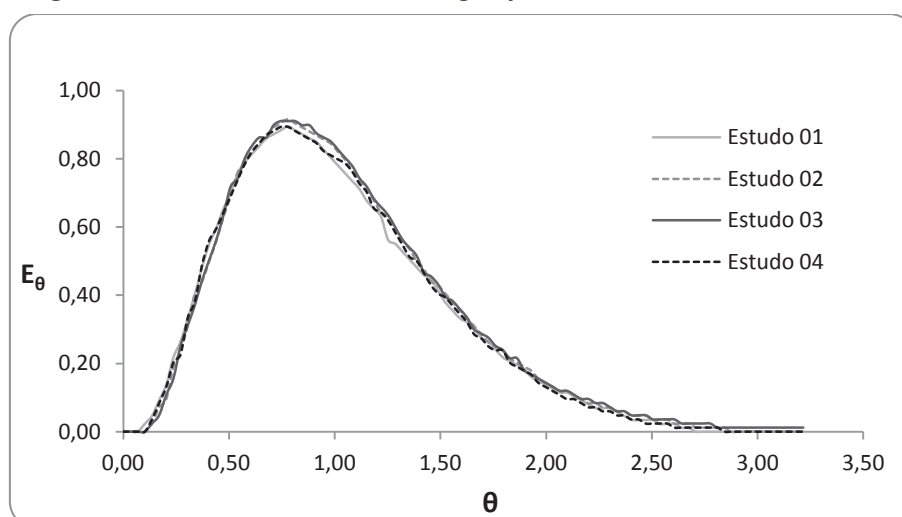
Figura 5.1 – Estudos realizados na configuração eEeEe – Floculador de 04 câmaras



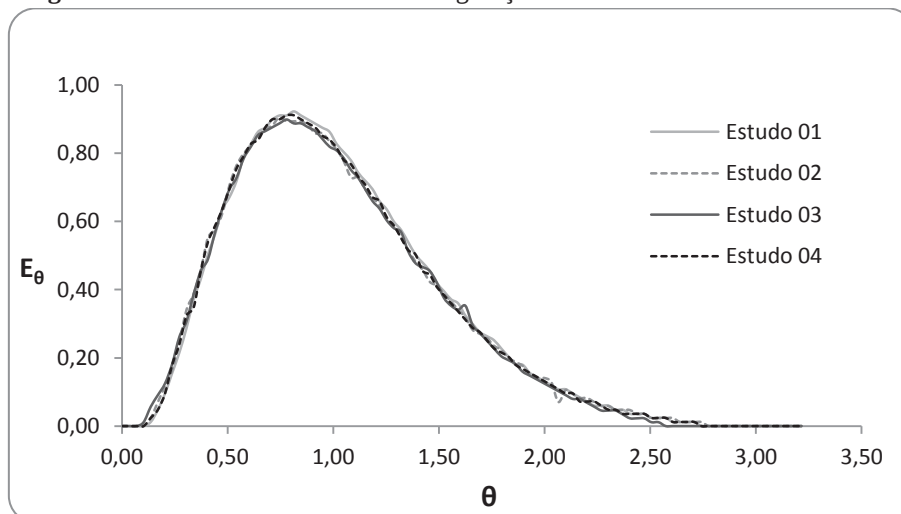
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.2 - Estudos realizados na configuração eDeDe – Floculador de 04 câmaras

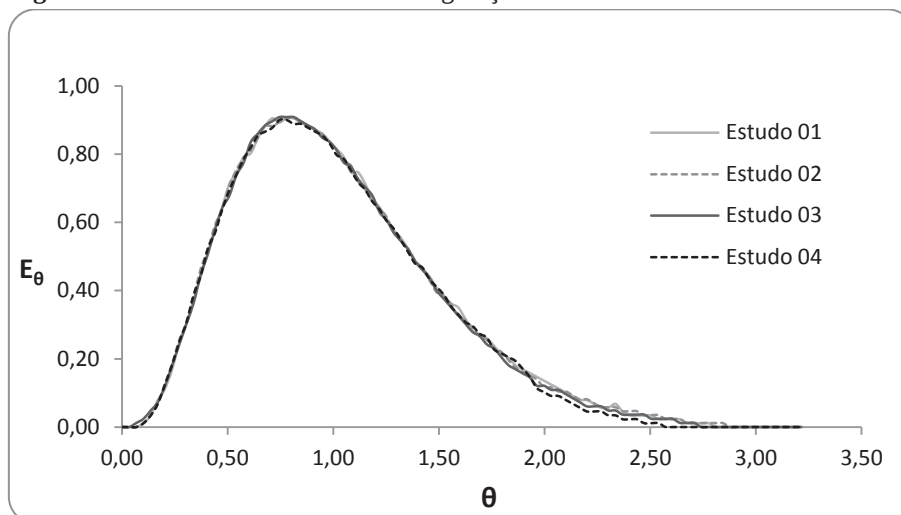
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.3 - Estudos realizados na configuração edede – Floculador de 04 câmaras

Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.4 - Estudos realizados na configuração eeeee – Floculador de 04 câmaras

Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.5 - Estudos realizados na configuração e/e/e/e – Floculador de 04 câmaras

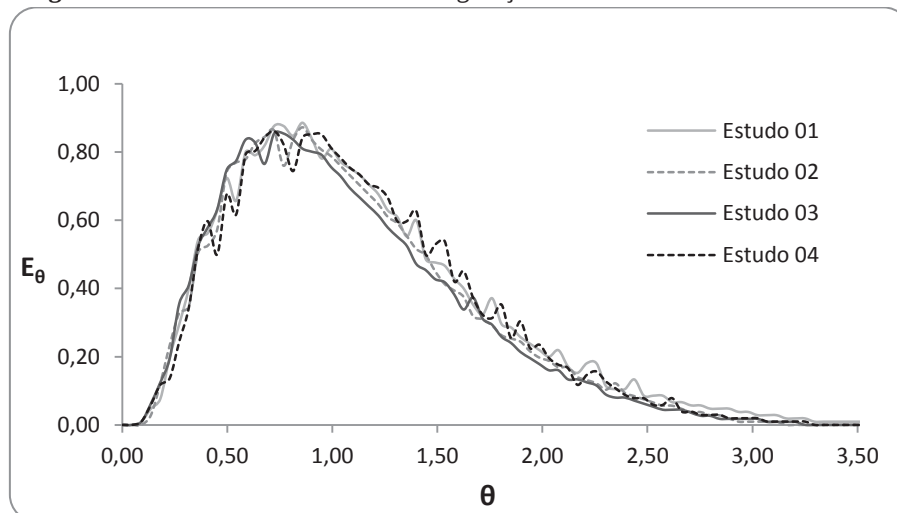
Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar as Figuras de 5.1 a 5.5 para floculador de 04 câmaras em série percebe-se visualmente que as curvas da DTR para os estudos 01, 02, 03 e 04 praticamente se sobrepõem para todas as configurações estudadas, indicando que o sentido do agitador e a influência do gradiente de velocidade médio de floculação constante ou variável são insignificantes sobre as diferentes configurações de passagem. Esta constatação evidencia a pouca eficácia da usual alternância do sentido de rotação dos agitadores, ao longo das câmaras de floculação, usualmente empregada em escala real, quando empregado floculadores mecanizados dotados de agitadores com paletas giratórias paralelas ao eixo vertical e levando em consideração que o efeito de ruptura dos flocos não foi avaliado.

5.2.2. Floculador de 03 câmaras em série

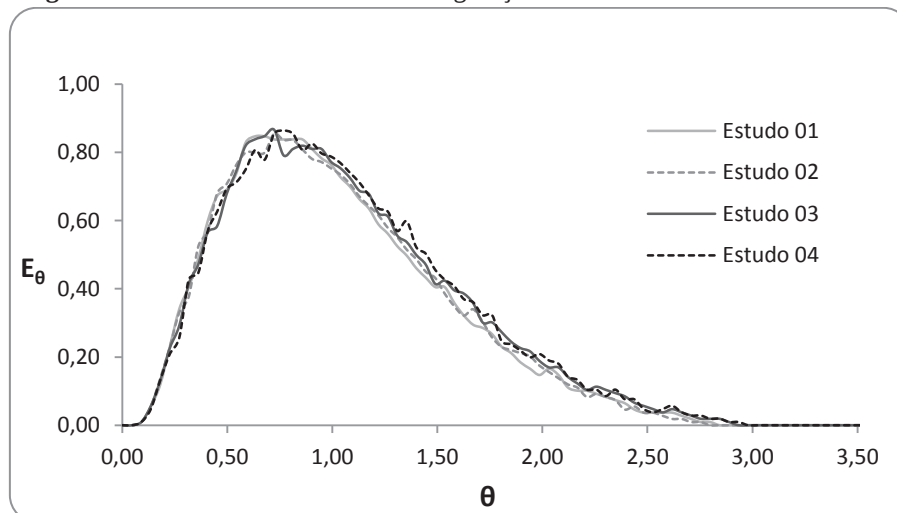
Nas Figuras 5.6 a 5.10 são apresentadas as curvas das DTR para as configurações **eEeE**, **eDeD**, **eded**, **eeee** e **e/e/e/e**, nas quais foram realizados os estudos 01, 02, 03 e 04.

Figura 5.6 - Estudos realizados na configuração **eEeE** – Floculador de 03 câmaras



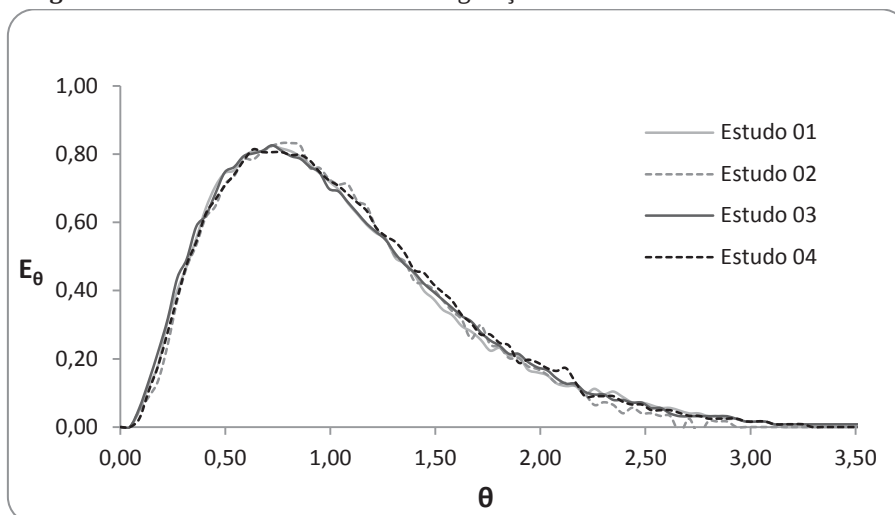
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.7 - Estudos realizados na configuração **eDeD** – Floculador de 03 câmaras



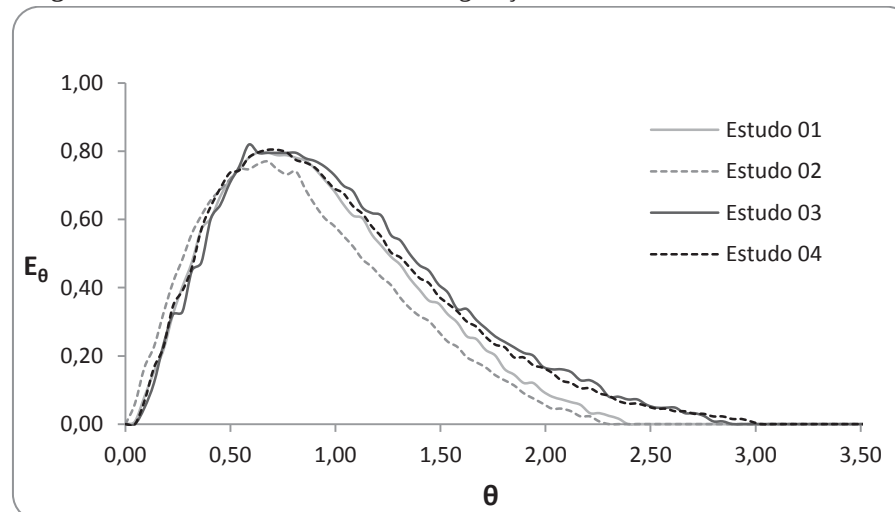
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.8 - Estudos realizados na configuração eded – Floculador de 03 câmaras



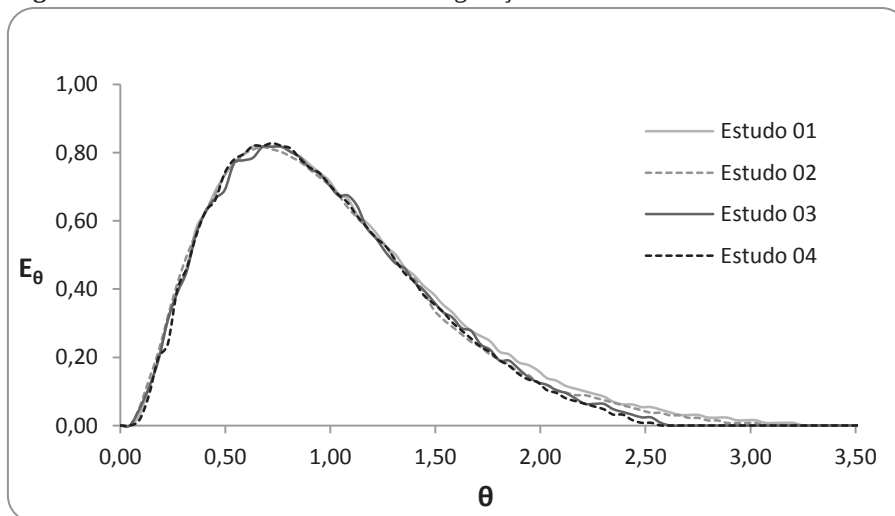
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.9 - Estudos realizados na configuração eeee – Floculador de 03 câmaras



Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.10 - Estudos realizados na configuração e/e/e/e – Floculador de 03 câmaras



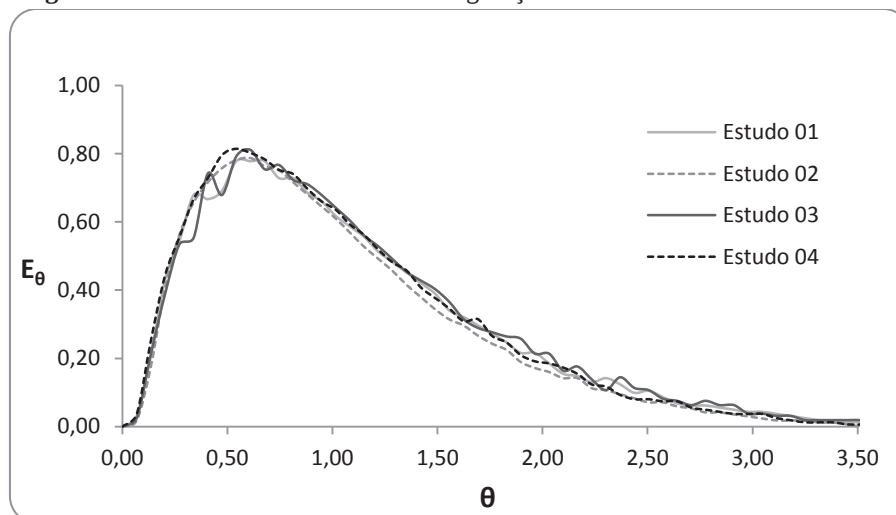
Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar as Figuras de 5.6 a 5.10 para flocculador de 03 câmaras percebe-se visualmente que as curvas da DTR para os estudos 01, 02, 03 e 04 se sobrepõem somente para as configurações **eded** e **e/e/e/e** sendo mais evidente para esta última configuração, indicando que o sentido de rotação do agitador e a influência do gradiente de velocidade médio de flocculação constante ou variável apresentam-se menos relevantes para estas configurações. Para as demais configurações, o sentido do agitador e a influência do G_f são mais relevantes.

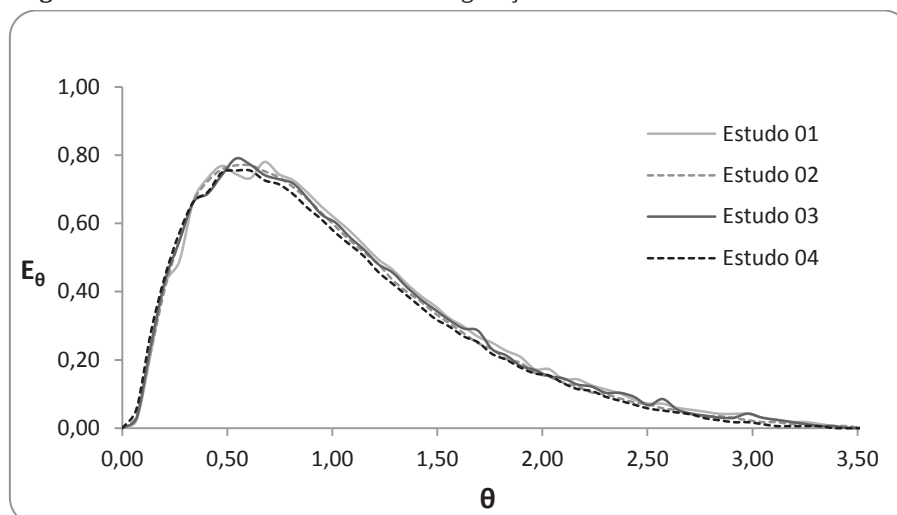
5.2.3. Flocculador de 02 câmaras em série

Nas Figuras 5.11 a 5.15 são apresentadas as curvas das DTR para as configurações **eEe**, **eDe**, **ede**, **eee** e **e/e/e**, nas quais foram realizados os estudos 01, 02, 03 e 04.

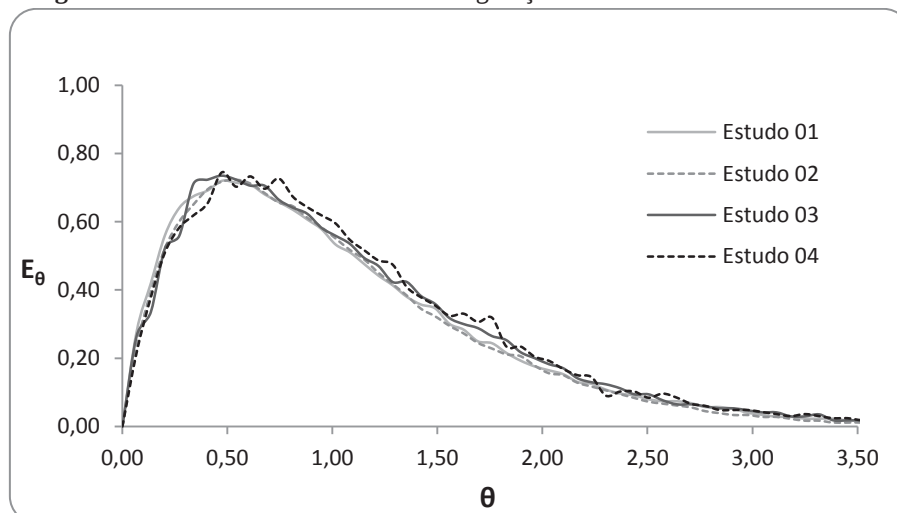
Figura 5.11 - Estudos realizados na configuração eEe – Flocculador de 02 câmaras



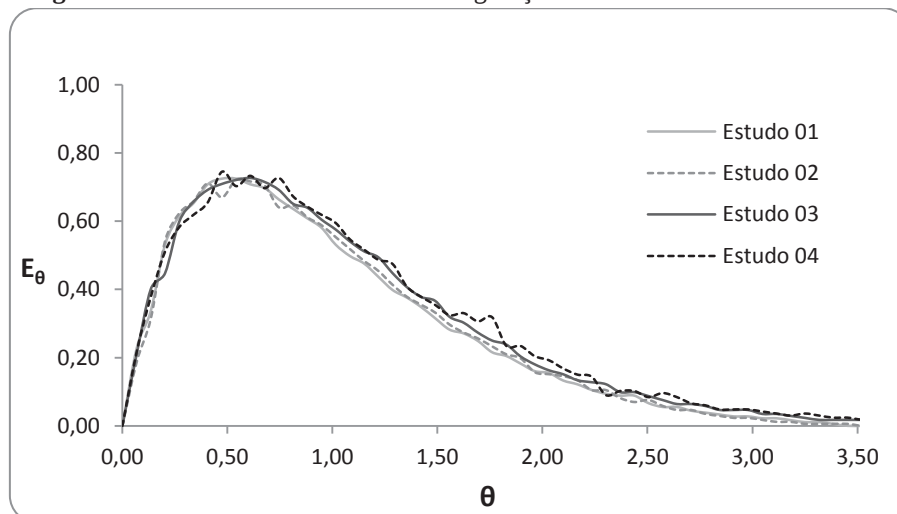
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.12 - Estudos realizados na configuração eDe – Floculador de 02 câmaras

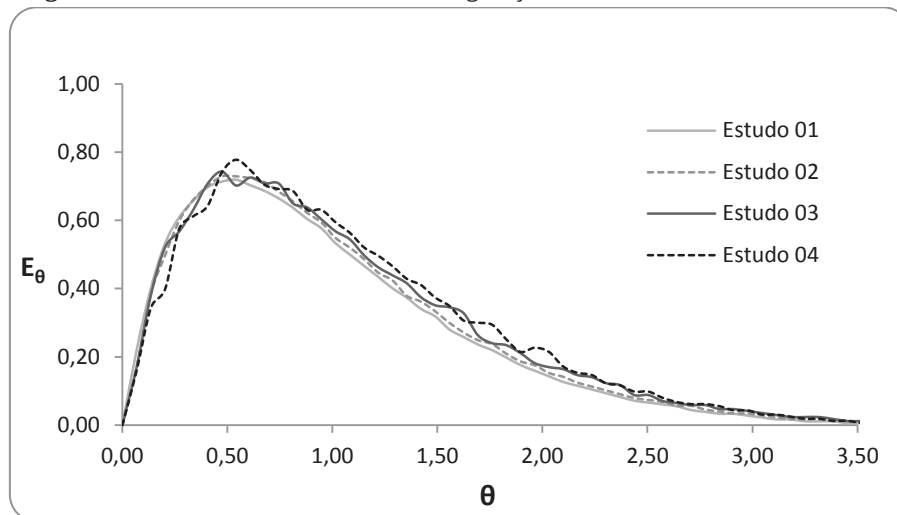
Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.13 - Estudos realizados na configuração ede – Floculador de 02 câmaras

Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.14 - Estudos realizados na configuração eee – Floculador de 02 câmaras

Fonte: Cestari (2011)

Figura 5.15 - Estudos realizados na configuração e/e/e – Floculador de 02 câmaras

Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar as Figuras de 5.11 a 5.15 para floculador de 02 câmaras percebe-se visualmente que as curvas da DTR para os estudos 01, 02, 03 e 04 se sobrepõem, com pequenas diferenças, somente para a configuração **eDe**, indicando que o sentido do agitador e a influência do gradiente de velocidade médio de floculação constante ou variável é menos relevante para esta configuração. Para as demais configurações, o sentido do agitador e a influência do Gf são mais relevantes.

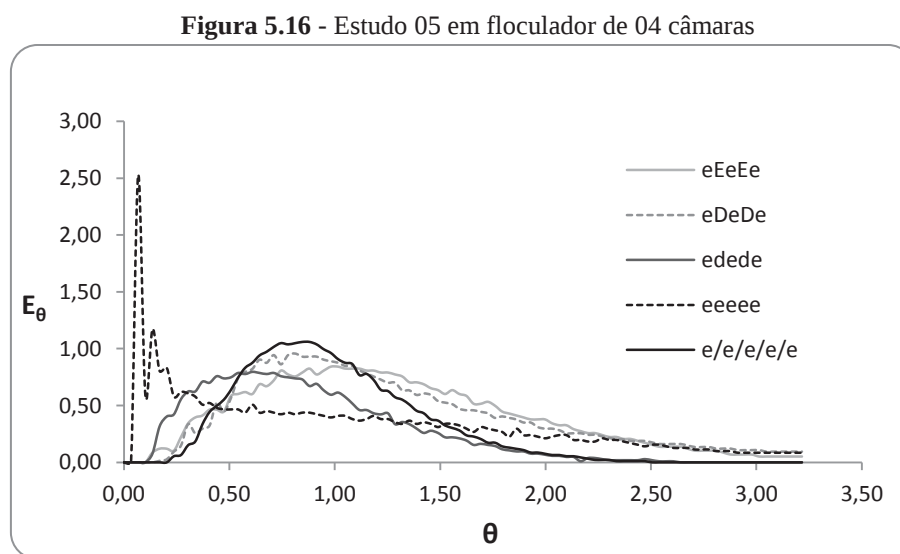
Ao analisar de forma geral as curvas das DTR para floculador de 04, 03 e 02 câmaras, geradas a partir dos estudos supracitados, para as diferentes configurações de passagem, conclui-se que o sentido do agitador e a influência do Gf tornam-se mais relevantes ao passo que o número de câmaras diminui.

Em todos os ensaios a porcentagem de traçador recuperado ficou entre 85% e 95% indicando taxas de recuperação entre bom e ótimo, o que assegura a validade dos resultados dos ensaios segundo Teefy (1996).

5.3. Influência das configurações de passagem na ausência da agitação

5.3.1. Floculador de 04 câmaras em série

Na Figura 5.16 são apresentadas as curvas das DTR para as configurações **eEeEe**, **eDeDe**, **edede**, **eeee** e **e/e/e/e/e**, nas quais foi realizado o estudo 5 (agitadores desligados).



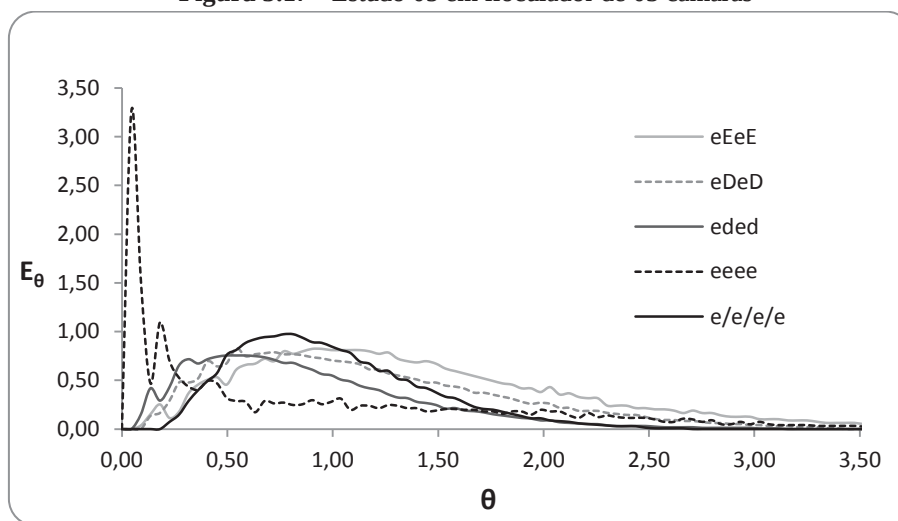
Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar a Figura 5.16 observa-se que, na ausência da mistura promovida pelo agitador, a configuração das passagens torna-se relevante, dada a discrepância entre as curvas para o mesmo estudo. Ao avaliar a curva da configuração **e/e/e/e/e** conclui-se que foi a configuração que promoveu a maior mistura, confirmando a afirmação de Libânio (1995), que a simples colocação de anteparo na frente da passagem aumentaria a eficiência da mistura, reduzindo os níveis de curtos-circuitos. Nota-se na curva da configuração **eeee** a antecipação do pico da curva em relação às demais curvas, indicando problemas de curtos-circuitos.

5.3.2. Floculador de 03 câmaras em série

Na Figura 5.17 são apresentadas as curvas das DTR para as configurações **eEeE**, **eDeD**, **eded**, **eeee** e **e/e/e/e**, nas quais foi realizado o estudo 05.

Figura 5.17 - Estudo 05 em floculador de 03 câmaras



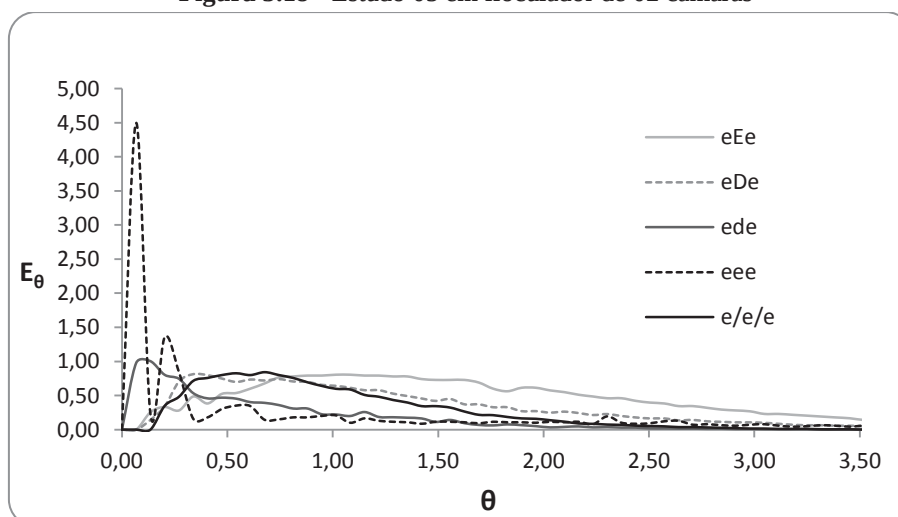
Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar a Figura 5.17 notam-se as mesmas observações feitas em relação ao floculador de 04 câmaras.

5.3.3. Floculador de 02 câmaras em série

Na Figura 5.18 são apresentadas as curvas das DTR para as configurações **EEE**, **eDe**, **ede**, **eee** e **e/e/e** nas quais foi realizado o estudo 05.

Figura 5.18 - Estudo 05 em floculador de 02 câmaras



Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar a Figura 5.18 notam-se as mesmas observações feitas em relação ao floculador de 04 e 03 câmaras.

5.4. Análise da aderência dos resultados experimentais ao modelo de tanques em série.

5.4.1. Floculador de 04 câmaras em série

Na Tabela 5.1 é apresentada a soma dos erros quadráticos (SEQ) das curvas experimentais do floculador de 04 câmaras em relação à curva do modelo de tanques em série com 04 tanques, de acordo com o estudo realizado em cada configuração, com tempo de residência teórico de 29,54 min.

Tabela 5.1 - Soma dos erros quadráticos para floculador de 04 câmaras

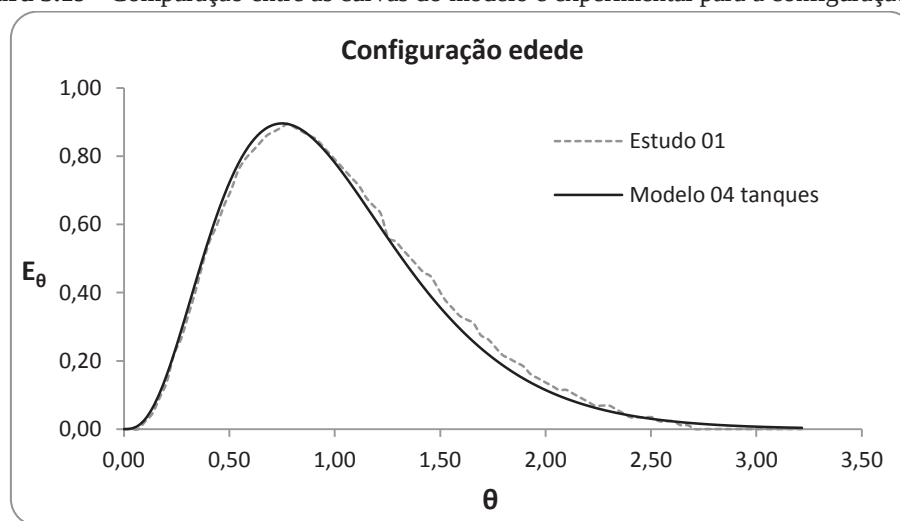
Parâmetros	Configuração de passagem				
Estudo	eEeEe	eDeDe	edede	eeeee	e/e/e/e/e
01	0,28828	0,10861	0,05121	0,15745	0,09052
02	0,32127	0,13526	0,13117	0,07722	0,06929
03	0,32114	0,16760	0,15047	0,08509	0,07329
04	0,19297	0,20261	0,07425	0,09352	0,07881

Fonte: Cestari (2011)

Analisando a Tabela 5.1 e considerando a SEQ dos estudos de 01 a 04 sobre as configurações de passagem, verifica-se que a menor SEQ está para a configuração **edede** para o estudo 01. Comparando a SEQ das configurações **eeeee** e **e/e/e/e/e**, conclui-se que a colocação do anteparo resultou, em todos os estudos, menores SEQ, indicando melhor aderência das curvas.

Ao analisar os valores da SEQ pode-se concluir que quanto menor este valor, maior a aderência da curva experimental à curva do modelo. Nota-se na Figura 5.19 para a configuração **edede** que o estudo 01 apresentou melhor aderência da curva experimental à curva do modelo.

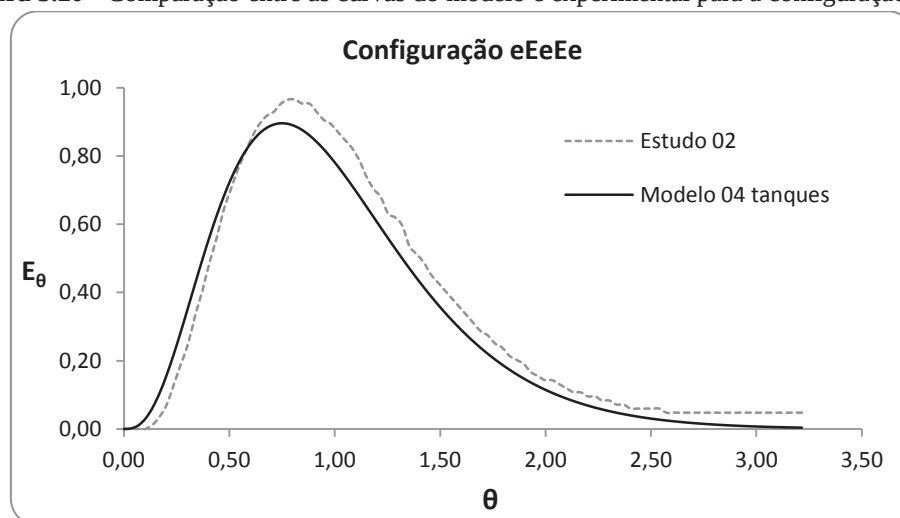
Figura 5.19 - Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração edede



Fonte: Cestari (2011)

Da mesma forma, ao analisar os valores da SEQ conclui-se que quanto maior este valor, maior o afastamento da curva experimental a curva do modelo. Observa-se na Figura 5.20 para a configuração eEeEe que o estudo 02 apresentou menor aderência da curva experimental à curva do modelo.

Figura 5.20 - Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração eEeEe



Fonte: Cestari (2011)

5.4.2. Floculador de 03 câmaras em série

Similarmente, na Tabela 5.2 é apresentada a SEQ das curvas experimentais do floculador de 03 câmaras em relação à curva do modelo de tanques em série com 03 tanques, de acordo com o estudo realizado em cada configuração, com tempo de residência teórico de 22,15 min.

Tabela 5.2 - Soma dos erros quadráticos para floculador de 03 câmaras

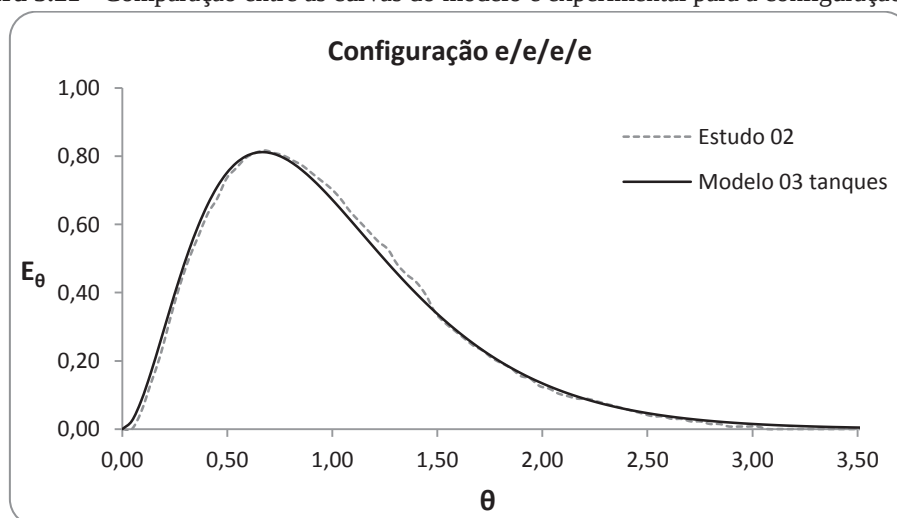
Parâmetros	Configuração de passagem				
	Estudo	eEeE	eDeD	eded	eeee
	01	0,66519	0,22391	0,06708	0,05991
	02	0,46300	0,24974	0,14758	0,27080
	03	0,28853	0,38423	0,07422	0,15258
	04	0,83440	0,47542	0,15120	0,03522

Fonte: Cestari (2011)

Analisando a Tabela 5.2 e considerando SEQ dos estudos de 01 a 04 sobre as configurações de passagem, verifica-se que a menor SEQ está para a configuração **e/e/e/e** para o estudo 02. Comparando a SEQ das configurações **eeee** e **e/e/e/e**, conclui-se que a colocação do anteparo resultou, na maior parte dos estudos, menores SEQ, indicando melhor aderência das curvas.

Verifica-se na Figura 5.21 para a configuração **e/e/e/e** que o estudo 02 apresentou melhor aderência da curva experimental à curva do modelo.

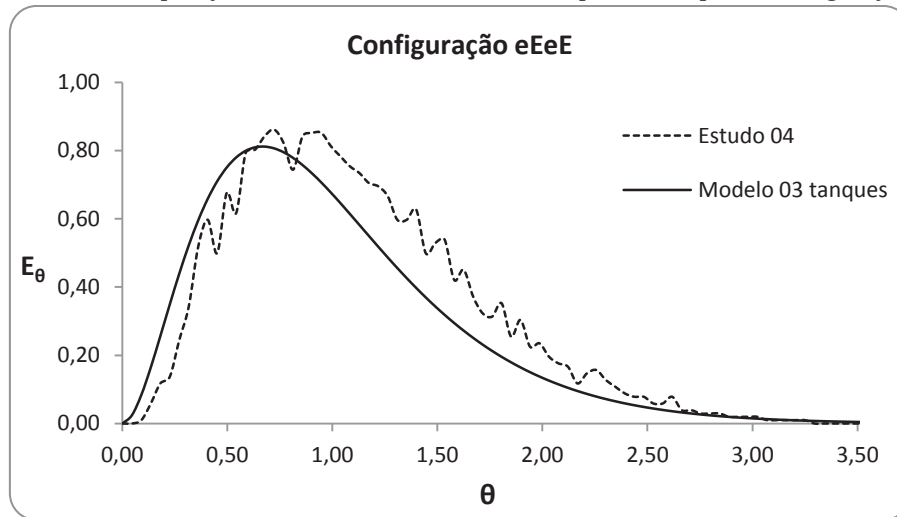
Figura 5.21 - Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração e/e/e/e



Fonte: Cestari (2011)

Nota-se na Figura 5.22 para a configuração **eEeE** que o estudo 04 apresentou menor aderência da curva experimental à curva do modelo.

Figura 5.22 - Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração eEeE



Fonte: Cestari (2011)

5.4.3. Floculador de 02 câmaras em série

Por fim, na Tabela 5.3 é apresentada a SEQ das curvas experimentais do floculador de 02 câmaras em relação à curva do modelo de tanques em série com 02 tanques, de acordo com o estudo realizado em cada configuração, com tempo de residência teórico de 14,77 min.

Tabela 5.3 - Soma dos erros quadráticos para floculador de 02 câmaras

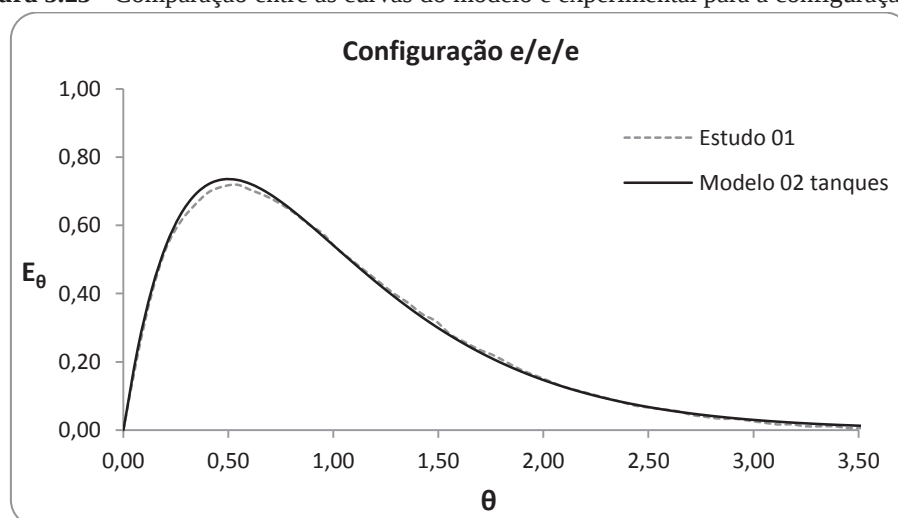
Parâmetros	Configuração de passagem				
Estudo	eEe	eDe	ede	eee	e/e/e
01	0, 24859	0, 20586	0, 01870	0, 01239	0, 00556
02	0, 20297	0, 14679	0, 01471	0, 03003	0, 02043
03	0, 33266	0, 15552	0, 05959	0, 05711	0, 05907
04	0, 23881	0, 08780	0, 09895	0, 09895	0, 14198

Fonte: Cestari (2011)

Analisando a Tabela 5.3 e considerando SEQ dos estudos de 01 a 04 sobre as configurações de passagem, verifica-se que a menor SEQ está para a configuração **e/e/e** para o estudo 01. Comparando a SEQ das configurações **eee** e **e/e/e**, conclui-se que a colocação do anteparo resultou, menores SEQ apenas nos estudos 01 e 02.

Observa-se na Figura 5.23 para a configuração **e/e/e** que o estudo 01 apresentou melhor aderência da curva experimental à curva do modelo.

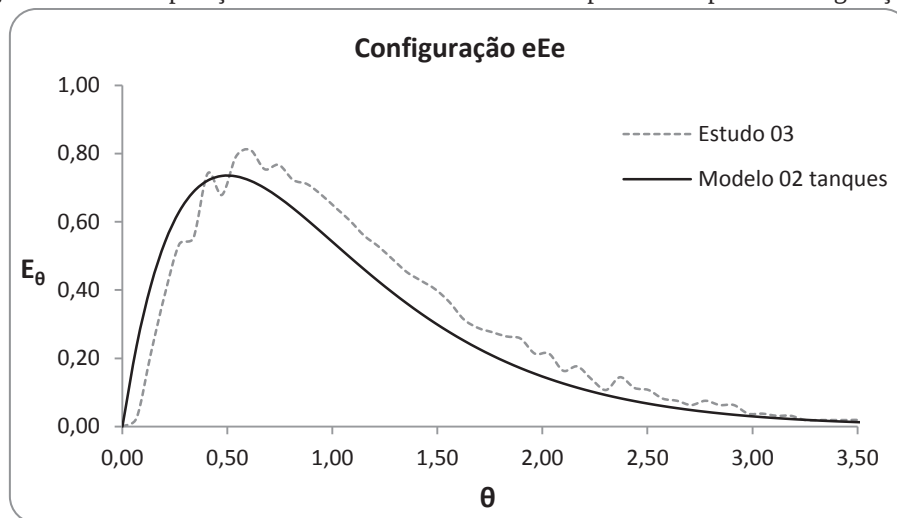
Figura 5.23 - Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração e/e/e



Fonte: Cestari (2011)

Verifica-se na Figura 5.24 para a configuração **eEe** que o estudo 03 apresentou menor aderência da curva experimental à curva do modelo.

Figura 5.24 - Comparação entre as curvas do modelo e experimental para a configuração eEe



Fonte: Cestari (2011)

Conclui-se que em todas as avaliações de aderência das curvas experimentais as curvas dos modelos, as configurações **eEeEe**, **eEeE** e **eEe** apresentaram sempre os piores ajustes.

Pode-se concluir também que ao analisar a aderência das curvas para floculador de 04, 03 e 02 câmaras que a importância do anteparo torna-se mais relevante à medida que o número de câmaras aumenta. Desta forma, abre-se a perspectiva de na ampliação das estações a construção de novos floculadores possa ser relegada a segundo plano caso a alteração do tipo das aberturas reduza o curto-circuito.

5.4.4. Análise estatística da SEQ

Na Tabela 5.4 é apresentada uma estatística descritiva das SEQ, com a média, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) das configurações de passagem avaliadas para 04, 03 e 02 câmaras de floculação.

Tabela 5.4 - Estatística descritiva das SEQ das configurações de passagem

Parâmetro	Configuração*				
	A	B	C	D	E
Média	0, 85	0, 55	0, 44	1, 06	0, 36
DP	0, 57	0, 27	0, 39	1, 61	0, 24
CV	0, 67	0, 50	0, 87	1, 52	0, 67
*Configuração A – Representa as configurações eEeEe, eEeE e eEe.					
*Configuração B – Representa as configurações eDeDe, eDeD e eDe.					
*Configuração C – Representa as configurações edede, eded e ede.					
*Configuração D – Representa as configurações eeeee, eeee e eee.					
*Configuração E – Representa as configurações e/e/e/e/e, e/e/e/e e e/e/e					

Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar os resultados das médias, desvio padrão e coeficientes de variação, nota-se que houve diferenças entre os dados, porém de difícil conclusão em vista dos altos valores do coeficiente de variação. Desta forma, o teste de hipótese foi realizado para verificar se há diferenças significativas entre as médias das SEQ.

A Tabela 5.5 apresenta o teste de igualdade entre as médias empregando a raiz quadrada da SEQ, com o objetivo de minimizar os erros.

No teste de significância apresentado na Tabela 5.5 foi considerada a raiz quadrada das SEQ, com o intuito de minimizar os erros. Nesta tabela são considerados todos os estudos incluindo o estudo 05 (Agitadores desligados).

Por meio dos resultados do teste t, é possível avaliar se há diferenças significativas entre as médias das configurações comparadas. Os valores do teste t são apresentados resumidamente. No termo rejeita H_0 as letras **S** e **N** significam respectivamente, **sim** rejeita H_0 , ou seja, rejeita a hipótese de que as médias são iguais (há diferença significativa entre as médias) e **não** rejeita H_0 , ou seja, não rejeita a hipótese de que as médias são iguais (não há diferença significativa entre as médias).

A comparação 1 mostra que não há diferenças significativas entre as médias das configurações analisadas (**eEeEe** e **eDeDe**), embora a SEQ médio da configuração **eDeDe** (0,55) seja bem menor que da configuração **eEeEe** (0,85) indicando um melhor ajuste ao modelo de tanques em série. A diferença entre as médias não foi significativa com 95% de confiança, provavelmente devido aos altos valores dos desvios padrão. Na prática, ainda que a configuração **eDeDe** (0,55) tenha se ajustado melhor ao modelo de tanques em série que a configuração **eEeEe** (0,85), o teste indica que esta diferença pode ser devido ao acaso, ou seja, a repetição dos ensaios provavelmente não levaria aos mesmos resultados.

A comparação 2 mostra que há diferenças significativas entre as médias das configurações analisadas (**eEeEe** e **edede**). Desta forma, analisando-se a SEQ médio, conclui-se que a configuração **edede** (0,45) ajustou-se melhor ao modelo teórico de tanques em série que a configuração **eEeEe** (0,85), sendo a diferença entre as médias significativas com 95% de confiança no teste t.

Conclui-se a partir da análise da Tabela 5.5 que as únicas afirmações que podem ser feitas é que a configuração **edede** (0,55) e **e/e/e/e** (0,37) ajustaram-se melhor que a configuração **eEeEe** (0,85) ao modelo de tanques em série. Tal assertiva indica que nos flocladores de 04, 03 e 02 câmaras que operam com estas configurações de passagem, a formação de zonas mortas e consequentemente a ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos, são menores.

5.5. Avaliação do tempo de residência médio

5.5.1. Floculador de 04 câmaras em série

Na avaliação da eficiência hidráulica empregou-se o tempo de residência médio adimensional, ou seja, o tempo de residência médio (t_m) dividido pelo tempo de residência teórico (T), que é um bom parâmetro para avaliar os níveis de zonas mortas. Segundo Rebhun e Argaman (1965), quando a relação t_m/T é menor que um indica a presença de zonas mortas, conseqüentemente ocorrendo curtos-circuitos hidráulicos. Para Levenspiel (2000) quando o t_m é maior que T, ou seja, a relação t_m/T é maior que um, há três explicações possíveis para isso: ou há erro na medição da vazão, ou há erro no volume disponível do reator, ou o traçador não é um material inerte como deveria ser.

Na tabela 5.6 apresentam-se os tempos de residência médios adimensionais determinados para as cinco configurações de aberturas ensaiadas para unidade de floculação com quatro câmaras.

Tabela 5.6 - Tempo de residência médio adimensional para floculador de 04 câmaras

Parâmetros	Configuração de passagem				
Estudo	eEeEe	eDeDe	edede	eeeee	e/e/e/e/e
01	1,09	1,02	1,02	1,03	1,03
02	1,09	1,02	1,04	1,02	1,02
03	1,07	1,02	1,05	1,01	1,01
04	1,04	1,06	1,00	1,02	1,00

Fonte: Cestari (2011)

Verifica-se na Tabela 5.6 que a maioria dos valores do tempo de residência médio adimensionais é maior que um, ou seja, acima do valor máximo esperado para os ensaios, indicando erros experimentais. Tais erros podem estar relacionados a quatro possibilidades:

1. A diferença de densidade entre a solução de traçador e água da rede;
2. A vazão;
3. Ao ponto amostral único;
4. A variação de temperatura da água da rede ao longo do dia.

Quanto à diferença de densidade entre a solução de traçador e a água da rede, pode ter sido influenciada pela menor temperatura da solução, uma vez que as soluções eram preparadas pela manhã, antes do início dos ensaios. Além disso, o monitoramento da temperatura da solução não foi realizado antes do início do ensaio.

Quanto à vazão, esta foi monitorada antes e depois de cada ensaio. Ao fazer à análise de sensibilidade verificando a vazão máxima e mínima, a variação típica é da ordem de 3% na vazão. Desta forma, adotou-se a vazão média para o tempo de residência teórico – T.

Em relação ao ponto amostral único e no centro da passagem, a sonda poderia não ter registrado toda a massa de traçador deixando a unidade. Desta forma, a leitura da concentração medida na sonda pode ter sido menor que a concentração média na saída, influenciando diretamente no tempo de residência médio.

Outro problema a ser mencionado é a variação da temperatura da água da rede ao longo do dia, que pode influenciar na medição da sonda. Este problema foi descartado uma vez que a temperatura foi monitorada durante os ensaios. Além disso, os ensaios eram realizados em curto espaço de tempo, com duração máxima de 2 horas.

Supondo que os erros afetaram de forma similar todas as leituras, poderia ser defendido o emprego dos valores obtidos para comparar o desempenho das configurações, uma vez que todos os valores estariam sujeitos a um erro sistemático aproximadamente igual. Entretanto, não há como comprovar, com os dados levantados, a afirmação de que o erro sistemático seria aproximadamente igual em todos os ensaios.

Ao analisar a Tabela 5.6 os melhores tempos de residência médios adimensionais estão para o estudo 04 para as configurações **edede** e **e/e/e/e/e**. Embora o estudo 04 (agitadores operando em sentidos alternados de rotação e com G_f constante de $35s^{-1}$ em todas as câmaras) não seja usualmente empregados na prática devido ao G_f ser constante, tal estudo proporcionou para estas configurações tempo de residência médio igual ao tempo de residência teórico, evidenciando que a formação de zonas mortas e consequentemente a ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos, tornam-se menos relevantes para estas configurações ao ser realizado o estudo 04.

Os piores resultados estão para os estudos 01 (agitadores operando no mesmo sentido de rotação e G_f variável ao longo das câmaras) e 02 (agitadores operando em sentidos alternados e G_f variável ao longo das câmaras) para a configuração **eEeEe**. Ainda que estes estudos sejam adotados na prática, ou seja, com G_f variável ao longo das câmaras, provavelmente tenha ocorrido algum erro experimental conforme

anteriormente explicado segundo Levenspiel (2000), como pode ser visto pelo valor do tempo de residência adimensional maior que 1. Nota-se para todos os estudos realizados nas configurações de passagem que em nenhuma configuração houve ocorrência de curto-circuito.

5.5.2. Floculador de 03 câmaras em série

No mesmo contexto, na Tabela 5.7 apresentam-se os tempos de residência médios determinados para as cinco configurações de aberturas ensaiadas para unidade de floculação com três câmaras.

Tabela 5.7 - Tempo de residência médio adimensional para floculador de 03 câmaras

Parâmetros	Configuração de passagem				
Estudo	eEeE	eDeD	eded	eeee	e/e/e/e
01	1,16	1,03	1,04	0,93	1,03
02	1,09	1,03	1,02	0,85	0,99
03	1,07	1,07	1,06	1,04	0,98
04	1,13	1,08	1,06	1,01	0,97

Fonte: Cestari (2011)

A Tabela 5.7 indica que os melhores tempos de residência médios adimensionais estão para o estudo 04 realizado na configuração **eeee** e o estudo 02 realizado na configuração **e/e/e/e** indicando que há pouca incidência de curtos-circuitos em função da formação de zonas mortas.

Os piores resultados estão para o estudo 01 realizado na configuração **eEeEe** e para o estudo 02 na configuração **eeee**. O estudo 01 proporcionou para a configuração **eEeEe** maior erro experimental, conforme já salientado para floculador de 04 câmaras. Já o estudo 02 para a configuração **eeee** proporcionou maior formação de zonas mortas e conseqüentemente a ocorrência de curtos-circuitos, conforme observado no tempo de residência médio adimensional menor que 1.

5.5.3. Floculador de 02 câmaras em série

Por fim, na Tabela 5.8 apresentam-se os tempos de residência médios determinados para as cinco configurações de aberturas ensaiadas para unidade de floculação com duas câmaras.

Tabela 5.8 - Tempo de residência médio adimensional para floculador de 02 câmaras

Parâmetros	Configuração de passagem				
Estudo	eEe	eDe	ede	eee	e/e/e
01	1,09	1,04	1,04	0,99	0,98
02	1,03	1,01	1,01	0,99	1,01
03	1,1	1,03	1,07	1,06	1,05
04	1,11	0,99	1,09	1,05	1,07

Fonte: Cestari (2011)

Verifica-se na Tabela 5.8 que os melhores tempos de residência médios adimensional estão para o estudo 01 realizado na configuração **eee**, para o estudo 04 realizado na configuração **eDe** e para o estudo 02 realizados nas configurações **eDe**, **ede**, **eee** e **e/e/e**. Verifica-se nestas configurações que há pouca formação de zonas mortas e consequente pequena ocorrência de curtos-circuitos.

O pior tempo de residência médio adimensional está para o estudo 04 realizado na configuração **eEe**, evidenciando erro experimental conforme já observados nos floculadores com 04 e 03 câmaras.

Conclui-se que os efeitos de curtos-circuitos foram mais relevantes para a configuração **eee** em floculador de três câmaras, quando realizado o estudo 02. Já os maiores erros experimentais foram observados para a configuração **eEeE** em floculador de três câmaras, quando realizado o estudo 01.

5.5.4. Análise estatística dos tempos de residência médios adimensionais

Na tabela 5.9 é apresentada uma estatística descritiva dos tempos de residência médios adimensional, com a média, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) das configurações de passagem.

Tabela 5.9 - Estatística descritiva dos tempos de residência médio adimensionais das configurações de passagem.

Parâmetro	Configuração*				
	A	B	C	D	E
Média	1,17	1,07	0,99	0,99	1,01
DP	0,23	0,09	0,14	0,07	0,03
CV	0,20	0,09	0,14	0,07	0,03
*Configuração A – Representa as configurações eEeEe, eEeE e eEe. *Configuração B – Representa as configurações eDeDe, eDeD e eDe. *Configuração C – Representa as configurações edede, eded e ede. *Configuração D – Representa as configurações eeeee, eeee e eee. *Configuração E – Representa as configurações e/e/e/e/e, e/e/e/e e e/e/e					

Fonte: Cestari (2011)

Ao analisar a Tabela 5.9 para avaliar qual configuração obteve o tempo de residência médio adimensional mais próximo de um, verifica-se que os valores são bastante semelhantes entre si, além de apresentarem desvios padrões relativamente altos.

Para verificar se as diferenças observadas são significativas os dados foram submetidos ao teste t.

A Tabela 5.10 apresenta o teste de igualdade entre as médias dos tempos de residência médios adimensionais.

Tabela 5.10 - Resultado do teste de significância para as diferenças entre as médias dos tempos de residência médios adimensionais

Teste t											
Comparação	Configuração 1	N ¹	Med. ²	DP ³	Configuração 2	N	Med.	DP	t	tmax	Rejeita H ₀ ⁴
1	eEeEe	15	1,17	0,23	eDeDe	15	1,07	0,09	0,56	2,05	N
2	eEeEe	15	1,17	0,23	Edede	15	0,99	0,14	1,00	2,05	N
3	eEeEe	15	1,17	0,23	Eeeee	15	0,99	0,07	0,39	2,05	N
4	eEeEe	15	1,17	0,23	e/e/e/e/e	15	1,01	0,03	0,98	2,05	N
5	eDeDe	15	1,07	0,09	Edede	15	0,99	0,14	0,73	2,05	N
6	eDeDe	15	1,07	0,09	Eeeee	15	0,99	0,07	0,20	2,05	N
7	eDeDe	15	1,07	0,09	e/e/e/e/e	15	1,01	0,03	0,73	2,05	N
8	edede	15	0,99	0,14	Eeeee	15	0,99	0,07	0,01	2,05	N
9	edede	15	0,99	0,14	e/e/e/e/e	15	1,01	0,03	0,17	2,05	N
10	eeee	15	0,99	0,07	e/e/e/e/e	15	1,01	0,03	0,04	2,05	N
1 Número de amostras											
2 Média.											
3 Desvio padrão.											
4 O termo H ₀ significa que as médias comparadas são iguais.											

Fonte: Cestari (2011)

No teste de significância apresentado na Tabela 5.10 são considerados todos os estudos incluindo o estudo 05 (Agitadores desligados).

Todas as comparações mostram que não há diferenças significativas entre os tempos de residência médios adimensionais das configurações analisadas. Na prática, ainda que algumas configurações tenham médias iguais a um, o teste indica que esta diferença pode ser devido ao acaso, ou seja, a repetição dos ensaios provavelmente não levaria aos mesmos resultados.

Conclui-se a partir do teste t, apresentados na Tabela 5.10, que não se pode afirmar que uma configuração apresenta resultados significativamente melhores que outra, no que tange ao tempo de residência médio adimensional.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados dos ensaios experimentais e das análises estatísticas subsequentes, as seguintes conclusões podem ser elaboradas:

- i) Os efeitos, sobre a curva de distribuição dos tempos de residência (DTR), provocados pela variação do sentido do agitador e do gradiente de velocidade, tornam-se mais pronunciados à medida que diminui o número de câmaras. Para floculador de 04 câmaras, praticamente não se nota a influência desses parâmetros sobre a DTR.
- ii) Com relação à configuração das passagens entre as câmaras, os resultados mostraram que a curva DTR é bastante semelhante na presença da agitação. Apenas nos ensaios sem agitação (agitadores desligados) a configuração das passagens assumiu maior relevância.
- iii) A colocação do anteparo à frente das passagens diretas (configuração eeeee, eeee e eee) mostrou-se uma alternativa eficiente, na ausência da agitação promovida pelos agitadores. Com a colocação dos anteparos as curvas da configuração, que apresentavam as piores DTR, tornaram-se semelhantes ao das configurações mais recomendadas pelas práticas de projeto. Esta constatação pode fornecer importante ferramenta para minimizar o curto-circuito em floculadores em escala real dotados desta configuração de passagem.
- iv) As configurações edede, eded e ede, respectivamente para floculadores 04, 03 e 02 câmaras, ajustaram-se melhor ao modelo tanques em série que as configurações eEeEe, eEeE e eEe, indicando que os efeitos de curtos-circuitos em virtude da formação de zonas mortas são menos relevantes. A diferença entre as duas configurações mostrou-se significativa com 95% de confiança. Da mesma forma, as configurações e/e/e/e/e, e/e/e/e e e/e/e, respectivamente para floculadores 04, 03 e 02 câmaras, ajustaram-se melhor ao modelo tanques em série que as configurações eEeEe, eEeE e eEe.
- v) Em relação aos tempos de residência médios os floculadores com 04, 03 e 02 câmaras operando sob diferentes configurações de passagens comportaram-se de forma semelhante.

Essa afirmação é corroborada pelos testes estatísticos que demonstraram não haver diferenças significativas com 95% de confiança.

Tendo em vista os dados e conclusões obtidas no trabalho, recomenda-se:

- Os resultados deste trabalho foram obtidos com vazão constante, ou seja, a mesma vazão para os floculadores com 04, 03 e 02 câmaras. Sugere-se em trabalhos futuros a repetição dos ensaios mantendo-se constante o tempo de residência teórico, ou seja, variando a vazão à medida que diminui o número de câmaras.
- Estudos futuros sobre o efeito do anteparo podem se realizados sem a necessidade de investigação da influência da variação do gradiente de velocidade médio de floculação, pois os resultados obtidos evidenciaram sua menor relevância.

7. REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Mixing in coagulation and flocculation**. USA: AWWA Research Foundation.1991. p. 426.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992. 19p.

BRASIL, Ministério Da Saúde. PORTARIA n.º 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providencias. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 2004.

BRATBY, J. R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. **JAWWA**, New York. v. 73, n. 6, p. 318-325, June 1981.

DENBIGH, K. G.; TURNER, J. C. R. **Chemical reactor theory**. 3. ed. Cambridge: University Press, 1984. p. 64 -110.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RIMA, 2005. v. 2, 784 p.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A. S. Redução do tempo de floculação em função do escalonamento do gradiente de velocidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental – Trabalhos técnicos. 2001. 13 p.

FOGLER, H. S. **Elements of chemical reaction engineering**. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall International, 2006. 1080 p. (Series Editions).

HANSON, A. T.; CLEASBY, J. L. The effects of temperature on turbulence of flocculation: fluid dynamics and chemistry. **JAWWA**, New York, v. 111, n. 11. p 56-73, 1990.

HUDSON JUNIOR, H. E. Residence times in pretreatment. **JAWWA**, New York. v. 67, n. 1, p. 45–52, January 1975.

LETTERMAN, R. D.; QUON, J. E.; GEMMELL, R. S. Influence of rapid-mix parameters on flocculation. **JAWWA**, New York. v. 65, p. 716-722, November 1973.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas: cálculo de reatores**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 563 p.

LIBÂNIO, M. **Avaliação da flocculação em reatores estáticos e de escoamento contínuo com gradientes de velocidade constante e variável**. 1995. 136 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1995.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2010. 494 p.

PÁDUA, V. L. **Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos**. 1994. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1994.

REBHUN, M.; ARGAMAN, Y. Evaluation of hydraulic efficiency of sedimentations basins, **ASCE Journal of Sanitary Engineering Division**. New York, v. 91, n. 5, p. 37-45, 1965.

SMITH, J. M. **Chemical engineering kinetics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1981. 665 p.

STEEL, R. G.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw-Hill, 1960. 481 p.

TEEFY, S. **Tracer studies in water treatment facilities:** a protocol and case studies.
Denver: AWWA Research Foundation, 1996. 152 p.

ANEXO

Anexo I – Dados para levantamento das equações das retas para o traçador cloreto de sódio empregando três diferentes condutivímetros.

Equipamento	c (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Equação
Analion Modelo c708	5	16,8	$c = 0,4653 * condutividade - 3,8522$ $r = 0,996$
	10	29,1	
	20	52	
	30	73,8	
	40	94,2	
	50	117,6	
	75	172	
	100	220	
Digimed Modelo DM 3	5	18,2	$c = 0,3961 * condutividade - 2,5109$ $r = 0,999$
	10	31,1	
	20	56,2	
	30	82,4	
	40	106,2	
	50	135,2	
	75	199,6	
	100	255	
Analyser Modelo 650	5	14	$c = 0,4682 * condutividade - 1,2954$ $r = 0,999$
	10	24	
	20	45	
	30	66	
	40	88	
	50	110	
	75	165	
	100	215	