

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

GUILHERME SANDAKA

HIDRODINÂMICA DE UM SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO  
UTILIZADO NO TRATAMENTO DE REJEITO SALINO

PONTA GROSSA  
2018

GUILHERME SANDAKA

HIDRODINÂMICA DE UM SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO  
UTILIZADO NO TRATAMENTO DE REJEITO SALINO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para a obtenção do título de Mestre, em Engenharia Sanitária e Ambiental, Área de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador:  
Professor Dr. Marcos Rogério Szeliga

Coorientadora: Dra. Ana Carolina Barbosa Kummer

PONTA GROSSA  
2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

S213 Sandaka, Guilherme  
Hidrodinâmica de um sistema de alagado  
construído utilizado no tratamento de  
rejeito salino/ Guilherme Sandaka. Ponta  
Grossa, 2018.  
111f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia  
Sanitária e Ambiental - Área de  
Concentração: Saneamento Ambiental e  
Recursos Hídricos), Universidade Estadual  
de Ponta Grossa.  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério  
Széliga.  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Carolina  
Barbosa Kummer.

1.Avaliação hidrodinâmica. 2.Difusão.  
3.Convecção. 4.Rejeito salino. 5.Sistema  
de Alagados Construídos. I.Széliga, Marcos  
Rogério. II. Kummer, Ana Carolina  
Barbosa. III. Universidade Estadual de  
Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia  
Sanitária e Ambiental. IV. T.

CDD: 628.3



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA



## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Hidrodinâmica de um Sistema de Alagado Construído Utilizado no Tratamento de Rejeito Salino”

Nome: **Guilherme Sandaka**

Orientador: **Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

**Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga**  
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

**Prof. Dr. Guilherme Vuitik**  
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

**Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne**  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Ponta Grossa, 5 de abril de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais por todo o suporte dado durante meus estudos. Aos amigos próximos que sempre me incentivaram a seguir em frente. Aos Professores Dr. Marcos Rogério Szeliga e Dra. Ana Carolina Barbosa Kummer pela disposição e empenho para orientar esse trabalho. Aos padres Márcio Milek Marques e Frei José Tosta pelo suporte. Agradeço ainda à UNT (*University Of North Texas*) e UCL (*University College London*) pela parceria e à CAPES pela bolsa concedida durante os doze primeiros meses dessa pesquisa.

## RESUMO

O processo de dessalinização por ultrafiltração e osmose reversa tem como resíduo um concentrado salino. A caracterização deste rejeito e seu destino são objetos de estudos em pesquisas paralelas ao presente trabalho, o qual se integra à hipótese de polimento, tratamento, melhoria de qualidade e aproveitamento do rejeito com o emprego em Sistemas de Alagados Construídos – SAC – e posterior aplicação em irrigação. O SAC compreende um tanque de 100 litros, de conformação circular no qual se estabelece uma zona de raízes. Esta zona está sujeita à circulação do concentrado salino formando-se um circuito hidráulico de contato e transferência de massa. O entendimento do escoamento nesta região de transferência de massa, sua avaliação hidráulica e diagnóstico hidrodinâmico do tanque que foi utilizado são os objetos de estudo do presente trabalho que abrangeu a obtenção de dados de concentração de um traçador salino em tanque similar ao SAC, seu processamento computacional e sistematização para as avaliações requeridas. Foram obtidos dados de sinais elétricos a partir de eletrodos instalados no tanque de circulação e por meio da correlação sinal – condutividade – concentração foram definidos os meios de base para alimentação do processamento computacional que permitiu os resultados deste trabalho. Pôde-se averiguar diversas características nas configurações de escoamento testadas, entre elas o tempo de detenção real, ocorrências de curtos-circuitos, deposição densimétrica e a verificação da continuidade pela detecção de massa propagada. Com a hipótese da transferência de massa em função exponencial natural foram obtidas equações da concentração média para os diferentes níveis do tanque em função do tempo. Pode-se perceber nos gráficos obtidos no presente trabalho, a deposição densimétrica de traçador no fundo do tanque em todas as configurações testadas. Estes resultados são decorrentes de diferentes formas de operação hidráulica do SAC e permitiram concluir sobre os aspectos hidráulicos a serem considerados nas formas de operação, bem como nas interferências a serem implantadas na zona de raízes e na própria metodologia empregada neste sistema de averiguação de características hidráulicas e de transporte de massa.

Palavras chave: Avaliação hidrodinâmica, Difusão, Convecção, Rejeito salino, Sistema de Alagados Construídos.

## **ABSTRACT**

Desalination process by ultra filtration and reverse osmosis generates a saline concentrate residue. In order to investigate a possible treatment for this residue and further use for irrigation, a parallel study is being conducted using wetlands. The wetland is built in a 100 L circular shaped tank, in which is established a root zone. The concentrate circulates in this zone creating a hydraulic circuit and a mass transfer zone. The investigation of the flow in this region, the wetland hydraulic evaluation and the hydrodynamic diagnosis of the tank that will be used are the objects of study in this dissertation. This research was conducted using a similar tank to the one that will be used for constructing the wetland. Data from a saline tracer that was released during the flow on this tank were taken in order to a computational processing and further diagnose. Data were obtained from electrical signals from electrodes installed in the circulation tank and using the signal conductivity-concentration correlation, the tools were defined for feeding the computational processing that allowed the results of this work. It was possible to verify the diverse flow characteristics on the flow configurations tested, such as the real detention time, the detection of short-circuit zones, densimetric deposition and the verification of the continuity by the propagated mass. It can be seen in the images obtained in the present work, the densimetric deposition of tracer on the bottom of the tank in all tested configurations. The results allowed to conclude on several aspects to be considered in the forms of operation, as well as in the interferences to be implanted in the zone of roots and in the own methodology used in this system of investigation of hydraulic characteristics and of mass transport.

Key words: Hydrodynamic evaluation, Diffusion, Convection, Brine, Wetlands.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS: TIPOS E VARIAÇÕES.....	21
FIGURA 2- SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	21
FIGURA 3- SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL.....	22
FIGURA 4- SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO VERTICAL.....	22
FIGURA 5- CONCENTRAÇÕES DE TRAÇADOR QUE SAEM DO SISTEMA X TEMPO.....	26
FIGURA 6- EXEMPLO DE UMA CURVA DTR GENÉRICA.....	26
FIGURA 7- MEDIDAS DO TANQUE UTILIZADO NA MONTAGEM DO SAC, FORNECIDAS PELO FABRICANTE.....	33
FIGURA 8 - SISTEMA CARTESIANO DE COORDENADAS ADOTADO PARA O VOLUME DE CONTROLE E REPRESENTAÇÃO “WIRE FRAME” DOS CONTORNOS DO TANQUE DE ENSAIOS.....	34
FIGURA 9- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕE A MALHA (FUNDO).....	34
FIGURA 10- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕE A MALHA (NÍVEL 7,5 CM). .....	35
FIGURA 11- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕE A MALHA (NÍVEL 15 CM). .....	35
FIGURA 12- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕE A MALHA (NÍVEL 22,5 CM).....	35
FIGURA 13- MONTAGEM DO SISTEMA PARA EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS PARA O DIAGNÓSTICO HIDRODINÂMICO.....	38
FIGURA 14- MONTAGEM DO SISTEMA PARA EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS PARA O DIAGNÓSTICO HIDRODINÂMICO.....	38
FIGURA 15- TANQUE UTILIZADO PARA OS TESTES COM CAMADA SUPORTE E OS ELETRODOS DE MEDIÇÃO INDIRETA INSTALADOS.....	39
FIGURA 16- ELETRODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA. ....	40
FIGURA 17- CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA. .....	41
FIGURA 18- DETALHE DA PLACA <i>PROTOBOARD</i> COM OS ELETRODOS PARA MEDIÇÃO INDIRETA DE CONDUTIVIDADE. ....	42
FIGURA 19- ENSAIOS REALIZADOS PARA A AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DO TANQUE QUE COMPÕE O SAC. ....	45
FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO DE ESCOAMENTO ASCENDENTE.....	46
FIGURA 21 - CONFIGURAÇÃO DE ESCOAMENTO DESCENDENTE.....	46



FIGURA 22 – SISTEMA DE COORDENADAS EM VISTA DIAGONAL.....	52
FIGURA 23 – MODELO GEOMÉTRICO 3D, WIREFRAME – VASO DE ENSAIOS – VOLUME DE CONTROLE.....	52
FIGURA 24 –MALHA HORIZONTAL DE INTERPOLAÇÃO DE DADOS – REFINAMENTO DE DADOS ESPARSOS PARA A MALHA COM RESOLUÇÃO 129 X 129 ELEMENTOS.....	54
FIGURA 25 – RESULTADO DA INTERPOLAÇÃO EM NÍVEL HORIZONTAL E POSTERIOR ADAPTAÇÃO DE FORMA. ....	54
FIGURA 26 – RESULTADO DA INTERPOLAÇÃO VERTICAL COM VISUALIZAÇÃO EM DOIS CORTES EM PLANOS VERTICAIS. ....	55
FIGURA 27 – VISUALIZAÇÃO PADRÃO COM 3 PLANOS DE CORTE. ....	55
FIGURA 28 – VISUALIZAÇÃO EM ELEVAÇÃO – PLANO XY. ....	56
FIGURA 29 – INSERÇÃO DE ISOSUPERFÍCIE DE CONCENTRAÇÃO. ....	57
FIGURA 30 – GRÁFICO DE MASSA DETECTADA AO LOGO DO TEMPO. ....	57
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA AO LONGO DO TEMPO DE UM ENSAIO.....	58
FIGURA 32 – MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO. CURVA DE RESULTADOS MÉDIOS, REGRESSÃO E INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	60
FIGURA 33: VISTA XY PARA O NÍVEL 10 CM APÓS 30 MINUTOS DE ESCOAMENTO.....	65

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA INDIRETA E A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NA SONDA ATLAS K 0.1.....	62
GRÁFICO 2: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SONDA ATLAS K 0.1 E A CONCENTRAÇÃO DE SAL .....	63
GRÁFICO 3: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 7,2 L.H <sup>-1</sup> ) .....	70
GRÁFICO 4: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 7,2 L.H <sup>-1</sup> ).....	72
GRÁFICO 5: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 3,6 L.H <sup>-1</sup> ).....	77
GRÁFICO 6: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 7,2 L.H <sup>-1</sup> ) .....	82
GRÁFICO 7: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 3,6 L.H <sup>-1</sup> ).....	88
GRÁFICO 8: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 7,2 L.H <sup>-1</sup> ) PARA UM PULSO INSTANTÂNEO DE 1G DE SAL.....	93
GRÁFICO 9 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 0 CM ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( Q= 7,2L.H <sup>-1</sup> ).....	97
GRÁFICO 10 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 7,5 CM ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( Q= 7,2L.H <sup>-1</sup> ) .....	98
GRÁFICO 11 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 15 CM ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( Q= 7,2L.H <sup>-1</sup> ) .....	98
GRÁFICO 12 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 22,5 CM ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( Q= 7,2L.H <sup>-1</sup> ).....	99
GRÁFICO 13 - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DO ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( Q= 7,2L.H <sup>-1</sup> ).....	100
GRÁFICO 14 - DETECÇÃO DA MASSA DE TRAÇADOR CONTIDA NO TANQUE DE ENSAIOS COM SOBREPOSIÇÃO DO ENSAIO DE INJEÇÃO DE MASSA COM SAÍDA FECHADA E ENSAIO DINÂMICO COM SAÍDA ABERTA.....	105

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 7,2 L.h <sup>-1</sup> .....	66
QUADRO 2 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 7,2 L.h <sup>-1</sup> .....	73
QUADRO 3 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 3,6 L.h <sup>-1</sup> .....	78
QUADRO 4 - VISTA DO PLANO XY NO TEMPO DE 30 MINUTOS PARA O ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 7,2 L.h <sup>-1</sup> .....	82
QUADRO 5 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 7,2 L.h <sup>-1</sup> .....	84
QUADRO 6 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 3,6 L.h <sup>-1</sup> .....	89
QUADRO 7 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 7,2 L.h <sup>-1</sup> PARA APLICAÇÃO DE PULSO INSTANTÂNEO.....	94
QUADRO 8 - VARIAÇÃO DO CENTRO DE MASSA DA PLUMA DE TRAÇADOR SALINO PRESENTE NO SISTEMA COM O TEMPO.....	103

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA 1 - PONTOS DO GRID PARA PLUMA TRAÇADOR.....	OBTENÇÃO DO IMAGEAMENTO DA DE 34
TABELA 2 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA OS SAC EM SUAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS E DE ESCOAMENTO.....	100
TABELA 3 - MÉDIA DOS CENTROS DE MASSA DA PLUMA DE SAL NO TEMPO PARA OS TESTES EXECUTADOS.....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\lambda$	Eficiência Hidráulica
$\nu$	Viscosidade cinemática
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C(t)	Concentração média de traçador na saída do sistema
D	Diâmetro
$D_{AB}$	Coefficiente de difusividade de A no meio B
$dC_A$	Gradiente de concentração da substância A no meio B
dt	Intervalo de tempo entre amostragens
$D_T$	Componente de difusividade turbulenta
DTR	Distribuição dos tempos de residência
e	Taxa de volume efetivo
ETA	Estação de Tratamento de Água
$e_v$	Eficiência volumétrica
ICC	Índice de Curtos-circuitos
k	Condutividade hidráulica
N	Número de tanques de mistura perfeita em série
Q	Vazão.
Re	Numero de Reynolds
SAC	Sistema de alagado construído
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SI	Sistema Internacional de Unidades
t	Tempo de amostragem
$t_m$	Tempo de detenção hidráulica médio
$t_n$	Tempo de detenção hidráulica nominal ou teórico
$t_p$	Tempo de pico da curva do traçador
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UNT	University Of North Texas
UCL	University College London
V	Volume total do sistema de alagado construído.
$V_e$	Velocidade de escoamento
$V_{efetivo}$	Volume total ativo no SAC

$V_{\text{sistema}}$  Volume teórico do SAC

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral .....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Águas Salinas, Águas Salobras e Técnicas de Dessalinização .....	19
3.2 Sistemas de Alagados Construídos (SAC) .....	20
3.3 Métodos de Avaliação do Comportamento Hidráulico dos Sistemas de Alagados Construídos (SAC) .....	23
3.3.1 Utilização de traçadores e distribuição dos tempos de residência (DTR).....	24
3.4 Parâmetros hidráulicos para a caracterização hidráulica de um SAC.....	27
3.5 Dispersão de traçadores em meio aquoso.....	29
3.5.1 Difusão de traçadores em meio aquoso .....	30
3.5.2 Dispersão de traçadores por convecção em meio aquoso .....	31
3.6 Colmatação em sistemas de alagados construídos.....	31
3.7 Software MATLAB® .....	32
4. METODOLOGIA .....	33
4.1 Montagem do Sistema .....	33
4.2 Aferição da concentração de traçador salino nos pontos de coleta.....	39
4.2.2 Montagem do circuito elétrico para determinação indireta de condutividade elétrica .....	40
4.2.3 Medição indireta da condutividade elétrica do traçador salino.....	42
4.2.3.1 Análise de variância para a medida indireta de condutividade detectada nos eletrodos .....	43
4.2.3.2 Conversão da medida de condutividade indireta para condutividade elétrica padrão da sonda e concentração de sal.....	43
4.3 Mapeamento da Pluma de Traçador Salino no Interior do Recipiente .....	44
4.4 Realização dos ensaios.....	45
4.4.1 Ensaios realizados com o tanque preenchido apenas sem meio suporte .....	46
4.4.1.1 Ensaio de difusão do traçador salino em meio estático .....	46
4.4.1.2 Ensaio dinâmico sem meio suporte com alimentação inferior .....	47
4.4.1.3 Ensaio dinâmico sem meio suporte com alimentação superior .....	48
4.4.2 Ensaios realizados com meio suporte.....	48

4.4.2.1 Ensaio de fluxo descendente .....	49
4.4.2.2 Ensaio com injeção de pulso instantâneo de traçador salino.....	49
4.5 Parâmetros Hidráulicos derivados da distribuição dos tempos de residência (DTR) .....	49
4.6 Processamento Computacional .....	50
4.6.1 Determinação e visualização de resultados.....	50
4.6.1.1 Sistema de Coordenadas.....	51
4.6.1.2 Volume de controle .....	52
4.6.1.3 Planos de visualização e isosuperfícies de concentração. ....	53
4.6.3 Curvas de concentração.....	58
4.6.4 Tempo de detenção real .....	60
5 RESULTADOS .....	62
5.1 Medida Indireta de Condutividade Elétrica .....	62
5.2 Conversão da condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) para concentração de sal (G.L-1) .....	63
5.3 Ensaio de fluxo ascendente sem meio suporte com vazão de $7,2 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ .....	63
5.4 Ensaio de fluxo descendente sem meio suporte com vazão de $7,2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ .....	70
5.5 Ensaio de fluxo descendente sem meio suporte com vazão de $3,6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ .....	76
5.6 Ensaio de fluxo descendente com meio suporte e vazão de $7,2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ .....	81
5.7 Ensaio de fluxo descendente com meio suporte e vazão de $3,6 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ .....	87
5.8 Ensaio de fluxo descendente com meio suporte e pulso instantâneo de traçador com vazão de $7,2 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ .....	92
5.9 Exemplo de curva de curvas de concentração para o ensaio descendente de vazão $7,2 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ sem meio suporte .....	97
5.10 Parâmetros Hidráulicos .....	100
5.11 Variação Do Centro De Massa.....	103
5.12 Detecção de massa e tempo de detenção .....	105
REFERÊNCIAS.....	109



## 1 INTRODUÇÃO

A água utilizada para o abastecimento urbano deve atender os parâmetros mínimos de potabilidade para o consumo. A água proveniente dos rios, aquíferos e mananciais de abastecimento deve passar pelo processo de tratamento adequado conforme o tipo de uso a que se destina e também segundo a qualidade da água bruta captada. Para isso, existem diversos tipos de tratamento possíveis para a água, os quais vão desde os mais simples, como, por exemplo, a filtração direta, até os que demandam maior energia e mais equipamentos, como por exemplo a osmose reversa (OR).

Devido à crescente escassez de água ou a contaminação das fontes de abastecimento urbano devido ao lançamento de poluentes ou à intrusão marítima, se faz necessária a busca por novas fontes de abastecimento ou de técnicas que sejam capazes de tratar adequadamente a água captada para que atenda aos parâmetros de potabilidade, os quais, no Brasil, são estabelecidos pelo Ministério da Saúde por meio da Portaria nº 2.914/11 (BRASIL, 2011).

Uma das soluções encontradas para suprir a demanda por água em algumas regiões do mundo é a dessalinização de água do mar, de aquíferos que apresentem elevada salinidade ou água de rios que sofreram a intrusão marítima. Entretanto, os processos de dessalinização produzem rejeitos salinos altamente concentrados, os quais necessitam de uma correta disposição final, de modo a não causar impactos ambientais negativos.

Os efluentes provenientes de residências, indústrias e demais fontes devem passar por um tratamento antes da sua disposição final, seja ela o lançamento em corpos hídricos ou lançamento no mar. Órgãos ambientais ao redor do mundo também estabelecem padrões para esses lançamentos. Os efluentes, dependendo de sua natureza e composição, podem ser reutilizados em processos que permitam tal fim.

Uma das técnicas de disposição de rejeitos salinos proveniente dos processos de dessalinização de água é a fitodessalinização, a qual consiste em irrigar culturas agrícolas resistentes à elevada salinidade com esse resíduo. Tal técnica é bastante controversa, pois se de um lado é uma solução frente à produção de rejeito salino, por outro lado pode causar impactos ambientais negativos no solo.

Com o objetivo de oferecer um destino e um tratamento adequado aos resíduos dos sistemas de dessalinização de água, frente ao problema da degradação do solo e de aquíferos pelo uso da fitodessalinização, propõe-se o tratamento do rejeito salino através de sistemas de alagados construídos (SAC).

A técnica SAC consiste na circulação do efluente a ser tratado através de uma zona de raízes. Em pesquisa paralela a este trabalho, foi utilizado o capim elefante (*Pennisetum purpureum*), para promover o polimento e melhoria de condições para aproveitamento e destino do concentrado salino proveniente do sistema de osmose reversa. O capim elefante é uma planta forrageira, ou seja, pode ser utilizada para a alimentação do gado, fato esse, que faz com que as plantas utilizadas nos SAC possam ter um uso posterior na alimentação animal ou agregar valor financeiro. O resíduo utilizado neste tratamento foi proveniente da estação piloto de osmose reversa, localizada na ETA – SANEPAR, em Praia de Leste, Paraná.

A água que abastece a estação de tratamento de água (ETA) em Praia de Leste, no Estado do Paraná é captada do Rio das Pombas. De acordo com Svolenski (2000), o rio das Pombas é um dos afluentes principais do rio Guaraguaçu, o qual está localizado na Bacia Hidrográfica da Baía de Paranaguá e tem a sua nascente próximo à cidade de Matinhos. Seu percurso é de 61,7 km. Além do Rio das Pombas, outros afluentes que deságuam no rio Guaraguaçu, são o Rio Pery, Indaial, do Meio, Cachoeirinha, São Joãozinho e rio Pequeno. O Rio Guaraguaçu, por sua vez, sofre influência direta das marés, pois em períodos em que a maré está alta, ocorre a intrusão de água do mar nesse manancial. Devido à intrusão da água do mar no Rio das Pombas, é necessário um tratamento que torne essa água própria para o consumo humano. Para isso, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), em parceria com a Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), a University of North Texas (UNT) e a University College London (UCL) implementaram uma estação piloto de dessalinização na ETA de Praia de Leste para pesquisar uma forma de tratamento adequada para essa água. O sistema consiste da combinação da ultrafiltração com a osmose reversa. Uma vez que a osmose reversa gera o concentrado salino, existe a necessidade de se encontrar uma forma de disposição adequada para esse resíduo.

Em todos os processos de tratamento de água e esgotos, as características hidráulicas do sistema são importantes para a eficiência do tratamento, gerando economia e otimizando o tempo e a capacidade de tratamento.

As trajetórias preferenciais de escoamento das partículas e o tempo que o efluente se encontra em contato com o sistema de tratamento são fatores que devem ser levados em conta para se garantir a remoção eficiente de cargas poluidoras dos efluentes.

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2006), o método mais amplamente difundido para a caracterização hidráulica de sistemas de tratamento de água e de efluentes em engenharia é o uso de traçadores, os quais devem ser substâncias não reativas e de fácil detecção, lançadas de maneira controlada dentro do sistema. Essa técnica, aliada ao processamento computacional dos dados coletados em diversas posições e instantes, acerca da concentração do traçador, fornece registros numéricos os quais podem se traduzir em imagens, gráficos, equações e resultados úteis para a compreensão do comportamento hidrodinâmico no espaço monitorado. Estas informações numéricas traduzidas com ferramentas de visualização possibilitam a detecção de regiões de estagnação, caminhos preferenciais – curtos-circuitos, zonas de deposição, obstruções e fatores de interferência na eficiência do processo.

O objetivo deste trabalho foi de analisar o comportamento hidráulico de um SAC utilizado no sistema de tratamento de rejeito salino da estação piloto de dessalinização de Praia de Leste, empregando ferramentas computacionais.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar a hidrodinâmica de um tanque utilizado em um sistema de alagado construído para o tratamento de rejeito salino proveniente de uma instalação piloto de dessalinização por osmose reversa.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implantar um sistema de aquisição de dados para efeito de obtenção de concentrações distribuídas no espaço de controle de um tanque, ao longo do tempo
- Aplicar ferramentas computacionais para avaliação e compreensão do comportamento hidrodinâmico do sistema diante de diferentes modos de operação, distinguir fatores de influência, verificar a existência de fenômenos característicos no espaço de controle e no tempo de execução;
- Determinar a distribuição dos tempos de residência (DTR), a eficiência hidráulica ( $\lambda$ ) do sistema e a ocorrência de zonas de estagnação e curto-circuito de acordo com a DTR;
- Estabelecer o balanço de massa, propor curvas de regressão baseadas em modelos compatíveis com a literatura e com a utilização de métodos numéricos computacionais de regressão;
- Estimar o tempo de detenção hidráulica para o teste descendente com a presença de camada suporte e vazão de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$  através das curvas de detecção de massa, analisando e concluindo com a avaliação hidrodinâmica do sistema.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ÁGUAS SALINAS, ÁGUAS SALOBRAS E TÉCNICAS DE DESSALINIZAÇÃO

A Resolução 357/05 do CONAMA classifica as águas, de acordo com a salinidade, em águas doces, salobras e salinas. Para as águas doces a salinidade deve ser menor ou igual a 0,5‰, já as águas salobras são aquelas que possuem uma salinidade entre 0,5‰ e 30‰ e, nas águas salinas, esse valor é maior que 30‰ (BRASIL, 2005).

Segundo Phuck et al. (2016), na busca de novas fontes de água para o abastecimento, os processos de dessalinização de águas salinas e salobras são uma alternativa para minimizar a crise hídrica enfrentada em algumas regiões do mundo. Dentre as técnicas de dessalinização da água do mar ou águas subterrâneas com elevada salinidade, podem ser citadas duas: a dessalinização térmica, a qual tem se desenvolvido desde 1950 e, o uso de membranas, o qual vem se desenvolvendo desde 1920. De acordo com Greenlee et al. (2009), a dessalinização térmica necessita de maior quantidade de energia para a realização do processo, sendo, desse modo, mais cara; tal técnica se desenvolveu no Oriente Médio, em regiões com grande abundância de combustíveis fósseis, não havendo, desse modo, uma maior preocupação com o gasto energético.

Ainda, de acordo com Phuck et al. (2016), na dessalinização térmica, ou destilação, a água salina ou salobra é submetida ao aquecimento. Desse modo, a parcela líquida evapora, ocorrendo, desse modo, a retenção das partículas sólidas. O vapor d'água é então resfriado, a fim de que condense e retorne ao estado líquido.

Dentre as técnicas de dessalinização por membranas, a mais utilizada, de acordo com Zhao et al. (2011), é a osmose reversa. A osmose reversa pode ser utilizada tanto para o tratamento de água salobra, quanto de água do mar. Nesse processo, a água com alta concentração de sais é submetida a uma pressão superior a sua pressão osmótica, através de uma membrana que é permeável apenas para o solvente. Desse modo, quando a pressão é aplicada na água a ser tratada, ocorre a separação da água e dos sólidos. Esse processo resulta em uma água sem a presença de sais, a qual é chamada de permeado e, também ocorre a geração do concentrado salino, também chamado de salmoura ou *brine*<sup>1</sup>. Se por um

---

<sup>1</sup> Termo derivado da língua inglesa, o qual apresenta tradução equivalente na língua portuguesa como salmoura.

lado esse processo produz um permeado de alta qualidade, por outro lado, o rejeito salino produzido pode impactar negativamente o meio ambiente caso não receba uma destinação adequada, pois elevará consideravelmente a salinidade do meio em que for lançado.

Morillo et al. (2014) citam a fitodessalinização como uma possível solução na destinação final do concentrado salino. Nessa técnica plantas resistentes à salinidade são irrigadas com adição de concentrados salinos. Nesse processo, ocorre a produção de plantas forrageiras ou outras plantas que se adaptem à elevada salinidade para uso posterior na agropecuária. Entretanto, quando ocorre a irrigação das plantas forrageiras com o concentrado salino de maneira direta no solo, pode ocorrer o aumento da salinidade do mesmo e de aquíferos localizados abaixo das zonas de plantio.

### 3.2 SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS (SAC)

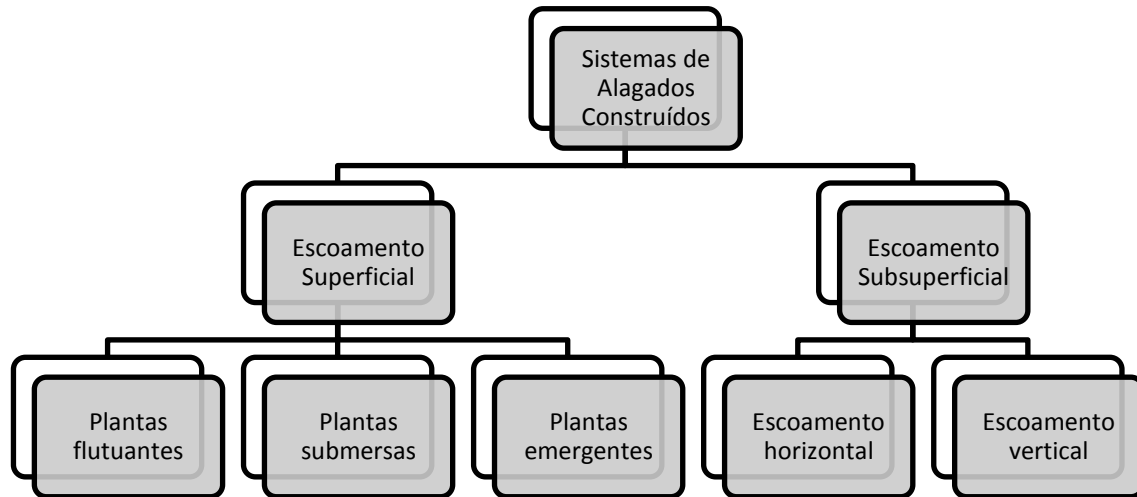
Brasil e Matos (2008) sugerem os SAC plantados com espécies halófitas, ou seja, aquelas que são naturais de ambiente terrestre, mas que são adaptadas à elevada salinidade, como uma alternativa de tratamento de águas residuárias. Os SAC são sistemas robustos, com baixo custo de manutenção, simplicidade de operação e, que ainda, podem gerar aspectos paisagísticos agradáveis. Desse modo, esses sistemas são uma proposta aplicável em regiões de clima tropical e que possuam áreas disponíveis para a sua implementação.

De acordo Kadlec e Wallace (2009), os SAC podem ser classificados, segundo o tipo de escoamento, em sistemas de escoamento superficial e escoamento subsuperficial, cada qual contendo suas variantes (Figura 1).

Nos SAC de escoamento superficial (Figura 2), podem ocorrer plantas flutuantes, submersas ou emergentes. Nessa configuração de escoamento, o efluente tem sua matéria orgânica removida pelos processos de sedimentação, filtração, adsorção e precipitação. Seu uso mais comum se dá na forma de lagoas de polimento, as quais são usadas no tratamento complementar de efluentes que já passaram pelo tratamento secundário e terciário. A principal vantagem desse tipo de SAC é que a sua aplicabilidade em regiões com diferentes climas, operando tanto em regiões de clima quente, como em regiões de clima frio. Por outro lado, podem

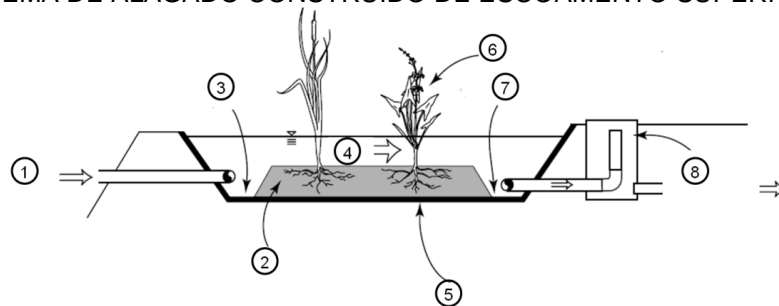
atrair animais selvagens ao seu redor e também aumentar a exposição da população ao redor a patógenos.

FIGURA 1- SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS: TIPOS E VARIAÇÕES



Fonte: Adaptado de Kadlec e Wallace, 2009.

FIGURA 2- SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL



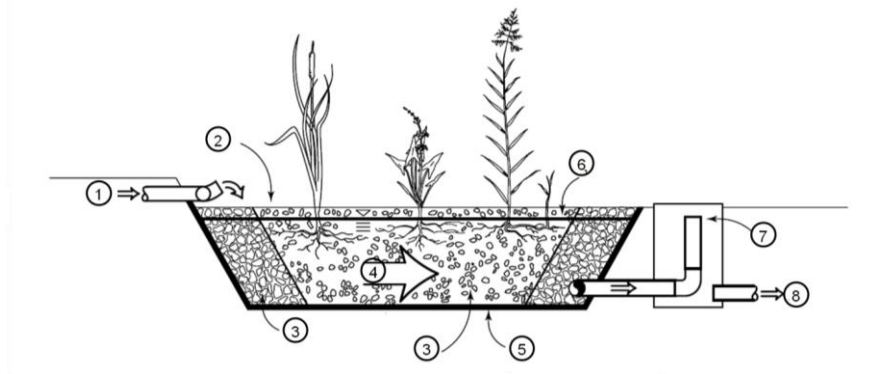
- |                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1- Afluente                    | 5 - Revestimento impermeável |
| 2- Meio suporte para as raízes | 6 - Vegetação emergente      |
| 3 - Entrada do afluente        | 7- Saída do efluente         |
| 4 - Direção do escoamento      | 8- Controle do nível d'água  |

Fonte: Adaptado de Kadlec e Wallace, 2009..

Quando o escoamento do SAC é do tipo horizontal subsuperficial (Figura 3), existe uma camada de pedregulho sobre o qual se assenta uma camada de areia. A camada de areia serve como meio suporte para o plantio das plantas que irão constituir o sistema de tratamento. O efluente esco horizontalmente na parte inferior do sistema de tratamento, onde entra em contato com a zona de raízes.

Nessa configuração, a exposição humana à patógenos é minimizada. Embora seu custo de implantação seja maior que de SAC de escoamento superficial, a manutenção é mais econômica.

FIGURA 3- SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL

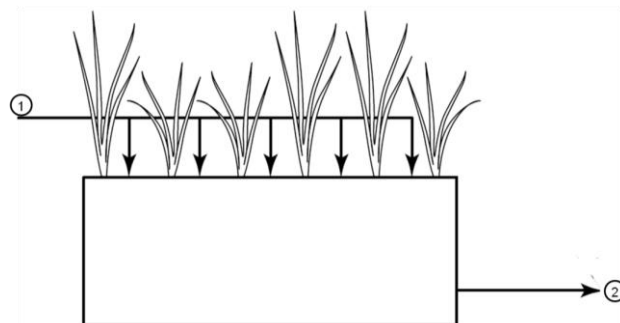


- |                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1- Entrada                      | 5 - Revestimento impermeável |
| 2- Topo da camada de pedregulho | 6 - Vegetação emergente      |
| 3 - Entrada do afluente         | 7- Saída do efluente         |
| 4 - Direção do escoamento       | 8- Controle do nível d'água  |

Fonte: Adaptado de Kadlec e Wallace, 2009.

No sistema em que o tratamento se dá por escoamento vertical (Figura 4), o efluente é distribuído na face superior da camada de areia, a qual, também serve de camada suporte para as plantas do sistema de tratamento. Desse modo, ocorre a percolação pela camada de areia e pedregulho, entrando em contato com a zona de raízes, a qual propiciará o tratamento. Tal configuração apresenta alta eficiência na oxidação da amônia.

FIGURA 4- SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO DE ESCOAMENTO VERTICAL



- |            |          |
|------------|----------|
| 1- Entrada | 2- Saída |
|------------|----------|

Fonte: Adaptado de Kadlec e Wallace, 2009



### 3.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DOS SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS (SAC)

As pesquisas recentes relacionadas à hidráulica de SAC mostram que é possível a ocorrência de três diferentes zonas hidráulicas. A primeira é a zona de escoamento ativo, na qual ocorre fluxo constante de água desde a entrada até a saída. A segunda zona é intermediária, pois nela ocorre o acúmulo temporário de componentes que necessitam de tratamento, mas que com o passar do tempo são transportados para a zona de escoamento ativo. E, o terceiro tipo de zona hidráulica são as zonas mortas. Nesse último grupo, ocorre a o acúmulo de água e a deposição de sedimentos, pois a velocidade de escoamento nessas regiões é nula. Isso acontece porque as zonas mortas se encontram afastadas da trajetória de escoamento ativo e desse modo não há a ocorrência de troca de componentes com a zona ativa. Desse modo, a ocorrência de zonas mortas em um SAC é um fator que precisa ser evitado para se obter a máxima eficiência hidráulica, pois, o líquido que se encontra nessas regiões isoladas não irá entrar em contato com as regiões em que o tratamento efetivamente ocorre e ficará retida por um tempo demasiadamente prolongando dentro do sistema de tratamento (ZAHRAEFARD; DENG, 2011).

A caracterização hidráulica de reatores e, conseqüentemente de SAC, vem sendo realizada pelo método desenvolvido por Levenspiel (1999). Tal método é chamado de modelagem sistêmica. Esse modelo é robusto e mostra o comportamento do escoamento com o uso de traçadores e a obtenção de parâmetros hidráulicos com a distribuição dos tempos de residência (DTR) das partículas de traçador. Entretanto, quando há a ocorrência de fenômenos em locais específicos dentro do SAC, esse modelo não consegue mostrar com clareza o comportamento hidráulico nessas regiões específicas. Uma solução encontrada para melhorar o entendimento do escoamento em reatores é o uso de *softwares*, como por exemplo o CFD (*Computational Fluid Dynamics*), o qual subdivide o reator em uma malha computacional para simular o escoamento dentro de todos os pontos do sistema. Desse modo, há a obtenção de um mapeamento do comportamento do escoamento do líquido dentro do reator (LE MOULEC et al., 2010).

### 3.3.1 Utilização de traçadores e distribuição dos tempos de residência (DTR)

A análise do comportamento hidráulico de um escoamento pode ser feita com o uso de traçadores. De acordo com Silva et al. (2009), traçadores são compostos químicos que são inseridos em um escoamento com a finalidade de se analisar o perfil de velocidades ou a trajetórias das partículas que compõem o sistema. Os traçadores devem ser quimicamente estáveis e devem possuir uma densidade próxima à do líquido em que serão inseridos. Ainda, os traçadores devem ser facilmente detectáveis e não devem interagir quimicamente com o meio em que se encontram.

Bodin et al. (2013a) citam o comportamento hidráulico de um SAC como o fator preponderante na taxa de remoção de poluentes. O traçador atua como um indicador da hidrodinâmica do sistema, podendo, pela análise dos resultados, averiguar caminhos preferenciais, zonas mortas de escoamento e o tempo de detenção do sistema.

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2006), dentre as substâncias que podem ser utilizadas como traçadores destacam-se os radioisótopos, corantes, sais e bases. O cloreto de sódio e também o cloreto de cálcio vem sendo utilizados com frequência. Ainda, segundo os autores, quando o sal de cozinha refinado é utilizado, a sua concentração na água não deve ultrapassar os  $200 \text{ g.L}^{-1}$  devido à saturação do meio. Para a quantificação do traçador pode ser utilizada uma correlação entre condutividade elétrica e a sua concentração por meio de uma equação pré-estabelecida.

Matos *et al.* (2015), desenvolveram um trabalho investigando a eficiência do uso de traçador salino no estudo de colmatação em SAC. Tal estudo apontou que o cloreto de sódio pode ser usado para este fim, pois a recuperação do traçador, ou seja, a massa de traçador medida na saída do sistema após a sua aplicação em diferentes SAC, resultou em mais de 98%.

Bodin e Persson (2012) definem o tempo de detenção hidráulica (TDH), como principal fator a ser considerado no dimensionamento de um SAC para tratamento de efluentes. O TDH pode ser definido como o tempo médio que um líquido passa dentro de um sistema de tratamento. Para um reator ideal, o tempo de detenção hidráulica nominal ( $t_n$ ) é dado por:

$$t_n = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Onde  $t_n$  é o tempo de detenção hidráulica nominal,  $V$  é o volume total do sistema e  $Q$  é a vazão que passa pelo sistema. No conceito de tempo de detenção hidráulica nominal é assumido que todo o volume do SAC está em contato com o afluente, ou seja, o sistema apresenta condições hidráulicas ideais. Em um sistema real as condições de escoamento não são ideais e cada parcela de líquido ficará um tempo diferente dentro do sistema. Algumas frações de líquido ficarão por um tempo menor dentro do sistema, ao passo que outras parcelas poderão se depositar em zonas mortas de escoamento, permanecendo aí por um tempo muito maior. Como as partículas ficam por tempos diferentes dentro do sistema, uma das formas de se analisar o comportamento hidráulico é por meio das distribuições do tempo de residência (DTR).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2006), a aplicação do traçador no sistema pode ser contínua ou por pulsos. Na aplicação contínua é preparada uma solução de traçador com concentração pré-fixada, a qual é lançada com uma vazão constante durante o tempo de operação do sistema. Já, na aplicação por pulsos, a solução de traçador é preparada em um recipiente, sendo o seu conteúdo introduzido na água no menor tempo possível.

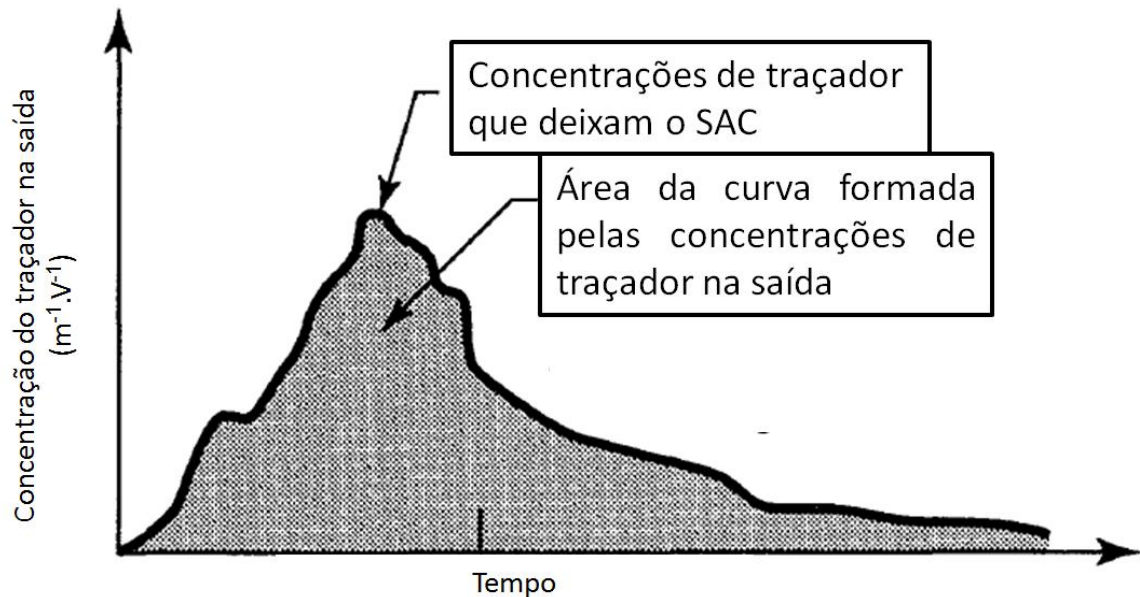
Fogler (2008), afirma que para uma injeção de traçador ser considerada do tipo contínua, a quantidade de traçador que deixa o sistema na saída deve ser igual à concentração da entrada. Para isso, imagina-se um sistema em que não se tenha presente nenhuma quantidade de traçador em um tempo  $t_1$ . Uma vez que se inicia o lançamento de traçador na entrada, mede-se a concentração de traçador que deixa o sistema. Se no tempo  $t_2$ , a quantidade de traçador que está saindo é a mesma com que o sistema está sendo alimentado, logo a injeção é do tipo contínua.

Para a obtenção da DTR em um SAC é lançado um sinal de traçador na entrada do sistema e, a sua concentração é medida na saída em determinados intervalos de tempo (Figura 5).

A curva DTR é representada de modo que a área sob a curva seja unitária (Equação 2), ou seja, a curva de concentração de traçador na saída do SAC é convertida a fim de se obter uma DTR com área unitária (LEVENSPIEL, 1999).

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

FIGURA 5- CONCENTRAÇÕES DE TRAÇADOR QUE SAEM DO SISTEMA X TEMPO

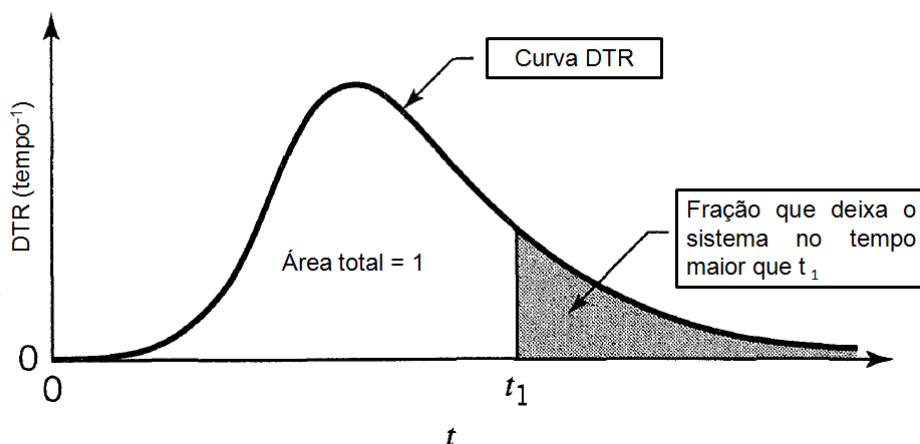


Fonte: Adaptado de Levenspiel, 1999.

A DTR para as partículas do traçador (Figura 6) é obtida medindo-se a concentração de traçador que deixa o tanque ( $C_{saída}$ ) em intervalos de tempo ( $t$ ). O traçador é injetado em um pulso com uma vazão  $Q$  em um determinado tempo. A massa total de traçador injetada no sistema é dada por  $M$ . Desse modo, a conversão das concentrações de traçador medidas na saída do sistema para a DTR, a qual tem a unidade de  $\text{tempo}^{-1}$ , é dada por:

$$DTR = \frac{C_{saída}}{\left(\frac{M}{Q}\right)} \quad (3)$$

FIGURA 6- EXEMPLO DE UMA CURVA DTR GENÉRICA PARA UM SINAL TIPO PULSO



Fonte: Adaptado de Levenspiel, 1999.

### 3.4 PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE UM SAC

Uma vez que é determinada a DTR para um escoamento em um SAC, alguns parâmetros hidráulicos podem ser obtidos a partir dela. O primeiro deles é o tempo de detenção médio ( $t_m$ ). De acordo com Fogler (2016),  $t_m$  é dado pelo primeiro momento da função DTR. Sendo assim, temos:

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tCdt}{\int_0^{\infty} Cdt} \approx \frac{\sum_{i=2}^n \left( \frac{t_i C(t_i) + t_{i-1} C(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^n \left( \frac{C(t_i) + C(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})} \quad (4)$$

Onde C é a concentração do traçador na curva DTR no tempo  $t_i$ . Nas aplicações práticas, devido ao longo comprimento da parte posterior da curva DTR a construção da curva é complexa. Por isso, adota-se 95% do tempo de passagem do traçador (HOLLAND et al., 2004).

Kadlec e Wallace (2009) definem a eficiência volumétrica de um SAC como a razão entre o tempo de detenção médio ( $t_m$ ) e o tempo de detenção teórico ( $t_n$ ), conforme a equação (5). Tal relação é uma forma empírica de se estimar a quantidade de água presente no SAC que está envolvida em zonas de escoamento ativo.

$$e_v = \frac{t_m}{t_n} \quad (5)$$

A fim de se obter um parâmetro mais geral para as condições hidrodinâmicas de um SAC, pode-se calcular a eficiência hidráulica ( $\lambda$ ), a qual é dada por:

$$\lambda = \frac{t_m \cdot t_p}{(t_n)^2} \quad (6)$$

Sendo  $t_m$  a média da distribuição do tempo de residência,  $t_n$  o tempo de residência teórico do sistema e  $t_p$  é o tempo em que a concentração de traçador atinge a concentração de pico da curva DTR (CHANG et al, 2016).

Uma vez conhecidas as características hidráulicas do sistema, é possível a otimização do escoamento, a fim de garantir homogeneidade na distribuição das

partículas em todas as regiões. Desse modo, as raízes das plantas contidas no sistema de alagado construído estarão sujeitas à uma mesma concentração de nutrientes e possivelmente a uma maior eficiência na taxa de remoção de poluentes. A caracterização hidráulica do SAC se dá pelo cálculo de alguns parâmetros que derivam da DTR do traçador no interior do sistema (BODIN et al., 2013b)

Chang et al. (2016) classificam a eficiência hidráulica de um SAC em três níveis: aqueles que apresentam uma eficiência ( $\lambda$ ) igual ou superior a 0,75 possuem uma eficiência hidráulica boa; os que possuem o valor  $\lambda$  entre 0,5 e 0,75 possuem eficiência satisfatória. Ao passo que, os que possuem o coeficiente  $\lambda$  menor ou igual a 0,5 possuem uma eficiência baixa.

Holland et al. (2004) afirma ainda, que o cálculo da eficiência hidráulica de um sistema de alagado construído quantifica as características de projeto que afetam a eficiência de tratamento. É um parâmetro de mais simples compreensão, se comparado à DTR, pois reduz a mesma a um único valor. Esse valor representa a capacidade que um sistema de tratamento possui de distribuir o escoamento de maneira uniforme dentro de todo o seu volume, o qual é rastreado pelo uso de traçadores.

O conceito de eficiência hidráulica de um sistema de alagado construído deriva da quantificação da posição relativa do centróide da área da curva DTR, uma vez que o centróide da curva DTR representa o tempo de detenção real do sistema. Em reatores ideais, o tempo de detenção calculado a partir da curva DTR deve ser igual ao tempo de residência calculado dividindo-se a vazão pelo volume do reator. Assim, se o centróide da curva DTR se encontra à esquerda do tempo de detenção calculado pelo volume e vazão, significa que ocorrem zonas de curto-circuito dentro do sistema, causando perdas no volume de detenção efetivo (LEVENSPIEL, 1999; KADLEC; KNIGHT, 1996; HOLLAND, 2004).

Os reatores, dentro dos quais se enquadram os SAC, podem ser classificados, ainda, em sistemas de batelada e sistemas de fluxo contínuo. Para os reatores em batelada, a medida de qualquer parâmetro no interior do tanque é a mesma em todas as coordenadas. Os reatores de fluxo contínuo, por sua vez, não promovem a mistura das partículas ao longo do caminho de escoamento. Dentre os conceitos derivados da distribuição dos tempos de residência para as partículas do traçador, há o número "N", que representa o número de reatores de mesmo volume, em série e idealmente agitados. Desse modo, quanto maior o valor de N, a mistura

que ocorre no interior do reator é menor. Desse modo, para um número N grande, o escoamento é do tipo pistonado (LEVENSPIEL, 1999).

O número "N", o qual é o valor do número de tanques de mistura perfeita em série, pela relação:

$$N = \frac{\tau^2}{\sigma^2}$$

Onde  $\tau$  é a relação entre o volume total do reator pela vazão afluyente e  $\sigma$  é a variância entre os valores obtidos para a distribuição dos tempos de residência (FOGLER, 2008).

### 3.5 DISPERSÃO DE TRAÇADORES EM MEIO AQUOSO

De acordo com Bird et al. (2006), quando um fluido está sujeito a um escoamento, ocorre a mudança de posição das suas partículas internas. Essa mudança de posição é definida pela velocidade de escoamento. Em um meio aquoso, cada uma das partículas apresenta uma velocidade diferente em direções diferentes. Logo, a velocidade de escoamento para uma partícula de um líquido ( $\vec{V}$ ) é dada pela soma componentes x, y e z em um sistema cartesiano de coordenadas (equação 1).

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{e}_x + V_y \cdot \vec{e}_y + V_z \cdot \vec{e}_z \quad (7)$$

De acordo com a velocidade, ocorrem variações no modo em que um escoamento ocorre. O primeiro estudo acerca da estrutura interna dos escoamentos foi realizado por Reynolds. Em tal estudo, chegou-se a conclusão que os regimes de escoamento dos fluidos podem ser classificados em laminar, de transição e turbulento. No escoamento laminar, as partículas do fluido se movem em camadas ou lâminas, de modo suave, ao passo que no escoamento turbulento, ocorre uma mistura rápida das partículas do fluido à medida que elas se movem com as suas componentes de velocidades tridimensionais (PORTO, 2001).

O número de Reynolds (Equação 8) depende da viscosidade cinemática do líquido ( $\nu$ ), da velocidade média de escoamento ( $V$ ), bem como do comprimento característico ( $L_c$ ) do tubo de escoamento (INCROPERA et al, 2007).

$$Rey = \frac{V_e.L_c}{\nu} \quad (8)$$

De acordo com Netto e Fernández (2001), para tubulações, escoamentos que possuem um número de Reynolds inferior a 2000 são classificados como laminares, escoamentos com número de Reynolds maiores ou iguais a 2000 e menores ou iguais a 4000 são classificados como escoamentos de transição e, quando o número de Reynolds é superior a 4000, o escoamento é classificado como turbulento.

O regime de escoamento a que um líquido está submetido influencia diretamente a forma com que ocorre a transferência de massa do soluto dentro do solvente. Em meios estáticos ou em escoamentos laminares, a transferência de massa das partículas do soluto dentro do solvente aquoso se dá pelo processo da difusão molecular, ao passo que, em meios em que há movimento do solvente ou, escoamento turbulento a transferência de massa das partículas do soluto se dá pelo processo de convecção (BIRD et al., 2006)

### 3.5.1 Difusão de traçadores em meio aquoso

De acordo com Bird et al. (2006), difusão é o transporte molecular de uma substância relativo a uma outra substância. A difusão, também pode ser chamada de difusão mássica, difusão por gradiente de concentração ou ainda como difusão ordinária.

Segundo Lito et al. (2013), o coeficiente de difusão infinita de um traçador é importante para a realização de simulações, projeto e operação de reatores para os mais diversos tipos de tratamento. Roma (2003) define o coeficiente de difusão infinita como aquele que indica a intensidade que o transporte de massa pode ocorrer e é função do soluto e do solvente da solução. Desse modo, a difusividade é uma propriedade binária, isto é, depende das duas espécies químicas envolvidas. A unidade do coeficiente de difusividade é dada em m<sup>2</sup>/s no sistema internacional (SI). A variação da difusividade para as mais diversas substâncias apresenta uma ampla faixa de domínio, variando de 3,5.10<sup>-9</sup> cm<sup>2</sup>/s para o cádmio em cobre e chegando até 1,32 cm<sup>2</sup>/s para o hidrogênio em gás hélio.

A difusão binária, isto é, a difusão de um componente quando dissolvido em outro é regida pela lei de Fick (1855). Uma substância com uma alta concentração



em um determinado meio tende a difundir as suas moléculas até que elas ocupem de forma homogênea todo o espaço disponível. A movimentação das moléculas se dá devido a diferença de concentração em diferentes regiões do soluto dentro do solvente. A equação de Fick para o processo de difusão molecular é dada por:

$$\dot{m}_a = -D_{AB} \frac{dC_A}{dL} \quad (9)$$

Onde  $D_{AB}$  é o coeficiente de difusividade da substância A no meio B,  $dC_A/dL$  é o gradiente de concentração da substância A em relação à distância L segundo a direção do fluxo de massa  $\dot{m}_a$  da substância A.

### 3.5.2 Dispersão de traçadores por convecção em meio aquoso

No processo de transporte por convecção, segundo Roma (2003), as partículas do soluto são transportadas pelo solvente em movimento, através das suas linhas de fluxo, com a mesma velocidade de percolação do solvente. Portanto, quando há o movimento macroscópico do meio que contém o soluto, soma-se a transferência de massa do processo convectivo ao da transferência de massa por difusão molecular:

$$\dot{m}_a = -(D_{AB} + D_T) \frac{dC_A}{dL} \quad (10)$$

Onde  $D_T$  é a componente de difusividade turbulenta. De um modo geral, a componente turbulenta ( $D_T$ ) é muito maior que a componente de difusividade. Desse modo, em escoamentos altamente turbulentos, a componente  $D_{AB}$  pode ser negligenciada.

## 3.6 COLMATAÇÃO EM SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS

De acordo com Kadlec e Wallace (2009), um SAC recém construído apresentará sua condutividade hidráulica ( $k$ ) máxima e, uma vez que o sistema é colocado em operação, a condutividade hidráulica do sistema irá decair. Se a terça parte dos poros da camada suporte estiver colmatada, a condutividade hidráulica corresponderá a apenas 10% da condutividade hidráulica máxima. Esse fenômeno

de colmatação deve ser levado em conta quando da construção de um sistema de alagado construído, a fim de se evitar inundações. A colmatação da camada suporte de um SAC pode ocorrer por quatro mecanismos: deposição de sólidos suspensos na região da camada suporte, acumulação de matéria orgânica na zona de alimentação de vazão da camada suporte, deposição de precipitados provenientes de reações químicas na camada suporte e também o crescimento das raízes das plantas que ocupam o espaço vazio entre o agregado graúdo.

Matos et al. (2015) comparoam o grau de colmatação em dois SAC de escoamento horizontal subsuperficial, para o tratamento de esgoto gerado por comunidades de até 50 habitantes. O traçador utilizado foi o cloreto de sódio. O autores verificaram que após sete anos de operação, o SAC plantado se encontrava mais colmatado e, conseqüentemente com uma eficiência hidráulica menor que o não plantado e afirma que a ocorrência de tal fenômeno também deve ser levada em conta quando da concepção de um SAC.

### 3.7 SOFTWARE MATLAB<sup>®</sup>

O nome do software provém da junção das iniciais das palavras de língua inglesa "*matrix*" e "*laboratory*"<sup>2</sup>. É um programa utilizado em cálculos matemáticos, modelagens e simulações, análises numéricas e processamentos, elaboração e visualização de gráficos, desenvolvimento de algoritmos e uma imensidade de outras funções. É amplamente utilizado em centros de pesquisa, universidades e nas indústrias (GILAT, 2006).

O elemento básico de informação do MATLAB<sup>®</sup> é uma matriz. Além de operações usuais com matrizes, o programa fornece a operação rápida com vetores, de modo a tornar possível a manipulação de dados de diversas maneiras. Também, é possível a incorporação de pacotes elaborados para cálculos pré-definidos, ou ainda, a junção de diversos códigos para se gerar uma nova rotina de cálculo (HANSELMAN e LITTLEFIELD, 2003).

---

<sup>2</sup> Os termos equivalentes em língua portuguesa são "matriz" e "laboratório"

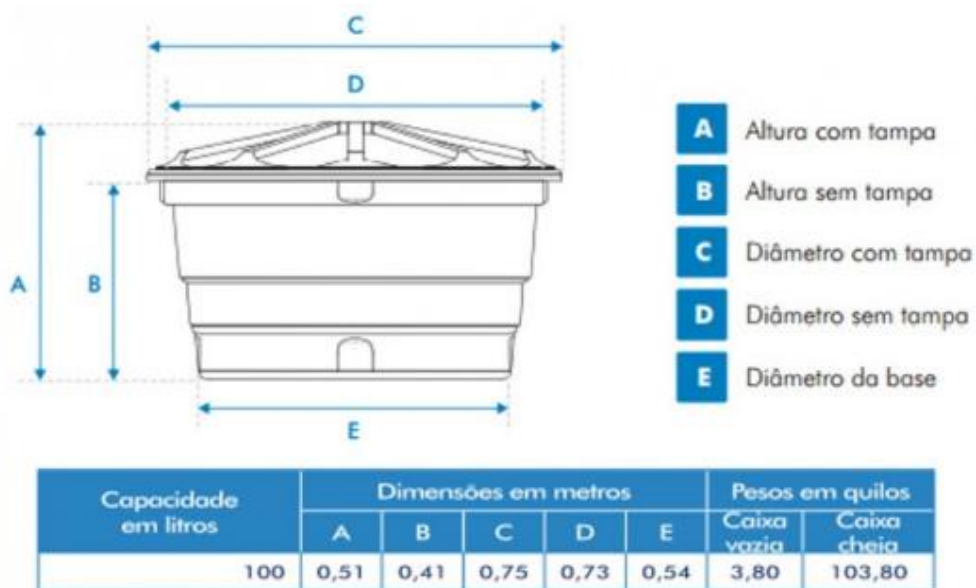
## 4. METODOLOGIA

A metodologia apresentada a seguir teve por objetivo auxiliar na avaliação hidrodinâmica do SAC nas diferentes condições de escoamento. O experimento descrito a seguir foi montado de modo a fornecer subsídios para a implantação de um sistema real para tratamento de concentrado salino, o qual é objeto de estudo de pesquisas paralelas.

### 4.1 MONTAGEM DO SISTEMA

O protótipo do SAC foi montado em um tanque de polietileno com capacidade de 100 litros, com diâmetro inferior de 0,54 m, diâmetro superior de 0,73 m e altura total de 0,41 m (Figura 7).

FIGURA 7- MEDIDAS DO TANQUE UTILIZADO NA MONTAGEM DO SAC, FORNECIDAS PELO FABRICANTE

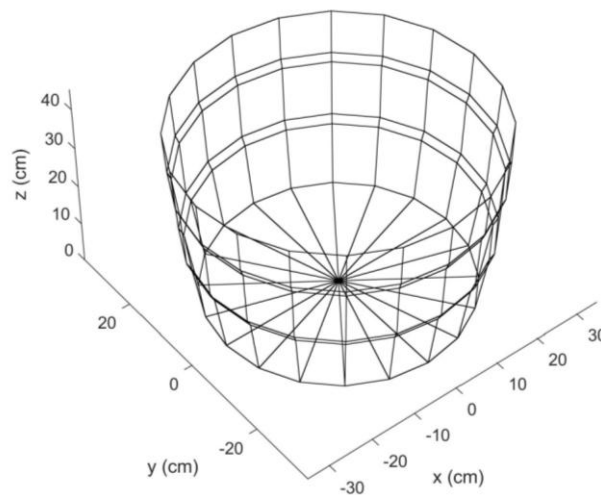


Fonte: Fortlev, 2017

Os pontos para a possível coleta de amostras e para as medições realizadas foram atrelados a um sistema de eixos coordenados (Figura 8) traçando-se uma malha formada pela interseção de linhas paralelas e perpendiculares igualmente espaçadas a cada 10 cm (Figuras 9, 10, 11 e 12), tendo a origem - coordenada

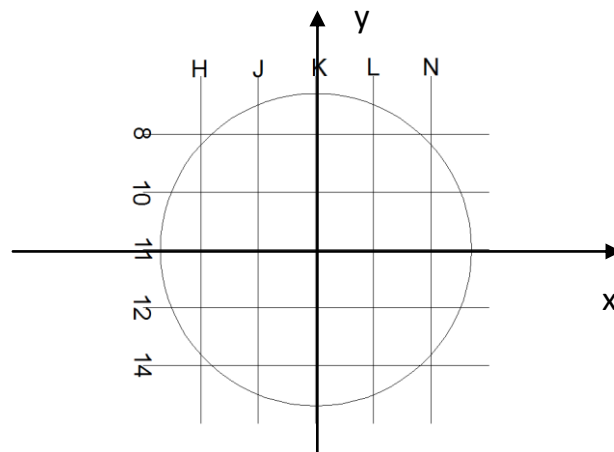
(0,0,0) - no centro do fundo do tanque. Foram instalados eletrodos de medição nas duas linhas perpendiculares centrais do tanque e também nos quatro pontos formados pela malha ao redor do centro do tanque. Os pontos de medição foram nomeados pela intercessão dos eixos que se cruzam no interior do tanque (Tabela 1). Também foram fixadas mangueiras acopladas às seringas para possível coleta de amostras. A malha para medição da concentração de sal e também instalação das mangueiras com seringas foi colocada no fundo do nas alturas de 7,5, 15 e 22,5 cm.

FIGURA 8 - SISTEMA CARTESIANO DE COORDENADAS ADOTADO PARA O VOLUME DE CONTROLE E REPRESENTAÇÃO "WIRE FRAME" DOS CONTORNOS DO TANQUE DE ENSAIOS.



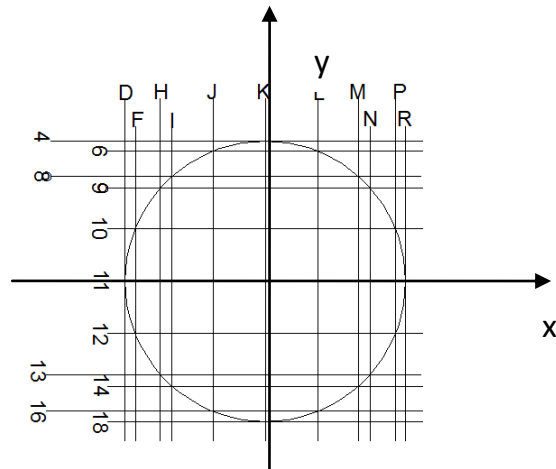
Fonte: O Autor, 2017.

FIGURA 9- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕEM A MALHA (FUNDO).



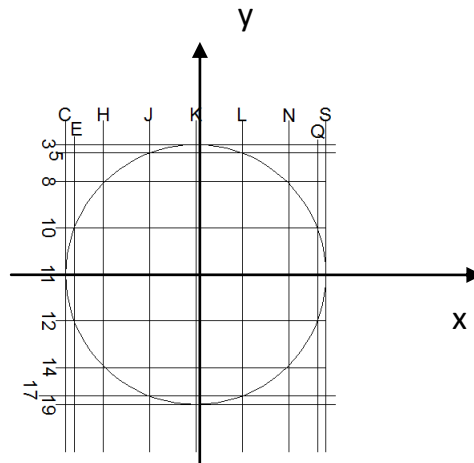
Fonte: O Autor, 2017.

FIGURA 10- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕEM A MALHA (NÍVEL 7,5 CM).



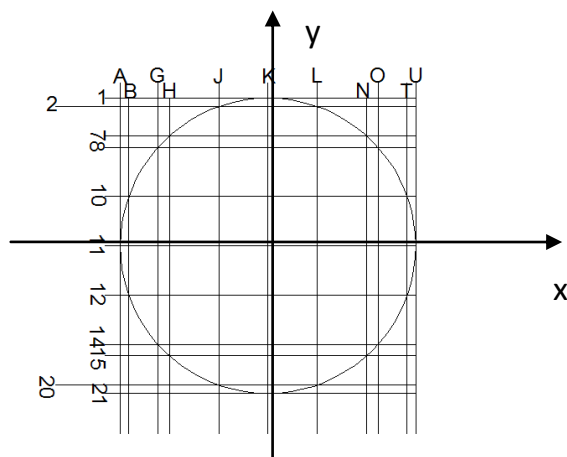
Fonte: O Autor, 2017.

FIGURA 11- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕEM A MALHA (NÍVEL 15 CM).



Fonte: O Autor, 2017.

FIGURA 12- PONTOS DE MEDIÇÃO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS QUE COMPÕEM A MALHA (NÍVEL 22,5 CM).



Fonte: O Autor, 2017.

Os níveis 0 cm, 7,5 cm, 15 cm, 22,5 cm e 27 cm são chamados respectivamente de Fundo, Nível 1, Nível 2, Nível 3 e Nível 4. Com base nessa definição cada um dos pontos localizados na malha instalada no tanque recebe uma nomenclatura, a qual consiste de um algarismo numérico (0, 1, 2, 3 e 4) para cada um dos respectivos níveis em que se encontra, consiste também de uma letra, a qual corresponde à coordenada do eixo x e também um número, correspondente à sua localização em relação ao eixo y. A Tabela 1 apresenta os pontos estabelecidos no interior do tanque, bem como as suas respectivas coordenadas.

TABELA 1 - PONTOS DO GRID PARA  
TRAÇADOR

OBTENÇÃO DO IMAGEAMENTO DA PLUMA DE

(continua)

Ponto de medição	Cota x	Cota y	Cota z
OK8	0	20	0
OK10	0	10	0
OH11	-20	0	0
OJ11	-10	0	0
OK11	0	0	0
OL11	10	0	0
ON11	20	0	0
OK12	0	-10	0
OK14	0	-20	0
OJ12	-10	10	0
OL12	10	-10	0
OL10	10	10	0
OJ10	-10	10	0
1K8	0	20	7,5
1K10	0	10	7,5
1K11	0	0	7,5
1K12	0	-10	7,5
1K14	0	-20	7,5
1k18	0	-26,75	7,5
1H11	-20	0	7,5
1J11	-10	0	7,5
1L11	10	0	7,5
1N11	20	0	7,5
1J12	-10	-10	7,5
1J10	-10	10	7,5
1L12	10	-10	7,5
1L10	10	10	7,5
2J12	-10	-10	15

TABELA 1 - PONTOS DO GRID PARA  
TRAÇADOR

OBTENÇÃO DO IMAGEAMENTO DA PLUMA DE

(conclusão)

Ponto de medição	Cota x	Cota y	Cota z
2L12	10	-10	15
2K3	0	28	15
2K10	0	10	15
2K11	0	0	15
2K12	0	-10	15
2K14	0	-20	15
2S11	28	0	15
2N11	20	0	15
2L11	10	0	15
2J11	-10	0	15
2H10	-20	10	15
2C11	-28	0	15
3K8	0	20	22,5
3K10	0	10	22,5
3K12	0	-10	22,5
3K14	0	-20	22,5
3H11	-20	0	22,5
3J11	-10	0	22,5
3L11	10	0	22,5
3N11	20	0	22,5
3L10	10	10	22,5
3J10	-10	10	22,5
3L12	10	-10	22,5
3J12	-10	-10	22,5
4H11	20	0	27,5
4K11	0	0	27,5
4N11	-20	0	27,5
4K14	0	-20	27,5
4K8	0	20	27,5

FONTE: O Autor, 2017.

Na Figura 13, mostra-se a montagem do sistema após a instalação da malha para colocação dos eletrodos que foram utilizados para medição indireta de condutividade elétrica e também mangueiras acopladas às seringas, em caso de necessidade de extração de amostras pontuais para conferência. Na Figura 14 o sistema está montado na posição utilizada para os ensaios realizados, onde a solução salina de traçador escoar por gravidade do tanque superior. Na Figura 15 o sistema se encontra com a camada de meio suporte para a realização de parte dos

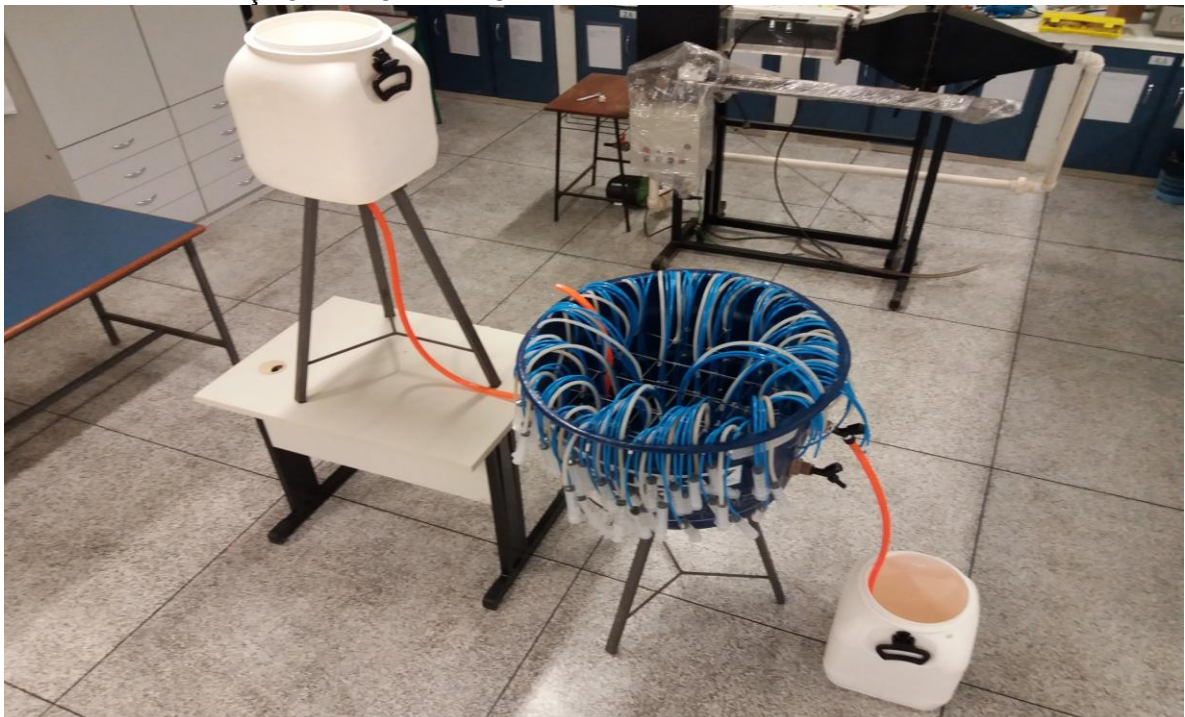
ensaios e também com os eletrodos acoplados aos pontos de medição e à placa *protoboard*.

FIGURA 13- MONTAGEM DO SISTEMA PARA EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS PARA A AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA



Fonte: O Autor, 2016.

FIGURA 14- MONTAGEM DO SISTEMA PARA EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS PARA O AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA



Fonte: O Autor, 2016.



FIGURA 15- TANQUE UTILIZADO PARA OS TESTES COM CAMADA SUPORTE E OS ELETRODOS DE MEDIÇÃO INDIRETA INSTALADOS.



Fonte: O Autor, 2018.

#### 4.2 AFERIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE TRAÇADOR SALINO NOS PONTOS DE COLETA

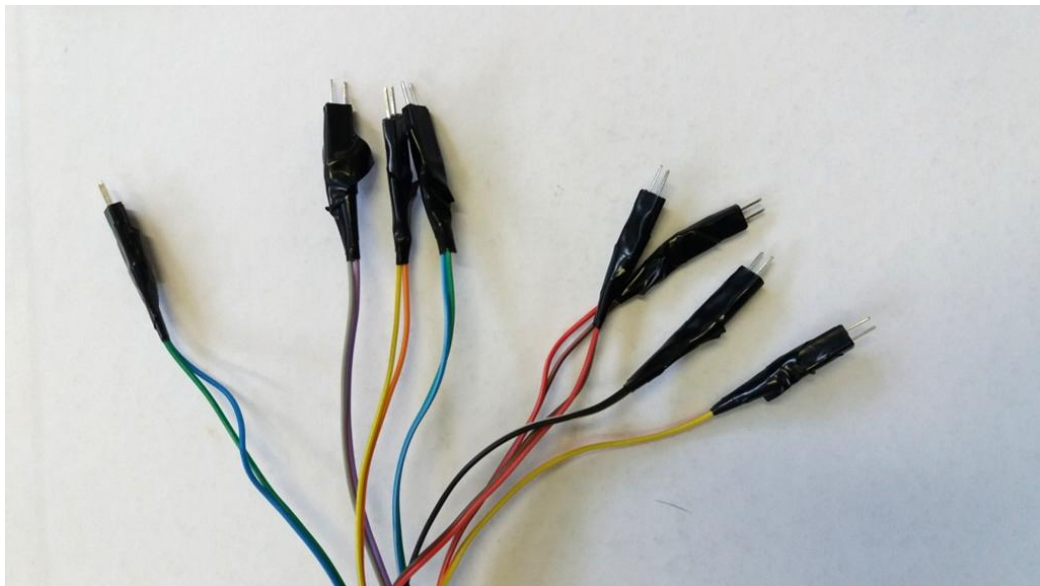
Para obtenção dos parâmetros numéricos do deslocamento da pluma de traçador de sal no interior do tanque foram realizadas medidas indiretas da concentração de sal em diferentes intervalos de tempo nos pontos de medição determinados nas interseções da malha por meio de um eletrodo. Os eletrodos foram colocados nas duas linhas perpendiculares que passam pelo centro do tanque. Tais concentrações foram plotadas em gráficos tridimensionais no contorno do tanque utilizado com o auxílio do *software* MATLAB<sup>®</sup>. Assim, para cada tempo em que a concentração de sal foi medida, tem-se a representação gráfica de como ela se encontra distribuída no volume de controle.

#### 4.2.2 Montagem do circuito elétrico para determinação indireta de condutividade elétrica

Para a determinação das concentrações de traçador em cada um dos pontos de interseção dos eixos que foram utilizados para modelagem da obtenção da mancha, foi acoplado um eletrodo para medição indireta de condutividade.

O eletrodo consiste de dois conectores para arduino do tipo macho (Figura 16), os quais foram colocados lado a lado paralelamente e, em seguida, foram isolados, de forma que as saídas dos dois conectores *jumper* ficassem alinhadas uma com a outra, a fim de se obter uma uniformidade em todos os eletrodos adaptados para as medições indiretas realizadas nesse trabalho.

FIGURA 16- ELETRODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.



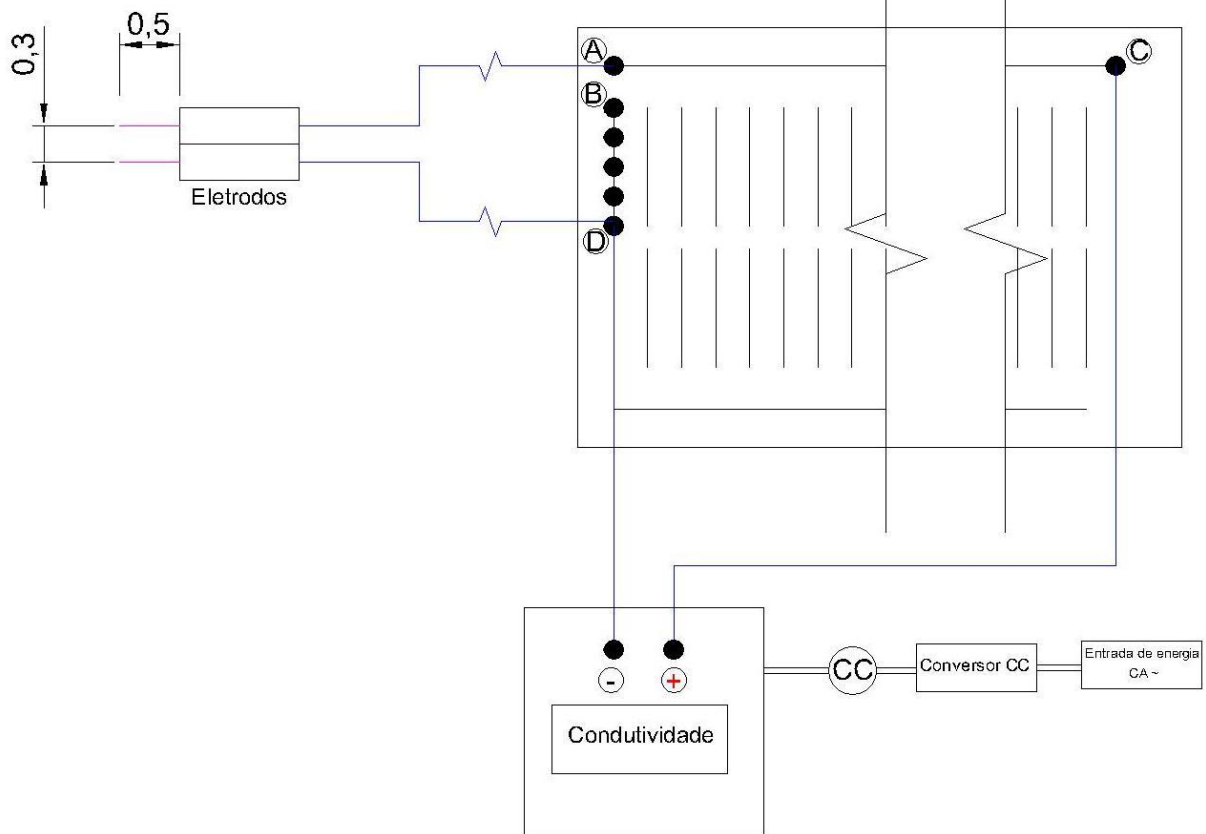
Fonte: O Autor, 2018.

Em cada ponto de medição foi instalado um eletrodo de dois conectores metálicos. Cada um dos conectores possui um comprimento de 5 mm e estão separados por uma distância de 3 mm entre si (Figura 17). De cada um dos polos do eletrodo, saem dois fios de bitola 0,5 mm e comprimento de 2 metros, cada um ligado a um conector para arduino do tipo macho.

Cada eletrodo acoplado a um determinado ponto de medição foi conectado à placa *protoboard* (Figura 18) da seguinte maneira: um dos conectores foi ligado ao ponto A, ou a um dos pontos contidos no circuito formado pelos pontos localizados

na linha entre A e C e, o outro conector foi ligado ao ponto D ou ao ponto correspondente nos circuitos paralelos à linha BD. O segundo conector deve estar alinhado com o primeiro que se encontra no circuito da linha superior AC.

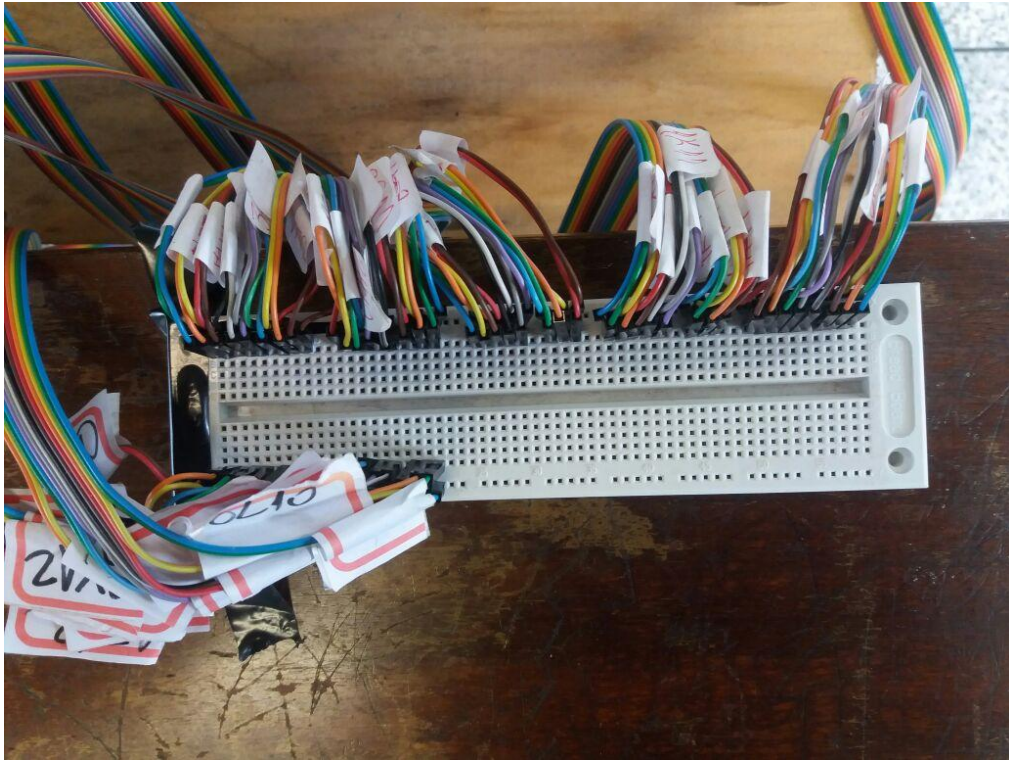
FIGURA 17- CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.



Fonte: O Autor, 2017.

A seguir, foi instalado o equipamento IXIAN™ *Conductivity Transmitter* da Empresa *Atlas Scientific* para medição indireta da condutividade realizada com os eletrodos instalados. A conexão do equipamento à placa *protoboard* se deu com conectores para arduíno do tipo macho (Figura 18). Um dos conectores foi instalado de maneira fixa ao ponto C e o outro foi inserido no ponto B. Desse modo, o equipamento mostrou em seu visor uma medida indireta de condutividade para o primeiro ponto. Para realizar a medição para os demais pontos, manteve-se fixo o conector no ponto C e o que estava inserido no ponto B foi deslocado para a direita, em cada uma das linhas com circuitos paralelos à linha BD. Foram coletadas as medidas indiretas para cada um dos 56 pontos de medição instalados no interior do volume de controle.

FIGURA 18- DETALHE DA PLACA *PROTOBOARD* COM OS ELETRODOS PARA MEDIÇÃO INDIRETA DE CONDUTIVIDADE.



Fonte: O Autor, 2018.

#### 4.2.3 Medição indireta da condutividade elétrica do traçador salino

A medição de condutividade elétrica para os pontos estudados no interior do tanque não seria viável com a extração de amostras de cada um dos pontos analisados no interior do tanque, pois o nível d'água no tanque iria reduzir e, também, o tempo para a coleta das amostras não era tecnicamente viável, pois a pluma de traçador apresenta variações no tempo. Desse modo, a coleta de amostras e a sua aferição de condutividade elétrica com um condutímetro tradicional de laboratório não seria adequada. Desse modo, fez-se uma adaptação do sistema de medição para se medir a condutividade elétrica de maneira indireta.

Primeiramente, aferiu-se o valor mostrado no visor do equipamento IXIAN™ Conductivity Transmitter, o qual é o valor indireto da condutividade elétrica para esse experimento. Com o valor mostrado no visor foi realizada a conversão para um valor equivalente de medição para a sonda de condutividade elétrica do aparelho. A seguir, a condutividade foi convertida para concentração de sal em  $\text{g.L}^{-1}$ .



#### 4.2.3.1 Análise de variância para a medida indireta de condutividade detectada nos eletrodos

Após a construção dos eletrodos que foram acoplados aos pontos de medição no interior do tanque, tomaram-se 5 eletrodos com seus respectivos fios de conexão e os terminais que seriam ligados à placa *protoboard* para um teste de análise de variância.

Foram preparadas dez soluções de sal em água com concentrações variando de  $0,04 \text{ g.L}^{-1}$  até  $0,4 \text{ g.L}^{-1}$  com intervalos de  $0,04 \text{ g.L}^{-1}$ . Também adotou-se uma amostra de água com concentração nula de sal. As soluções foram preparadas em balões volumétricos, diluindo-se a massa de sal necessária para se obter cada uma das concentrações. Para o preparo das soluções foi utilizada água do sistema de abastecimento público. Para a análise de variância foi realizado um experimento em blocos casualizados com 5 repetições.

Com cada um dos cinco eletrodos foram realizadas cinco medições da condutividade indireta de cada uma das soluções de sal. A seguir calculou-se a média da condutividade indireta para cada um dos eletrodos.

Calculou-se a normalidade para os valores medidos em cada uma das cinco repetições para cada um dos cinco eletrodos em todas as soluções preparadas. Foi realizada uma análise de variância com as médias obtidas em cada um dos cinco eletrodos para todas as concentrações de solução salina, a fim de se verificar se as medidas de condutividade elétrica indireta se diferiam estatisticamente para os eletrodos construídos.

#### 4.2.3.2 Conversão da medida de condutividade indireta para condutividade elétrica padrão da sonda e concentração de sal

Uma vez aferido o valor indireto mostrado no visor do aparelho IXIAN™ Conductivity Transmitter, a medida indireta foi convertida para a condutividade elétrica correspondente da sonda do equipamento. A sonda utilizada é comercializada pela empresa *Atlas Scientific*, sendo o modelo utilizado "*Conductivity K 0.1*".

Após a calibração da sonda com a solução padrão de calibração disponibilizada pelo fabricante, procedeu-se a elaboração da curva que relaciona a condutividade elétrica ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ) aferida pela sonda nas soluções de traçador salino

previamente preparadas com concentrações variando de 0,04 g.L<sup>-1</sup> até 0,4 g.L<sup>-1</sup> com intervalos de 0,04 g.L<sup>-1</sup>.

Com o auxílio de planilha eletrônica, foi elaborada uma regressão a fim de se relacionar com uma função matemática a concentração de condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) com a concentração de sal nas soluções (g.L<sup>-1</sup>).

No capítulo de resultados deste trabalho são apresentadas as equações, curvas de regressão e os parâmetros estatísticos mencionados nesta metodologia.

#### 4.3 MAPEAMENTO DA PLUMA DE TRAÇADOR SALINO NO INTERIOR DO RECIPIENTE

Uma vez determinadas as concentrações de traçador salino presentes em cada um dos pontos amostrados, procedeu-se, com o auxílio do *software* MatLab<sup>®</sup>, ao processamento das imagens para obtenção da pluma de sal.

Os dados experimentais foram processados usando técnicas numéricas em rotinas computacionais desenvolvidas a partir da plataforma MatLab<sup>®</sup>.

Uma das considerações na análise hidrodinâmica leva em conta a Equação da Continuidade (Equação 11), a fim de se obter a concentração de traçador para cada intervalo de tempo.

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (11)$$

Deste modo, é possível observar a distribuição da pluma salina no espaço e no tempo, monitorando a seção de entrada e a seção de saída, bem como qualquer seção transversal que possa ser de interesse com a obtenção de parâmetros como o fluxo ou a descarga de massa. Com isso é possível identificar percursos, deposições e diversas características espaciais e temporais para o diagnóstico hidrodinâmico.

Considerando que a massa específica ( $\rho$ ) do líquido é constante no tempo, tem-se:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (11a)$$

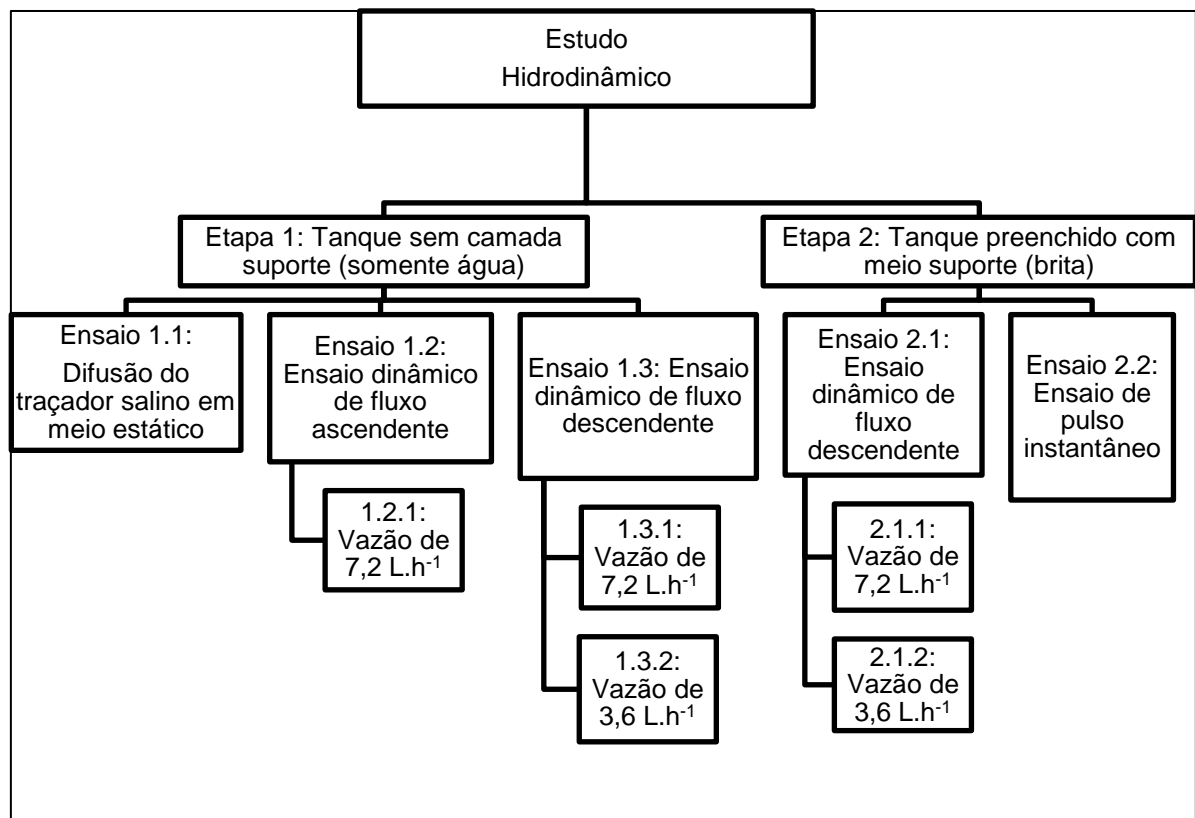
$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (11b)$$

Sendo a expressão 11b a Equação da continuidade na forma diferencial dos fluidos incompressíveis.

#### 4.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em duas etapas (Figura 19), sendo em uma, o tanque preenchido apenas com água do sistema de abastecimento e a configuração original do SAC, onde foi adicionada uma camada de 27 cm de brita nº1. Para a brita que compõe o meio de suporte do SAC, o índice de vazios medido foi de 45%.

FIGURA 19- ENSAIOS REALIZADOS PARA A AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DO TANQUE QUE COMPÕE O SAC.

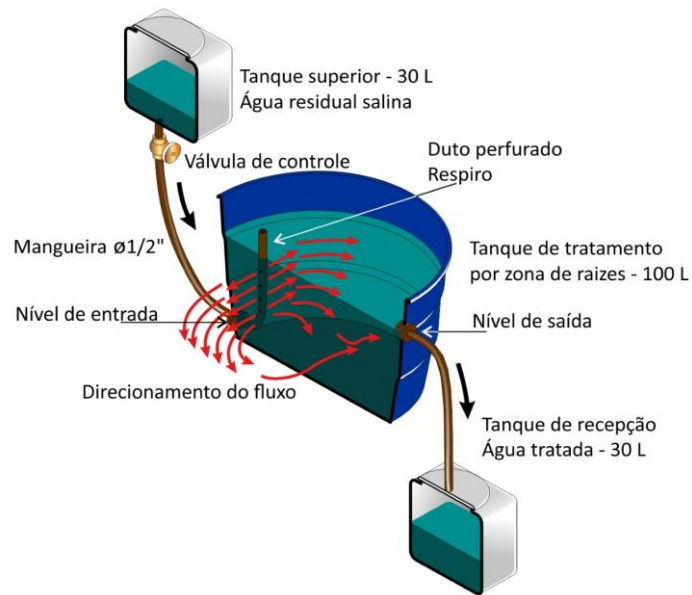


Fonte: O Autor, 2017.

Os ensaios, conforme a figura 19, foram realizados em duas configurações de escoamento: uma ascendente (Figura 20) e outra descendente (Figura 21).

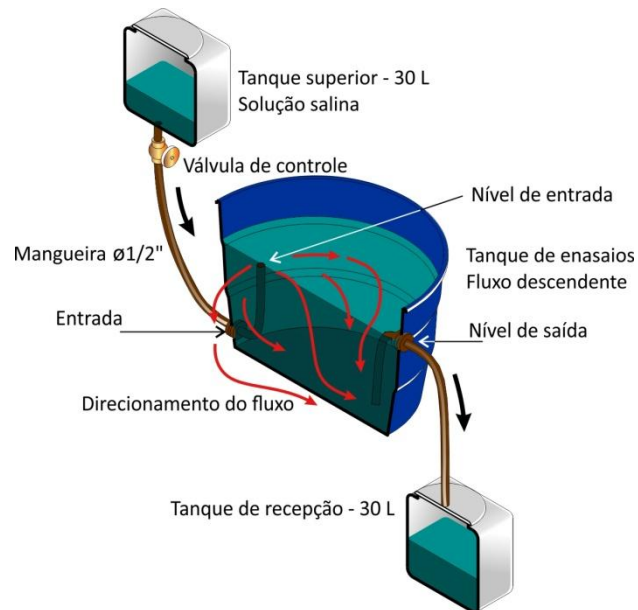
A configuração ascendente de escoamento é uma adaptação do SAC com escoamento do tipo horizontal subsuperficial e o SAC com escoamento ascendente é uma adaptação do modelo de escoamento vertical, já citados no capítulo 3 (revisão bibliográfica).

FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO DE ESCOAMENTO ASCENDENTE



FONTE: Adaptado de KUMMER et al, 2017.

FIGURA 21 - CONFIGURAÇÃO DE ESCOAMENTO DESCENDENTE



FONTE: Adaptado de KUMMER et al, 2017.

#### 4.4.1 Ensaios realizados com o tanque preenchido apenas sem meio suporte

##### 4.4.1.1 Ensaio de difusão do traçador salino em meio estático

O tanque foi completado com água do sistema de abastecimento até a sua capacidade máxima, ou seja, até o nível d'água atingir a cota da saída superior de



água, na flange colocada para esse fim. O volume total de água utilizada para esse ensaio foi de 75 L.

Foram preparados 100 mL de solução de sal de cozinha com concentração de 100 g/L. O preparo da solução consistiu na diluição de 10 g de sal em um volume de 100 mL de água do sistema de abastecimento.

Para o lançamento da solução salina no tanque foi utilizado um tubo plástico com 20 mm de diâmetro. O tubo foi colocado na posição vertical no centro do tanque. Para a inserção do tubo nesta posição, a sua ponta superior foi hermeticamente vedada, desse modo, impedindo a entrada de água do tanque para o interior do tubo plástico. Após o posicionamento, os 100 mL de solução salina foram inseridos no interior do tubo plástico, criando uma coluna líquida. O tubo foi então levantado lentamente, deixando a coluna de solução salina se espalhar pelo interior do tanque.

Para monitorar o espalhamento da pluma de traçador dentro do tanque, foram medidas as concentrações de traçador salino ao longo dos nós dos planos xz e yz do grid de medição. As coletas foram realizadas imediatamente após a liberação da solução de traçador, 4, 8, 24, 28, 32, 48, 52, 56, 60, 72, 76 e 80 horas após o lançamento da solução de sal no tanque, obtendo-se, desse modo, o tempo necessário para a dispersão completa do traçador no sistema, a qual denota-se pela distribuição uniforme da concentração no espaço de estudo.

#### 4.4.1.2 Ensaio dinâmico sem meio suporte com alimentação inferior

Ensaios realizados sem meio suporte consistem numa avaliação da propagação do traçador no tanque experimental sem que este contenha o leito de britas, ou seja, o tanque contém apenas água. Este tipo de ensaio visa comparar resultados com posteriores ensaios com meio suporte, ou seja, com leito de britas que é o componente existente no SAC.

Para essa configuração, o ensaio foi realizado com duas vazões diferentes, sendo uma de 7,2 L.h<sup>-1</sup> e outra mais lenta de 3,6 L.h<sup>-1</sup>. Tais vazões foram medidas regularizando o registro de entrada, para cada vazão, medindo o tempo necessário para encher o volume durante hora de escoamento em um recipiente graduado. Para esse ensaio e para os demais ensaios realizados posteriormente, encheu-se o tanque com água até a sua capacidade máxima. Preparou-se a solução de sal com

concentração de  $2 \text{ g.L}^{-1}$  e, a solução salina foi colocada no tanque de alimentação. A partir daí, iniciou-se a introdução de traçador no interior do sistema num sinal de 30 minutos, regulando-se o registro de entrada, a fim de se obter a vazão utilizada estabelecida para o ensaio. Após esse tempo, colocou-se água de abastecimento no tanque de alimentação e foi mantida a vazão constante para a entrada de água limpa, até a completa remoção da pluma de traçador do interior do sistema.

Durante a primeira hora de escoamento as medições de concentração nos pontos de medição foram realizadas a cada dez minutos. Posteriormente, a medição foi realizada a cada duas horas até o traçador se tornar indetectável.

#### 4.4.1.3 Ensaio dinâmico sem meio suporte com alimentação superior

Para a referida configuração, com alimentação superior e saída inferior sifonada para manutenção de nível da água no tanque, foram realizados dois ensaios distintos: o primeiro com uma vazão de  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$  e outro com uma vazão mais lenta de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ . O tanque foi preenchido com 75 litros de água de abastecimento. Preparou-se a solução de sal com concentração de  $2 \text{ g.L}^{-1}$  e, a solução salina foi colocada no tanque de alimentação. A partir daí, iniciou-se a introdução de traçador no interior do sistema num intervalo de 30 minutos, regulando-se o registro de entrada, a fim de se obter a vazão estabelecida para o ensaio. Após esse tempo, colocou-se água de abastecimento no tanque de alimentação e foi mantida a vazão constante para a entrada de água limpa, até a completa remoção da mancha de traçador do interior do sistema.

Durante a primeira hora de escoamento as medições de concentração nos pontos de medição foram realizadas a cada dez minutos. Posteriormente, a medição foi realizada a cada duas horas até o traçador se tornar indetectável, a fim de se obter o mapeamento da propagação da pluma de traçador salino no interior do tanque.

#### 4.4.2 Ensaio realizados com meio suporte

Nestes ensaios o tanque de experimentos recebe o leito de brita, componente do SAC. Os vazios do leito são preenchidos com água de

abastecimento e a propagação do traçador ocorre nestes interstícios. Nestes ensaios são reproduzidas as condições de operações inerentes ao SAC.

#### 4.4.2.1 Ensaio de fluxo descendente

Foi realizado de maneira similar aos ensaios realizados com o tanque sem meio suporte. Entretanto, nessa configuração, foram adicionados 30,5 L de água de abastecimento devido a presença da camada de brita. Foram realizados dois ensaios com as vazões utilizadas nos ensaios já citados (3,6 e 7,2 L.h<sup>-1</sup>), sendo injetado um pulso de 30 minutos de solução de traçador com concentração de 2 g.L<sup>-1</sup>. As medições de concentração no interior do tanque foram realizadas a cada 10 minutos, durante a primeira hora de escoamento e, após esse tempo, foram realizadas de hora em hora, a fim de se obter a evolução da propagação da mancha de sal no interior do tanque.

#### 4.4.2.2 Ensaio com injeção de pulso instantâneo de traçador salino

Preparou-se uma solução de 50 g.L<sup>-1</sup> de sal. Tomou-se 20 mL, os quais com o auxílio de uma seringa foram injetados na entrada no sistema, com presença de brita e 30,5 L de água. A entrada do sistema se localizava na parte superior do tanque, ocorrendo assim um fluxo descendente. A vazão utilizada para esse ensaio foi de 7,2 L.h<sup>-1</sup>.

Foram realizadas medidas da concentração de sal nos pontos pré-estabelecidos a cada 10 minutos na primeira hora de escoamento e, a seguir, foram efetuadas medições a cada 30 minutos de escoamento até a detecção da saída da mancha de traçador do volume de controle.

### 4.5 PARÂMETROS HIDRÁULICOS DERIVADOS DA DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA (DTR)

Os parâmetros hidráulicos foram calculados para todos os ensaios realizados, utilizando-se das concentrações aferidas na saída do escoamento do tanque em seus respectivos tempos.

O método de obtenção da distribuição dos tempos de residência (DTR) foi o mesmo descrito por Levenspiel (1999) no item 3.2.1 "Utilização de traçadores e distribuição dos tempos de residência (DTR)".

Calculou-se também o tempo de residência nominal ou teórico ( $t_n$ ), o tempo de residência média ( $t_m$ ), a eficiência hidráulica ( $\lambda$ ) conforme a revisão da literatura descrita em 3.3 (Parâmetros hidráulicos para a caracterização hidráulica de um SAC).

Foi calculado o índice de curto-circuitos (ICC) para cada um dos ensaios, o qual é dado por:

$$ICC = \frac{t_i}{t_m} \quad (12)$$

Onde  $t_i$  é o tempo no qual ocorre a primeira aparição do traçador na saída e  $t_m$  é o tempo de detenção médio (MATOS et al., 2015).

Calculou-se também a eficiência volumétrica, de acordo com a expressão proposta por Kadlec e Wallace (2009), através da expressão:

$$e_v = \frac{t_m}{t_n} \quad (13)$$

Onde  $t_m$  é o tempo de detenção hidráulica médio obtido a partir da curva DTR e  $t_n$  é o tempo de detenção nominal.

Foi calculado, ainda, o número "N", o qual é o valor do número de tanques de mistura perfeita em série, pela relação:

$$N = \frac{\tau^2}{\sigma^2}$$

Onde  $\tau$  é a relação entre o volume total do reator pela vazão afluyente e  $\sigma$  é a variância entre os valores obtidos para a distribuição dos tempos de residência (FOGLER, 2008).

## 4.6 PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL

### 4.6.1 Determinação e visualização de resultados

A partir dos dados esparsos de concentração obtidos por medição em pontos específicos do volume de controle em cada instante, foram processadas computacionalmente as operações de interpolação e extrapolação de forma a abranger todo o volume em uma malha tridimensional com células de 0,5x0,5x0,5 cm e resolução de 129x129x56 células ou 64,5x64,5x28 cm nas direções x, y e z de um sistema cartesiano de coordenadas. Neste sistema têm-se o valor da

concentração calculado a partir dos dados medidos em cada uma das 931896 células do volume de controle. Cada célula possui um volume de  $0,125 \text{ cm}^3$ , este volume é utilizado para obtenção da quantidade da massa contida no volume total, ou em volumes de regiões específicas de interesse para análise. A visualização da distribuição da massa no volume total, no espaço e no tempo, é proporcionada por meio de gráficos tridimensionais de volumes.

As interpolações ocorrem em duas etapas. A primeira etapa interpola os valores de concentração no plano bidimensional xy de cada nível de medição através de uma função de interpolação linear entre os dados medidos utilizando um algoritmo de interpolação entre pontos esparsos. A segunda etapa compreende a interpolação tridimensional entre planos xy. Nesta etapa os 56 níveis discretizados da malha tridimensional são preenchidos estabelecendo a distribuição completa de concentrações no volume de controle.

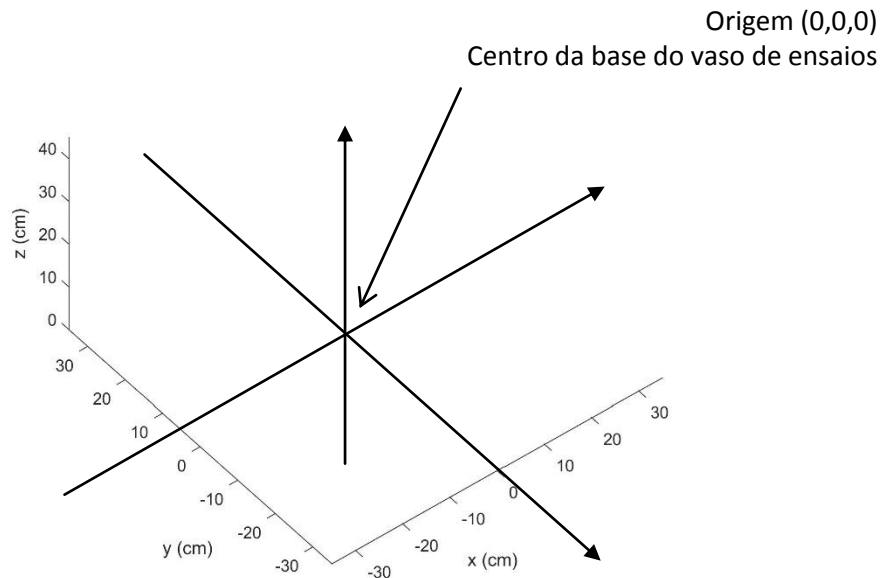
Até aqui o processamento ocorreu atuando sobre um volume prismático. Após as operações de interpolação o volume de controle sofre uma adequação de forma. Considerando o formato cilíndrico (trancos de cone) do vaso de ensaios, caixa de água comercial circular com 100 L de capacidade, o volume de controle tem sua conformação final estabelecida pelo “corte de células” fora da área circular definida para cada nível da malha tridimensional. Este “corte de células” é obtido atribuindo-se um valor “não número” para cada célula. O valor “não número” – “*not a number*” – NaN – é desconsiderado tanto em cálculos quanto em apresentações gráficas, sendo assim, foi a opção ideal para implantação das rotinas de resultados deste trabalho que envolvem a forma geométrica. Estas rotinas gráficas ou numéricas, elementos de embasamento e outros procedimentos computacionais estão consubstanciados nos subitens que são apresentados a seguir.

#### 4.6.1.1 Sistema de Coordenadas

O sistema de coordenadas, por meio do qual se consistiu o posicionamento, tanto de pontos de medição como pontos e regiões de interesse no volume de controle, se estabeleceu pelos eixos coordenados x, y, z, com origem (0,0,0) (cm) no centro da base do vaso de ensaios. O sistema abrange o intervalo [-32, 32] para o eixo x, [-32, 32] para o eixo y e [0, 40] para o eixo z com unidade em centímetro.

Com a Figura 22 mostra-se o lançamento dos eixos coordenados adotado para a visualização do sistema em vista diagonal.

FIGURA 22 – SISTEMA DE COORDENADAS EM VISTA DIAGONAL

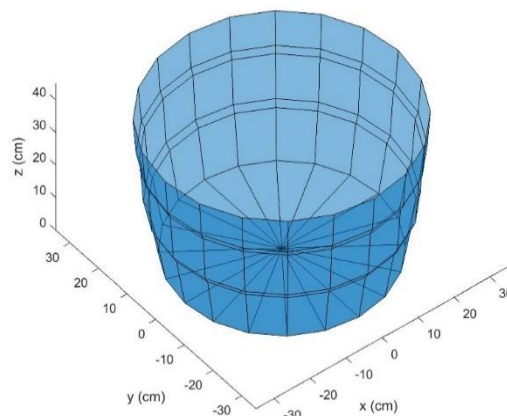


Fonte: O Autor, 2018.

#### 4.6.1.2 Volume de controle

O volume de controle tem a conformação geométrica dimensionada a partir de uma caixa da água comercial que foi utilizada para consecução de ensaios. Na Figura 23 pode-se observar essa conformação que foi obtida através de representação em modelo “*wireframe*” utilizando-se o comando “*cylinder*” – MatLab<sup>®</sup>, aplicado ao perfil real da caixa da água e eixo geratriz vertical central.

FIGURA 23 – MODELO GEOMÉTRICO 3D, WIREFRAME – VASO DE ENSAIOS – VOLUME DE CONTROLE.



Fonte: O Autor, 2018.

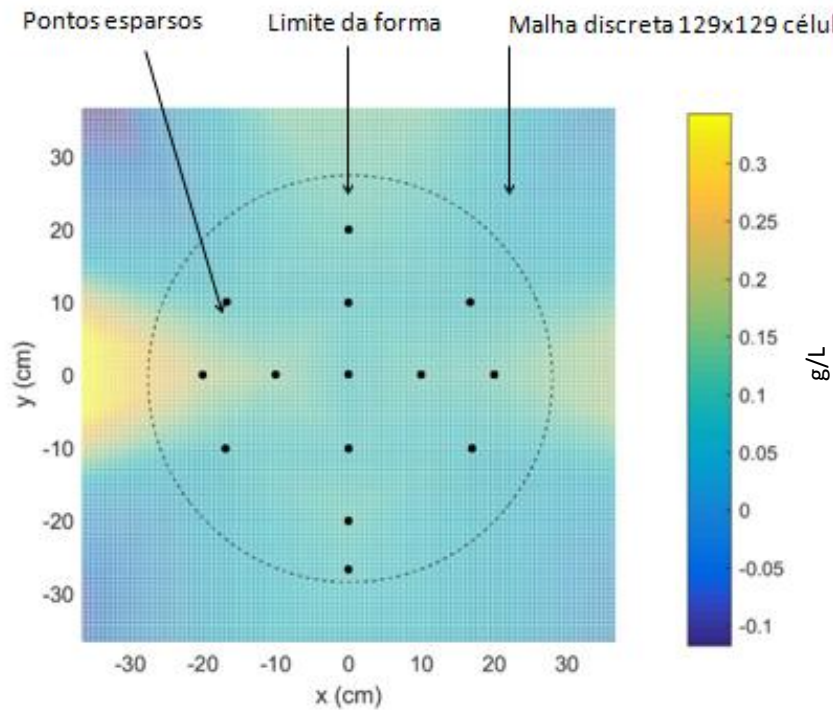
#### 4.6.1.3 Planos de visualização e isosuperfícies de concentração.

As medições no vaso de ensaios foram realizadas em planos horizontais, sendo coplanares no nível 0, coplanares no nível 7,5, coplanares no nível 15, coplanares no nível 22,5 e coplanares no nível 27,5 cm.

As medidas foram localizadas segundo os nós de uma malha quadrangular, compatível com o sistema de coordenadas e distribuída em cada plano com uma resolução de 10 cm. A interpolação horizontal refinou matematicamente esta malha para uma resolução de 0,5 cm utilizando um algoritmo de interpolação linear por meio da função de interpolação `scatteredInterpolant` – MatLab®. A Figura 24 mostra um exemplo desta interpolação para o nível 7,5 cm de um dos ensaios realizados neste trabalho. Na Figura 24 são mostrados os pontos de medição localizados nas linhas centrais do tanque e também os quatro pontos auxiliares ao redor do centro. Neste gráfico estão plotados os pontos de medida localizados de forma esparsa e o resultado da interpolação estendida ao plano xy. Também se percebe a distribuição da concentração neste plano segundo um mapa de cores “*colormap*”, o qual tem sua convenção em escala de cores indicada pela “*colorbar*” posicionada à direita. Na Figura 25 já se pode perceber a adequação da malha de discretização para a conformação circular do tanque de ensaios, a compatibilidade da visualização com a rede “*wireframe*” do tanque e o sistema de coordenadas, bem como a adequação da escala de cores aos valores de concentração. Convém salientar que em tempo de execução é possível rotacionar o gráfico para qualquer ângulo de visão, obter dados numéricos em qualquer parte do mapa de cores e mover o plano de corte para visualização em diferentes níveis.

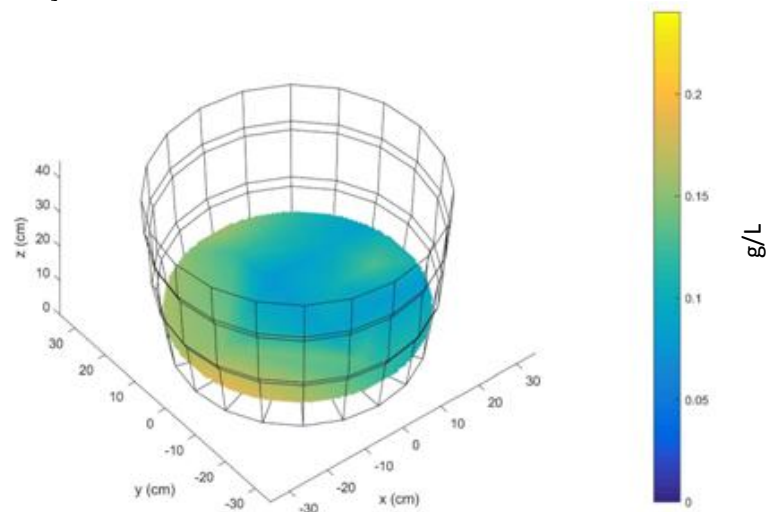
A interpolação vertical promove a extensão para todo o volume de controle dos dados de concentração refinados para uma malha tridimensional com células cúbicas de 0,5 cm de lado. Este processo de interpolação difere do anterior por atuar em 3 dimensões e utiliza o algoritmo “*interp3*” – MatLab®. Com esta etapa o processamento concede as condições finais para visualização, análise e diagnóstico das distribuições de concentrações no volume de controle, sua evolução no decorrer do tempo, além de outros dados importantes como o balanço de massa e o tempo estimado de detenção por aquisição de dados.

FIGURA 24 –MALHA HORIZONTAL DE INTERPOLAÇÃO DE DADOS – REFINAMENTO DE DADOS ESPARSOS PARA A MALHA COM RESOLUÇÃO 129 X 129 ELEMENTOS.



Fonte: O Autor, 2018.

FIGURA 25 – RESULTADO DA INTERPOLAÇÃO EM NÍVEL HORIZONTAL E POSTERIOR ADAPTAÇÃO DE FORMA.



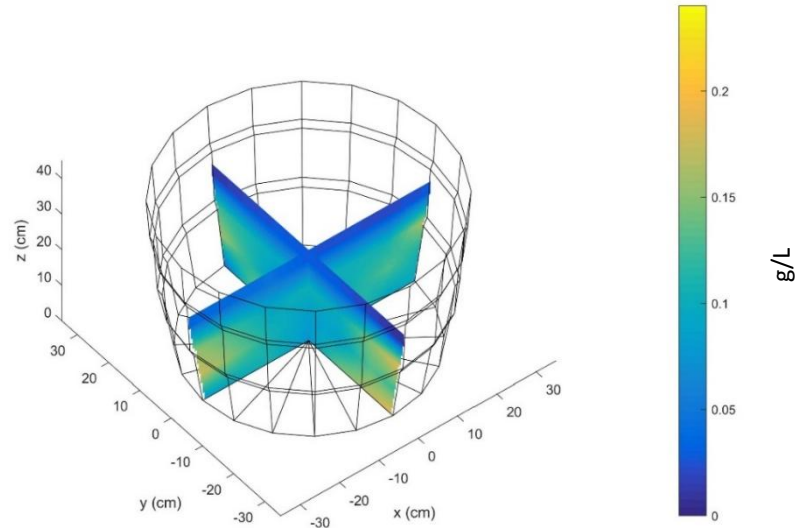
Fonte: O Autor, 2018.

A Figura 26 contém o gráfico 3D com dois cortes verticais no volume de controle para visualização da distribuição de concentrações em um determinado



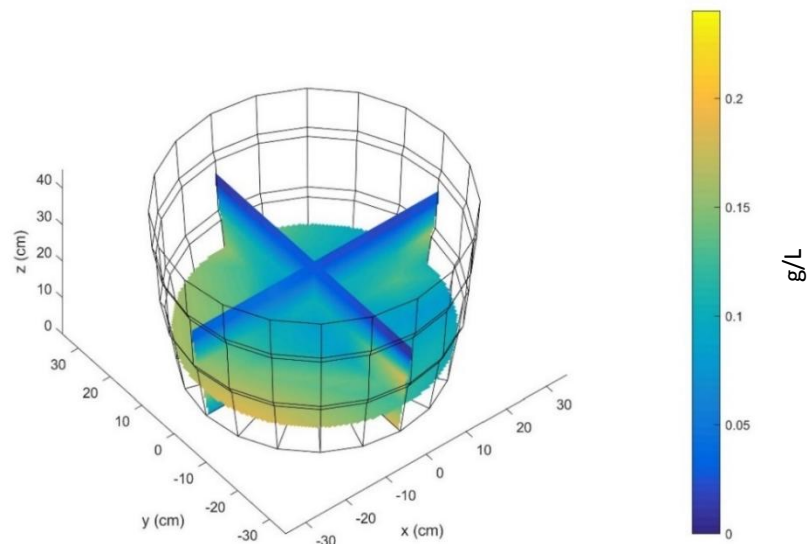
instante de medição. A Figura 27 contém a visualização em cortes verticais e horizontal simultaneamente.

FIGURA 26 – RESULTADO DA INTERPOLAÇÃO VERTICAL COM VISUALIZAÇÃO EM DOIS CORTES EM PLANOS VERTICAIS.



Fonte: O Autor, 2018.

FIGURA 27 – VISUALIZAÇÃO PADRÃO COM 3 PLANOS DE CORTE.

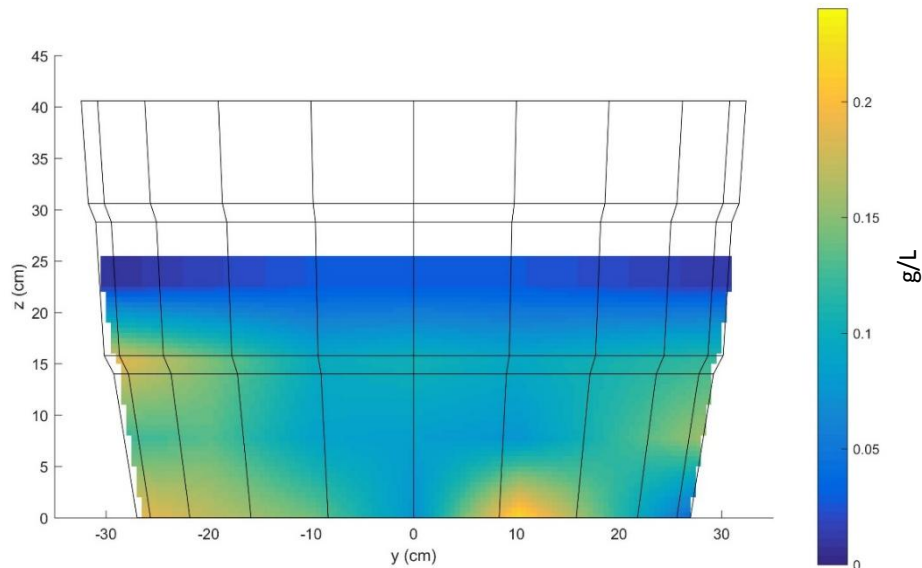


Fonte: O Autor, 2018.

A Figura 28 contém uma visualização em elevação – plano yz – que demonstra as facilidades de percepção da distribuição do traçador no volume de controle. Convém lembrar que o imageamento foi produzido para cada instante de medição, isto é, os modelos de distribuição da massa no volume de controle foram proporcionados ao longo de toda a série de medições temporais do ensaio de forma

a viabilizar o entendimento do processo de propagação do traçador no volume de controle ao longo do tempo.

FIGURA 28 – VISUALIZAÇÃO EM ELEVAÇÃO – PLANO XY.

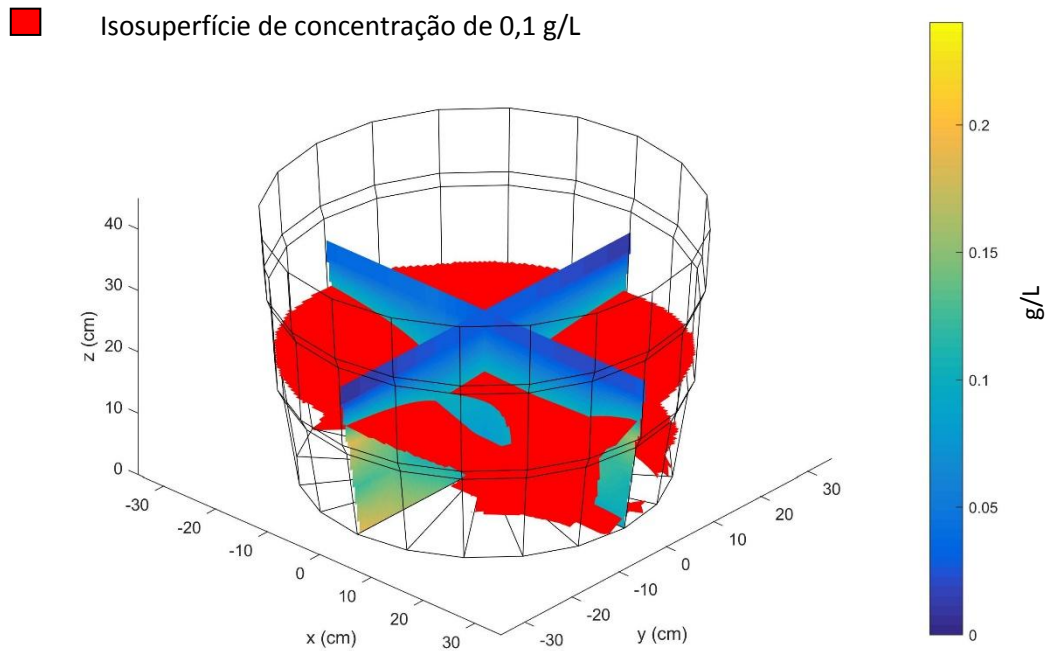


Fonte: O Autor, 2018.

A visualização em corte foi obtida por meio do comando “*slice*” – MatLab<sup>®</sup>. Este comando tem como argumentos as coordenadas de corte em planos ortogonais.

Além dos cortes em posições de interesse construiu-se isosuperfícies de concentração. Estas superfícies são construídas por meio de utilização do algoritmo “*isosurface*” – MatLab<sup>®</sup>. A isosuperfície pode ser construída através dos dados do volume com valores especificados de concentração e um mesmo gráfico pode conter diversas isosuperfícies. Estes gráficos podem ser úteis na detecção de regiões de estagnação, limites de tubos de corrente e de curto-circuito. A Figura 29 mostra um exemplo com visualização de isosuperfície de concentração para o valor de  $0,1 \text{ gL}^{-1}$ .

FIGURA 29 – INSERÇÃO DE ISOSUPERFÍCIE DE CONCENTRAÇÃO.

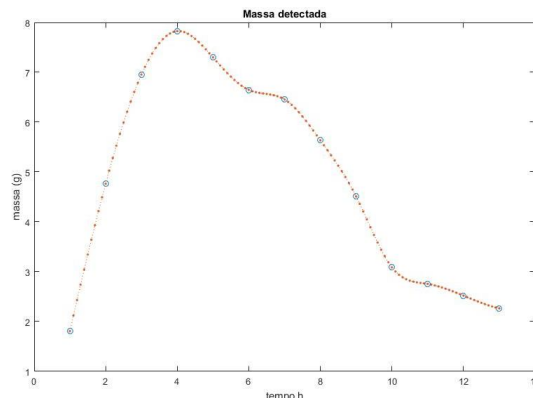


Fonte: O Autor, 2018.

A detecção de massa consiste na varredura da malha tridimensional por um algoritmo de *looping* que percorre célula por célula e acumula a massa por meio do somatório do produto entre a concentração ( $\text{gL}^{-1}$ ) da célula e o volume  $0,125 \cdot 10^{-3} \text{ L}$ .

A Figura 30 contém um exemplo de ensaio onde o gráfico massa X tempo apresenta os pontos de massa detectada em cada tempo de medição e complementa com uma curva de interpolação obtida com o algoritmo “interp1” – MatLab<sup>®</sup>.

FIGURA 30 – GRÁFICO DE MASSA DETECTADA AO LOGO DO TEMPO.



Fonte: O Autor, 2018.

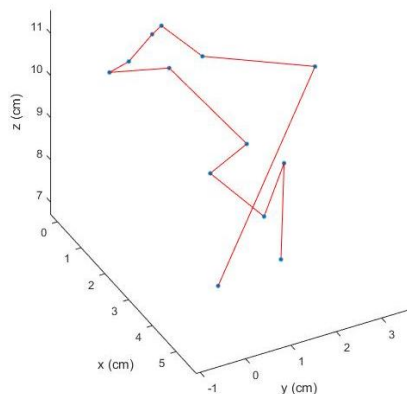
Por meio da detecção de massa é possível estabelecer o balanço de massa, o tempo de injeção de massa no sistema e sua quantidade comparando a massa injetada e a massa detectada e o tempo e quantidade de massa na saída do sistema, cruzando dados medidos com dados detectados.

O centro de massa é calculado pela varredura do volume e pelo cálculo do centro de gravidade deste volume considerando a massa detectada em cada célula e sua coordenada. O cálculo do centro de massa em cada momento do ensaio pode ser útil para percepção de eventuais caminhos preferenciais ou deposições de traçador no volume de controle. A Figura 31 contém um gráfico onde percebe-se a variação da posição do centro de massa ao longo de um ensaio. Ao se monitorar a variação do centro de massa da pluma de traçador pode-se detectar uma possível deposição de traçador no fundo ou zonas preferenciais de concentração da massa de traçador.

#### 4.6.3 Curvas de concentração.

A propagação de uma substância em um meio de suporte depende da distância da origem da emissão, da difusividade da substância no meio considerado, do eventual escoamento e velocidade deste meio de suporte em regimes laminares, de transição ou turbulentos.

FIGURA 31 – VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA AO LONGO DO TEMPO DE UM ENSAIO.



Fonte: O Autor, 2018.

Para efeitos práticos, após a integração das equações diferenciais originadas a partir Lei de Fick e nos balanços de massa, a previsibilidade da concentração para um instante, dependendo da aplicação, pode ter o seguinte aspecto:

$$C=(C_S-C_0).exp^{-kt} \quad (14)$$

Onde  $C_S$  é a concentração de saturação,  $C_0$  é a concentração inicial,  $k$  é um parâmetro de transferência de massa e  $t$  é o instante (VON SPERLIG, 2007).

Adaptando para o sistema deste trabalho, considerando as variáveis do sistema e distância fixa da emissão de traçador para cada nível de cálculo, a equação da concentração pode ser, por hipótese, modelada com o seguinte aspecto:

$$C = a.t.exp^{-(b.t^c)} + d \quad (15)$$

Onde:

- a e b são coeficientes relacionados com a difusividade, distância, velocidade e valores numéricos;
- c é uma potência do tempo t;
- d é uma concentração residual ou inicial;
- exp é a base neperiana = 2,718...

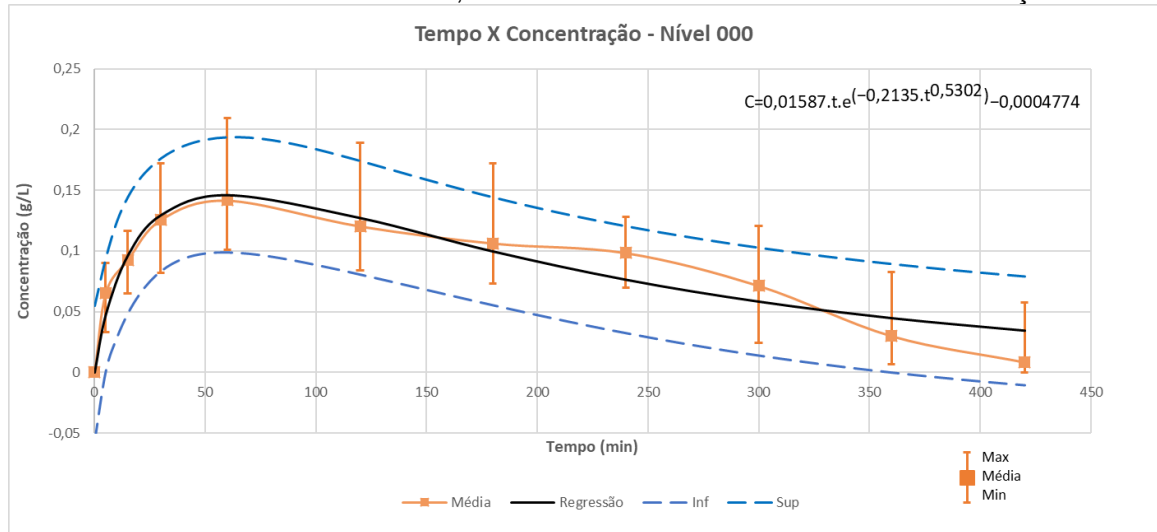
Considerando os valores médios da concentração em determinadas cotas z do volume de controle obtidos a partir dos dados medidos nestas cotas, pode-se estabelecer a regressão matemática para a equação modelada estimando-se os parâmetros “a”, “b”, “c” e “d” por meio de métodos numéricos de otimização como o método da regressão não linear dos mínimos quadrados. Este método é aplicado através da ferramenta de regressão “Curve Fitting Tool” – MatLab®, a qual proporciona também os intervalos de confiança para a modelagem resultante em níveis customizados, porém, como padrão em nível de 95% de confiança.

Um exemplo de resultado da aplicação desta ferramenta para um ensaio completo, utilizando-se os valores médios de concentração para o fundo do tanque ao longo do tempo encontra-se na Figura 32.

No gráfico da Figura 32 estão incluídas as concentrações médias medidas com as respectivas barras de erro que apresentam os valores de mínimo e máximo

obtidos, a curva e equação de regressão e os intervalos inferior e superior de confiança ao nível de 95%.

FIGURA 32 – MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO. CURVA DE RESULTADOS MÉDIOS, REGRESSÃO E INTERVALOS DE CONFIANÇA.



Fonte: O Autor, 2018.

A modelagem da concentração para as cotas z do volume de controle têm os seguintes objetivos:

- A predição de valores de concentração em qualquer tempo para a configuração adotada no ensaio;
- A estimativa matemática do instante de concentração máxima, suposto início de deposição de massa e consequente determinação do intervalo de ocorrência do tempo de detenção;
- A verificação da coerência do método de medição empregado neste trabalho quando comparado às equações de propagação tradicionais na literatura.

#### 4.6.4 Tempo de detenção real

Conforme a metodologia computacional descrita anteriormente é possível obter a massa de traçador contida no tanque a cada instante. Desse modo, foi estimado o tempo de detenção real para o ensaio descendente com camada suporte e vazão de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ .

A curva de massa obtida para o referido ensaio, isto é, com a saída do sistema aberta, foi comparada com uma curva de massa elaborada para o ensaio

realizado nas mesmas condições de escoamento com a saída de massa completamente fechada. A porcentagem de massa de deixa o sistema em cada unidade de tempo é calculada pela diferença de massa detectada no ensaio realizado com a saída de massa fechada com o ensaio em que a saída foi mantida aberta.

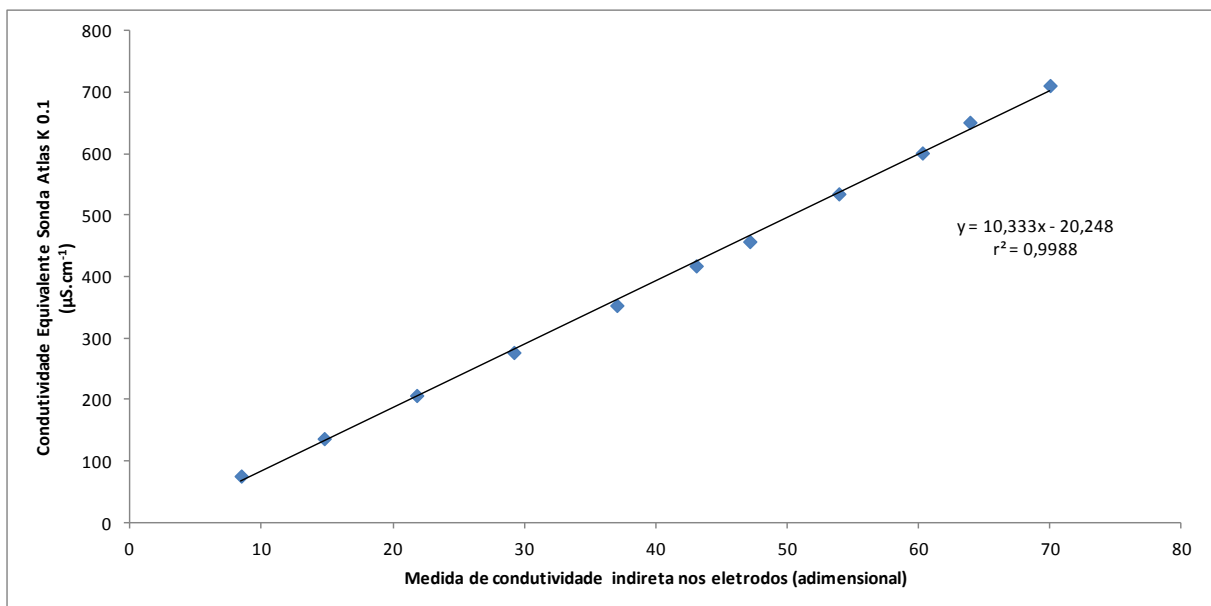
## 5 RESULTADOS

### 5.1 MEDIDA INDIRETA DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

No teste de análise de variância para as medidas de condutividade elétrica indireta obtida com os eletrodos montados acoplados aos fios que os interligam à placa *protoboard*, para um nível de significância de 5%, não rejeita-se a hipótese nula de médias iguais ( $p\text{-value}=0,992$ ). Desse modo, pode-se afirmar que as medidas de condutividade elétrica indireta realizada pelos eletrodos acoplados aos fios não diferem estatisticamente entre si.

Uma vez que as medições realizadas com os diferentes eletrodos construídos não diferem entre si, elaborou-se, com o auxílio de planilha eletrônica, uma regressão (Gráfico 1), a fim de se obter a condutividade equivalente na sonda do equipamento utilizado, partindo-se da medida indireta. Na regressão obtida, a variável  $x$  é o valor observado no visor do aparelho quando da medição indireta de condutividade e a variável  $y$  é a condutividade equivalente em  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  para a sonda Atlas K 0.1.

GRÁFICO 1: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA INDIRETA E A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NA SONDA ATLAS K 0.1



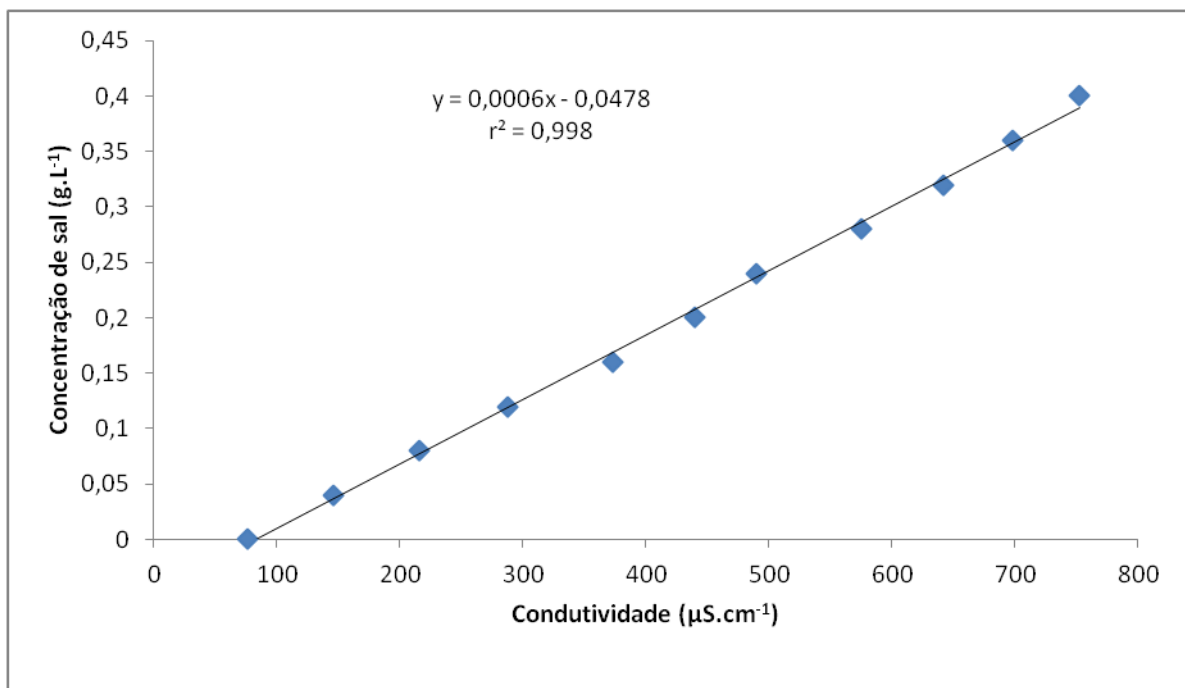
Fonte: O Autor, 2017.



## 5.2 CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) PARA CONCENTRAÇÃO DE SAL ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )

A regressão obtida, a fim de se correlacionar a condutividade elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) equivalente da sonda com a concentração de sal ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) é apresentada no Gráfico 2. A variável x é a condutividade elétrica aferida pela sonda ou então a obtida pela regressão do item 5.1. A variável y é a concentração de sal equivalente em  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

GRÁFICO 2: RELAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SONDA ATLAS K 0.1 E A CONCENTRAÇÃO DE SAL



FONTE: O Autor, 2017.

## 5.3 ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE $7,2 \text{ L}\cdot\text{H}^{-1}$

Nesse ensaio de fluxo ascendente (Quadro 1), uma parcela da massa de sal segue a tendência de se depositar no fundo do tanque desde o início do escoamento até o tempo de 45 minutos. Pode-se observar no imageamento obtido que a pluma de traçador salino se encontra mais concentrada no fundo num tempo de 45 minutos. A massa correspondente para esse tempo no nível 0 cm é de 0,15 g de sal.

Após esse tempo a massa que se acumulou nessa região se difundiu para regiões de nível superior até ser eliminada na saída que se encontrava no topo do tanque, isso pode ser visualizado no imageamento obtido para os tempos 60 e 90 minutos, nas suas respectivas colunas no Quadro 2, onde se observa a dissipação da mancha de sal do fundo do tanque. Foram observados pontos de deposição mais acentuada no terceiro quadrante do círculo que delimita o formato do fundo, onde foram detectados 0,063g de sal, o que corresponde a 42% de toda a massa depositada no fundo. Também ocorreu uma zona de deposição de menor intensidade no entorno do centro, onde foram detectados 0,041g de sal, correspondendo a 27,3% de toda a massa detectada na cota zero para o tempo de 45 minutos de escoamento.

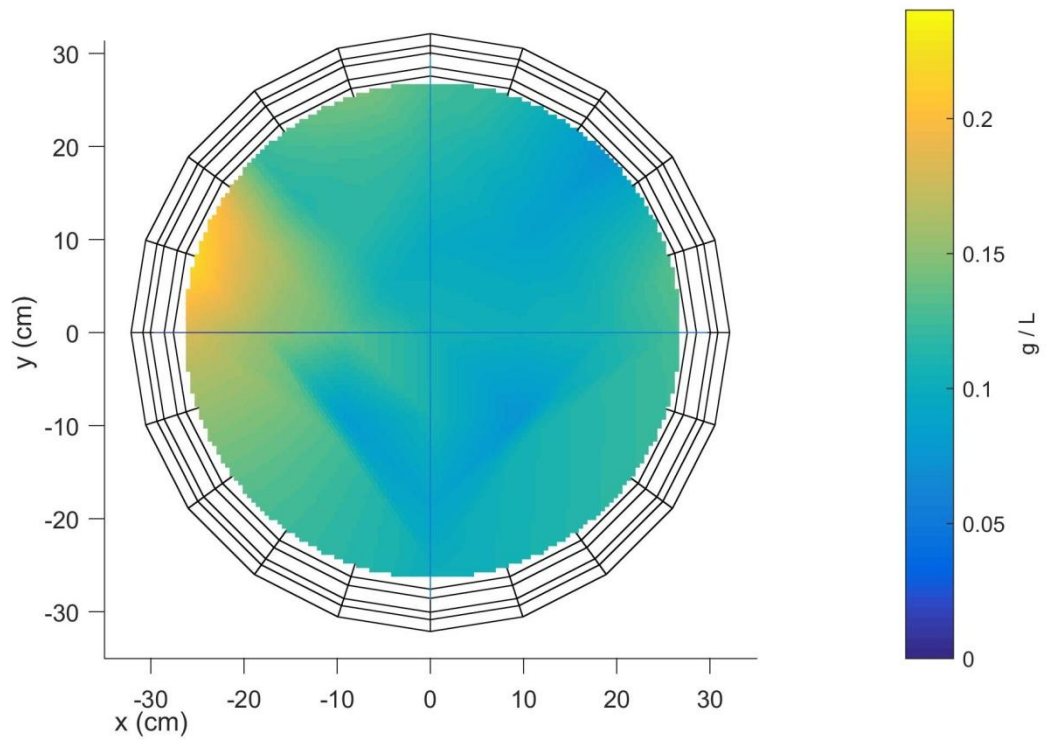
Para o perfil XZ que passa pelo centro do tanque, no sentido do escoamento, é detectado uma zona de alta intensidade de concentração de traçador próximo à entrada do escoamento, num nível correspondente a 10 cm de altura. Essa camada de alta concentração aumenta gradativamente desde o início do escoamento, até o tempo de 30 minutos, conforme pode ser visualizado nas imagens do perfil XZ do imageamento da pluma de traçador. No nível 10 cm, a massa total de traçador detectada atinge seu pico num tempo de 30 minutos foi de 0,13 g (Figura 33). O fato de ocorrer uma alta concentração de sal nesse nível se dá devido a injeção de solução salina ser realizada nesse nível para essa configuração de escoamento.

A máxima concentração de traçador detectada para esse teste foi de  $2 \text{ g.L}^{-1}$ . Tal concentração foi detectada no tempo de 30 minutos, conforme pode-se visualizar no perfil XZ correspondente à esse tempo. Essa concentração máxima ocorreu na região próximo à entrada da solução salina. Mas, nota-se também, que essa concentração máxima também foi detectada no fundo do tanque, conforme a imagem obtida no perfil XY para a cota 0 cm no tempo de 45 minutos).

Pode-se observar, ainda, pela vista geral do tanque que mostra a propagação de sal no tempo, que todo o volume de controle não apresenta uma homogeneidade de concentração no seu interior durante todo o tempo do escoamento. Nas imagens correspondentes aos tempos de 10 e 20 minutos, nota-se a deposição de sal no fundo do tanque e a ausência do mesmo nas cotas superiores.

A partir do tempo de 450 minutos de escoamento, a massa de sal injetada tendeu a se dirigir à saída localizada na parte superior do tanque, na cota x (25 cm) e z (25 cm), tal fenômeno é mostrado no perfil XZ obtido para esse tempo.

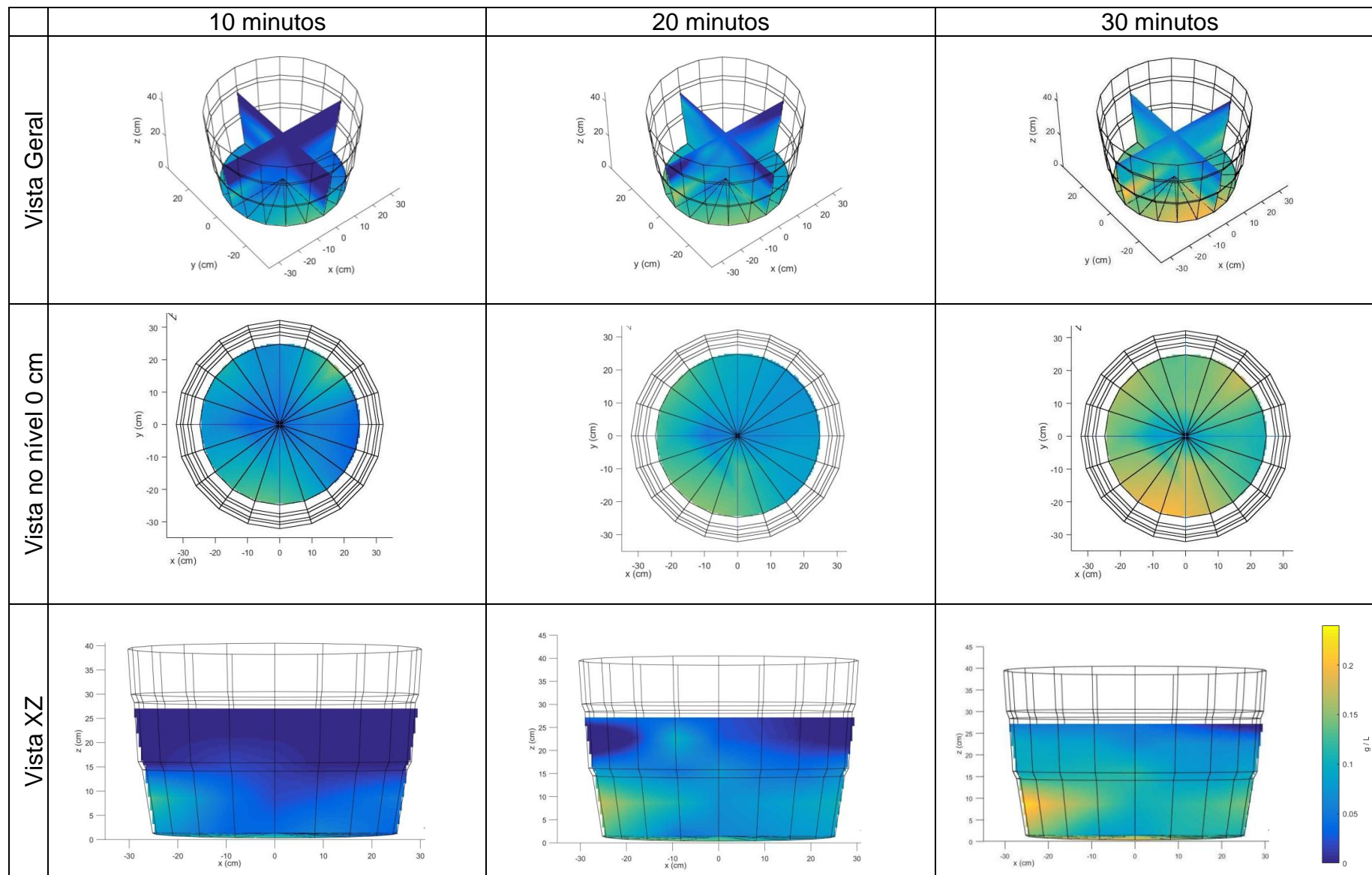
FIGURA 33: VISTA XY PARA O NÍVEL 10 CM APÓS 30 MINUTOS DE ESCOAMENTO.



Fonte: O Autor, 2017.

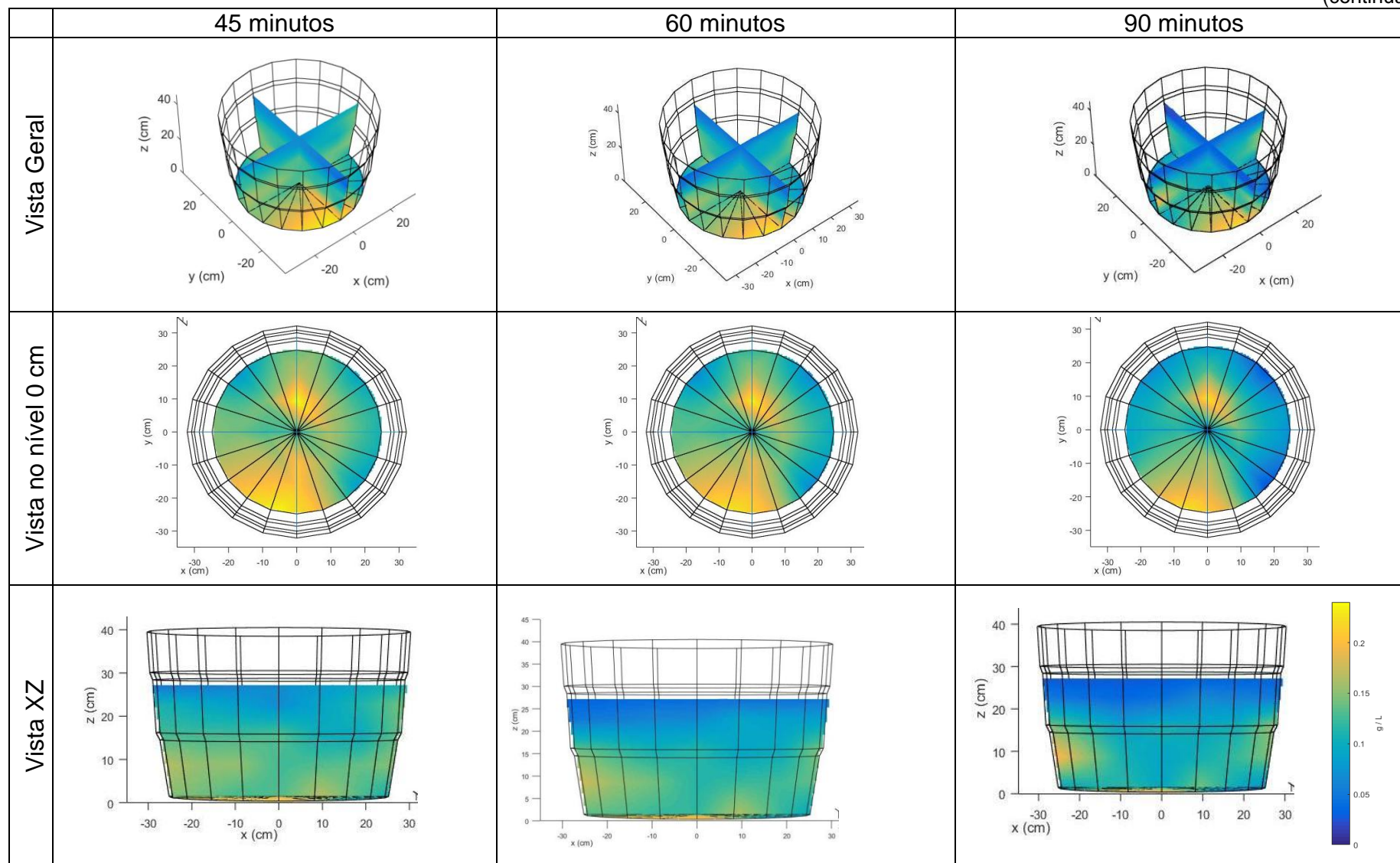
QUADRO 1 - ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



QUADRO 1 - ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

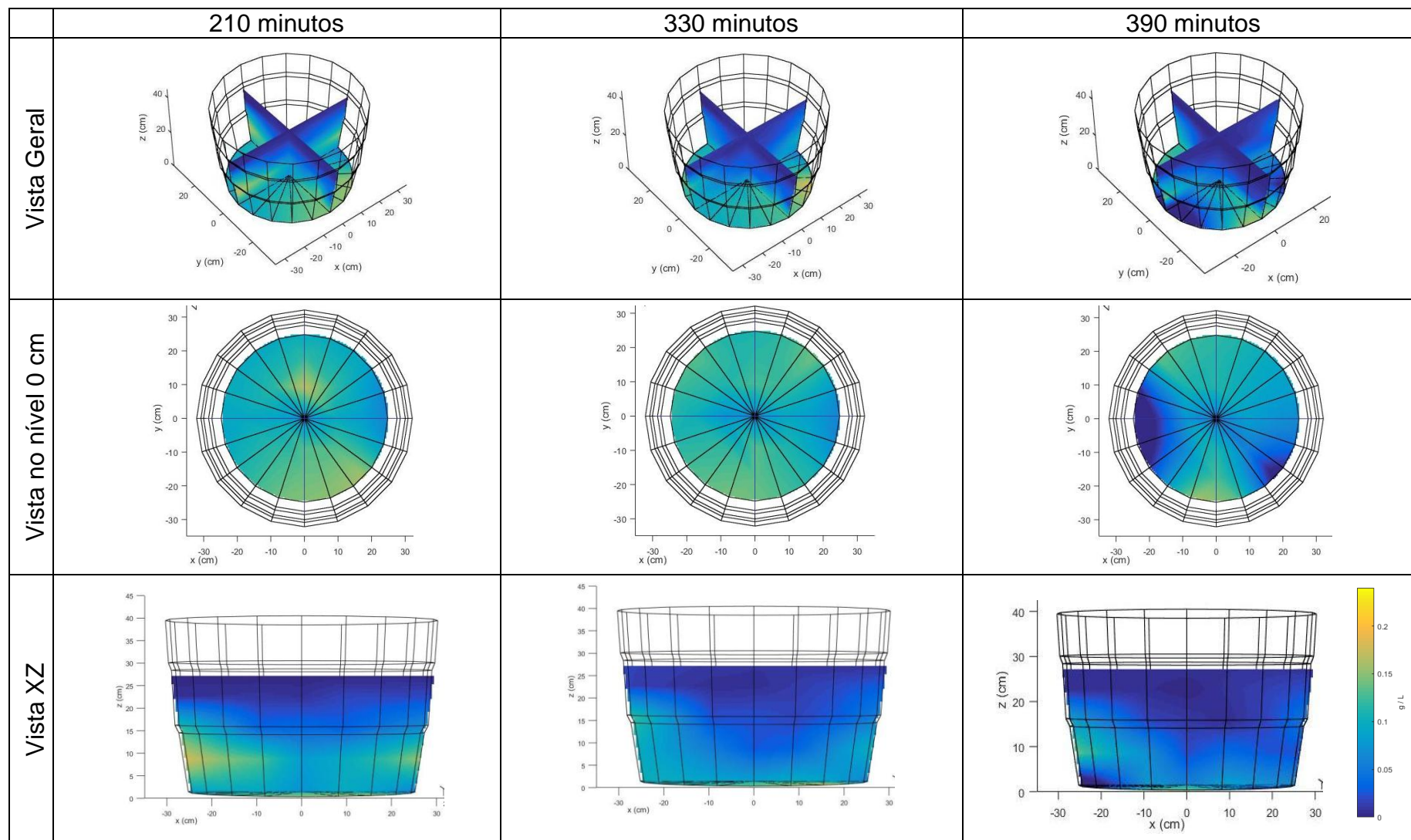
(continua)





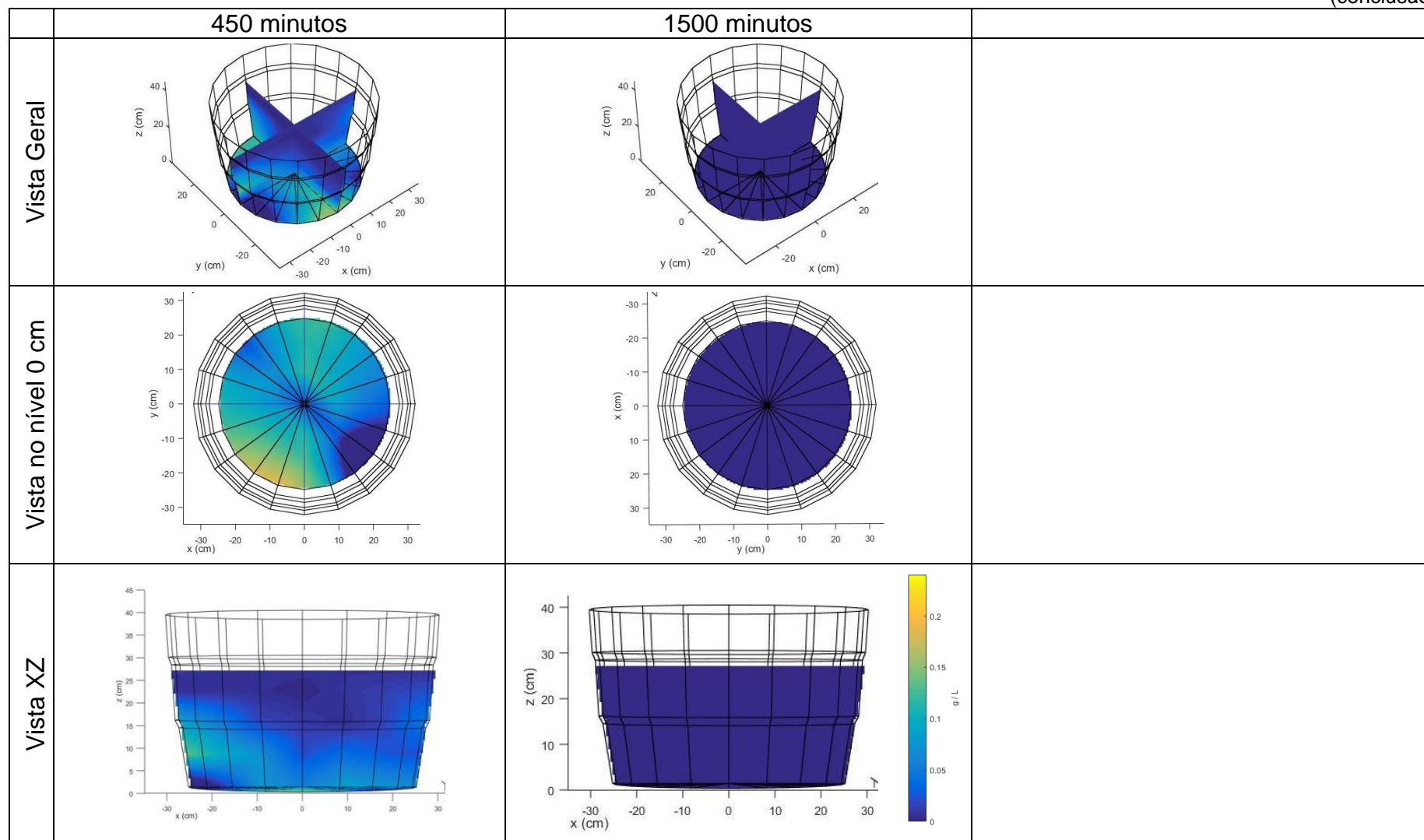
QUADRO 1 - ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



QUADRO 1 - ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

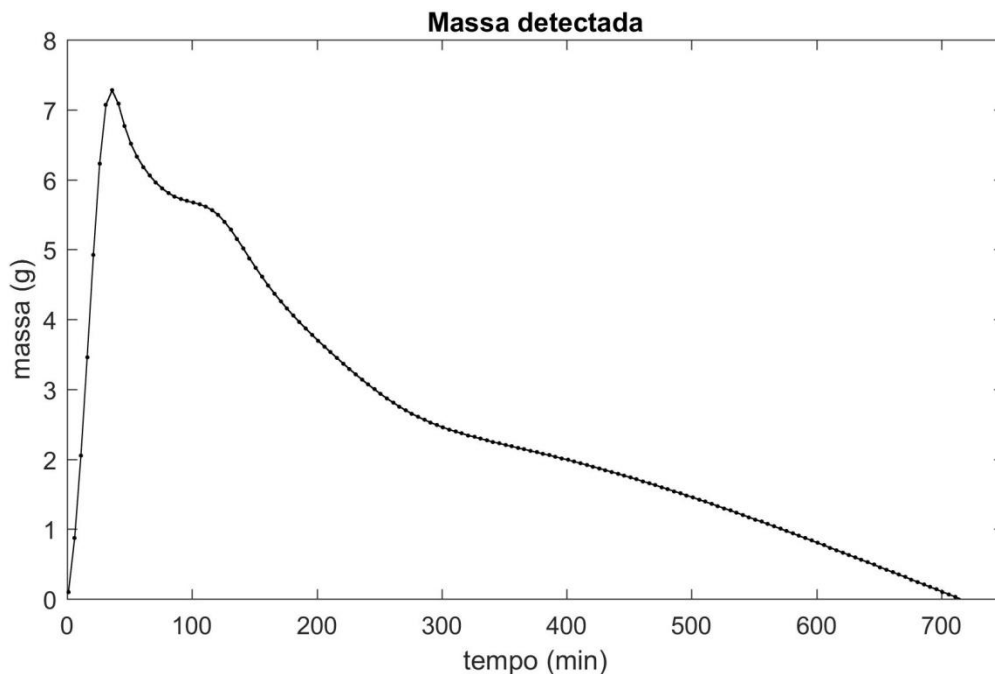
(conclusão)



Fonte: O autor

No Gráfico 3 é apresentada a evolução da massa detectada em todo o volume de controle no tempo. A completa eliminação da massa de traçador ocorre num tempo de 710 minutos de escoamento, de acordo com a extrapolação obtida. O pico de massa detectado ocorreu no tempo de 40 minutos e, a massa detectada foi de 7,16 g, sendo que a massa de sal total injetada no sistema durante o pulso de 30 minutos foi de 7,20 g, ocorrendo assim uma detecção de 99,4% da massa de traçador.

GRÁFICO 3: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.H}^{-1}$ )



Fonte: O autor, 2017.

#### 5.4 ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE $7,2 \text{ L.H}^{-1}$

As imagens obtidas para a evolução da pluma de traçador no tempo são apresentadas no Quadro 2. São apresentados para esse ensaio, a vista XY para o tanque no nível 27,5 cm, ou seja, na superfície, pois o ensaio na configuração descendente apresentou particularidades nessa cota.

Para um intervalo de tempo de 5 a 30 minutos de escoamento há uma tendência de uma distribuição de traçador na camada superior do tanque, formando uma lâmina. A maior massa detectada no topo da lâmina d'água foi de 0,16 g num tempo de 30 minutos, tal fenômeno pode ser observado na vista XY do nível 27,5



cm. Isso se deve, ao fato que nesta configuração de escoamento, a entrada de traçador é realizada nesse nível.

A partir de 30 minutos de escoamento, a massa de sal é transportada para cotas inferiores do tanque e também para a saída, fato esse, que é confirmado pela visualização da vista XY da cota 27,5 cm no tempo de 60 minutos, onde o pico de concentração de  $0,2 \text{ g.L}^{-1}$  observado na mesma perspectiva para o tempo de 30 minutos já não existe. A concentração de traçador na superfície não apresentou variação para os tempos de 60 a 180 minutos, conforme a vista XY para a superfície.

Acompanhando-se a evolução da mancha de sal na vista geral, a partir do tempo 30 minutos, observa-se o deslocamento da mancha de traçador para a saída, a qual está localizada na parte inferior do tanque. Com o passar do tempo, verifica-se que as camadas superiores já não apresentam mais presença de sal ou apresentam concentração extremamente reduzida e, à medida que o tempo avança, o traçador vai sendo eliminado do interior do sistema num sentido descendente.

No fundo do tanque, ocorreu um depósito de massa de sal que atingiu um pico de 0,15 g num tempo de 60 minutos de escoamento. Percebe-se com isso, que para essa configuração de escoamento, a deposição de massa no fundo não ocorre de maneira imediata, como ocorreu nos ensaios ascendentes, onde a massa máxima detectada no fundo ocorreu em torno de 30 minutos de escoamento.

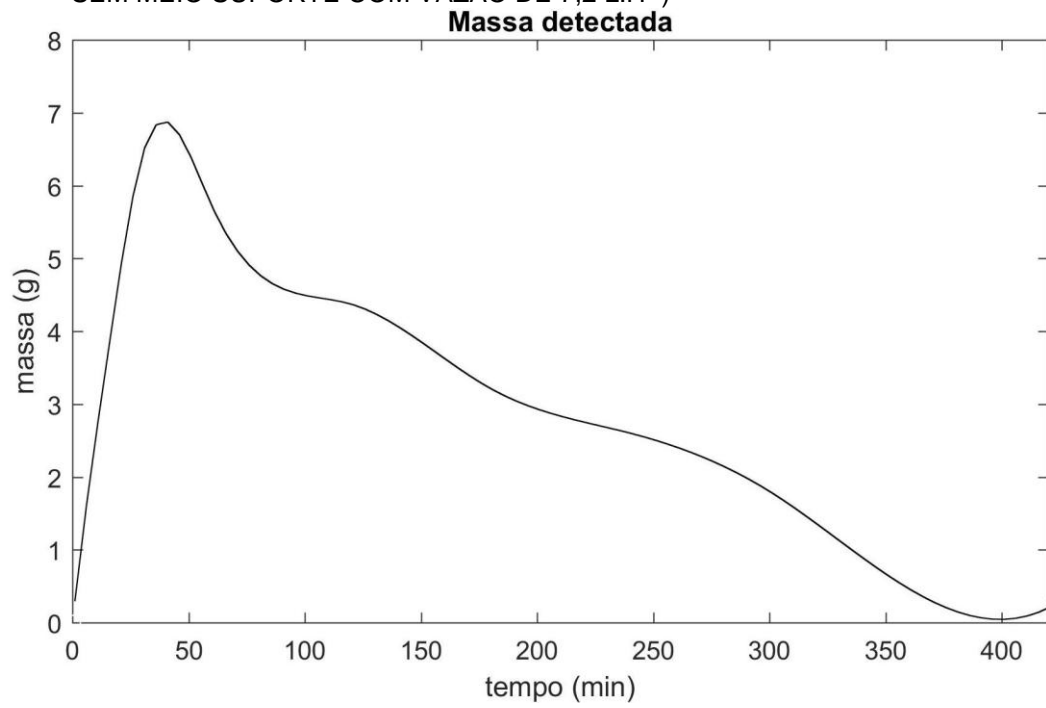
Para o volume de controle, como um todo, a massa de traçador máxima detectada foi de 6,9 g, de um total de 7,2 g injetados em 30 minutos de escoamento, obtendo-se uma taxa de detecção de 95,83% (Gráfico 4), coincidindo, desse modo, com o tempo do pulso de injeção de traçador salino. A eliminação completa do sal do interior do sistema ocorreu após 400 minutos de escoamento.

Verifica-se na vista XZ para os tempos entre 60 e 240 minutos que há uma tendência de homogeneidade da distribuição de traçador no interior do tanque, onde a mesma atinge valores da ordem de  $0,1 \text{ g.L}^{-1}$ .

Embora tenha ocorrido deposição de sal no fundo do tanque, nota-se que nessa configuração de escoamento, todas as regiões do tanque foram atingidas com a presença do traçador, não havendo assim, a presença de zonas mortas.

Considera-se a hipótese de que o traçador se propaga não apenas pelo escoamento descendente convectivo, mas também por deposição densimétrica.

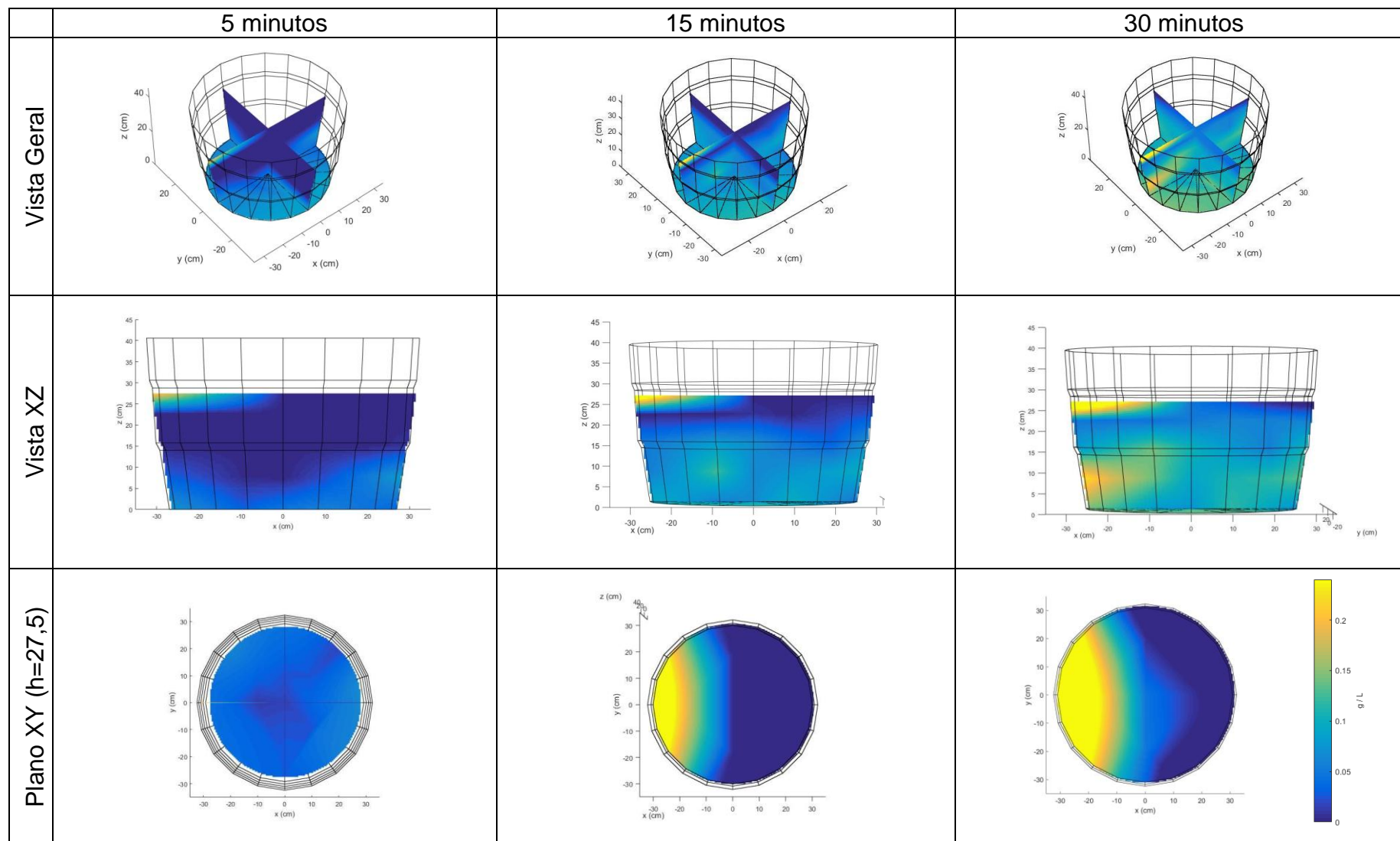
GRÁFICO 4: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.H}^{-1}$ )



Fonte: O autor, 2017.

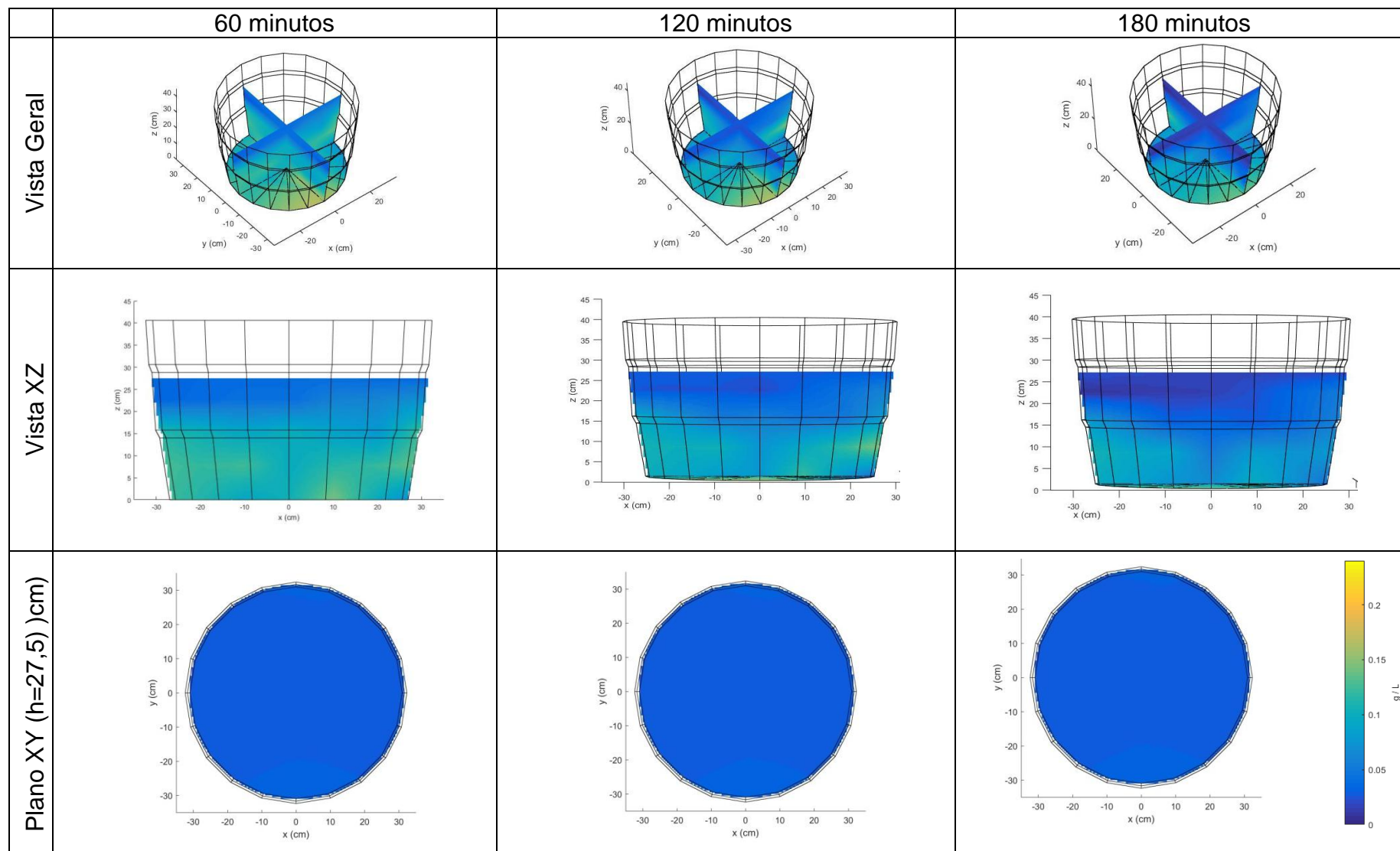
QUADRO 2 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



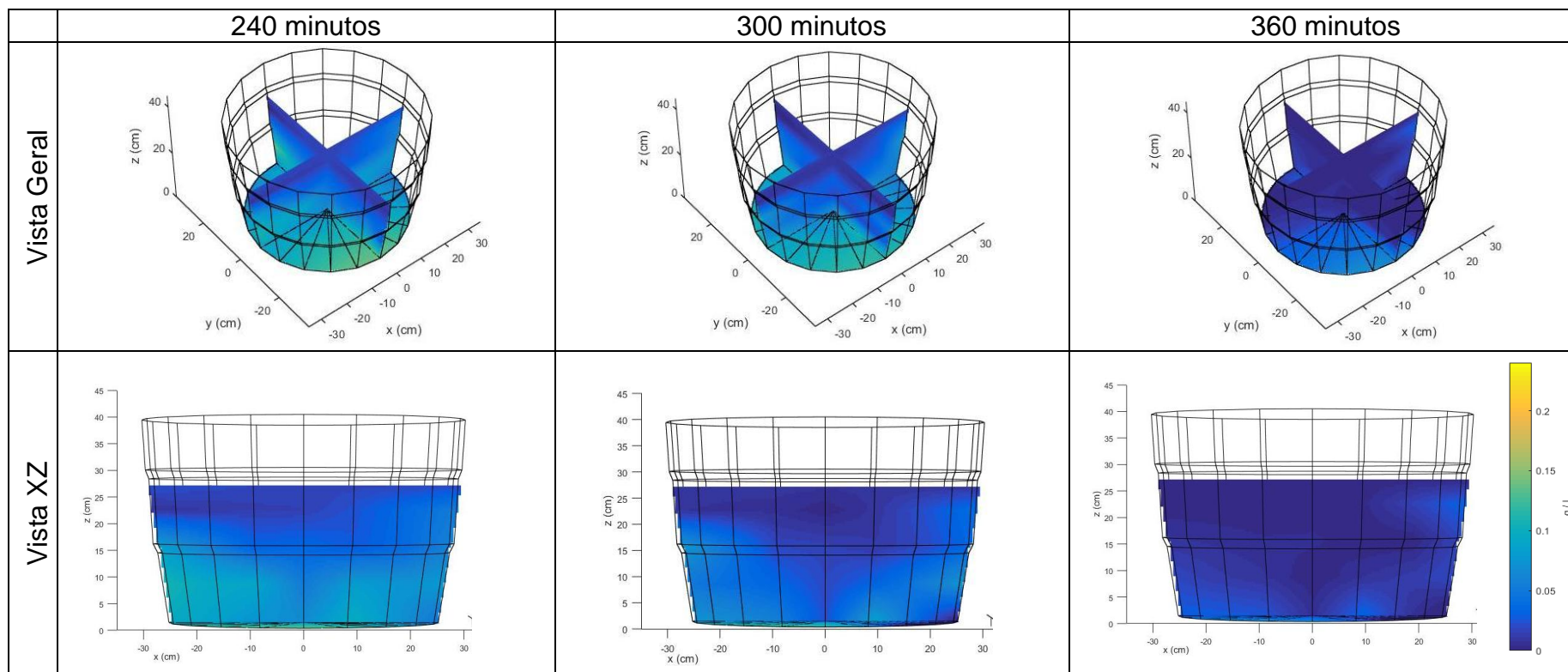
QUADRO 2 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



QUADRO 2 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 7,2 L.h<sup>-1</sup>

(conclusão)



Fonte: O autor

## 5.5 ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 3,6 L.H<sup>-1</sup>

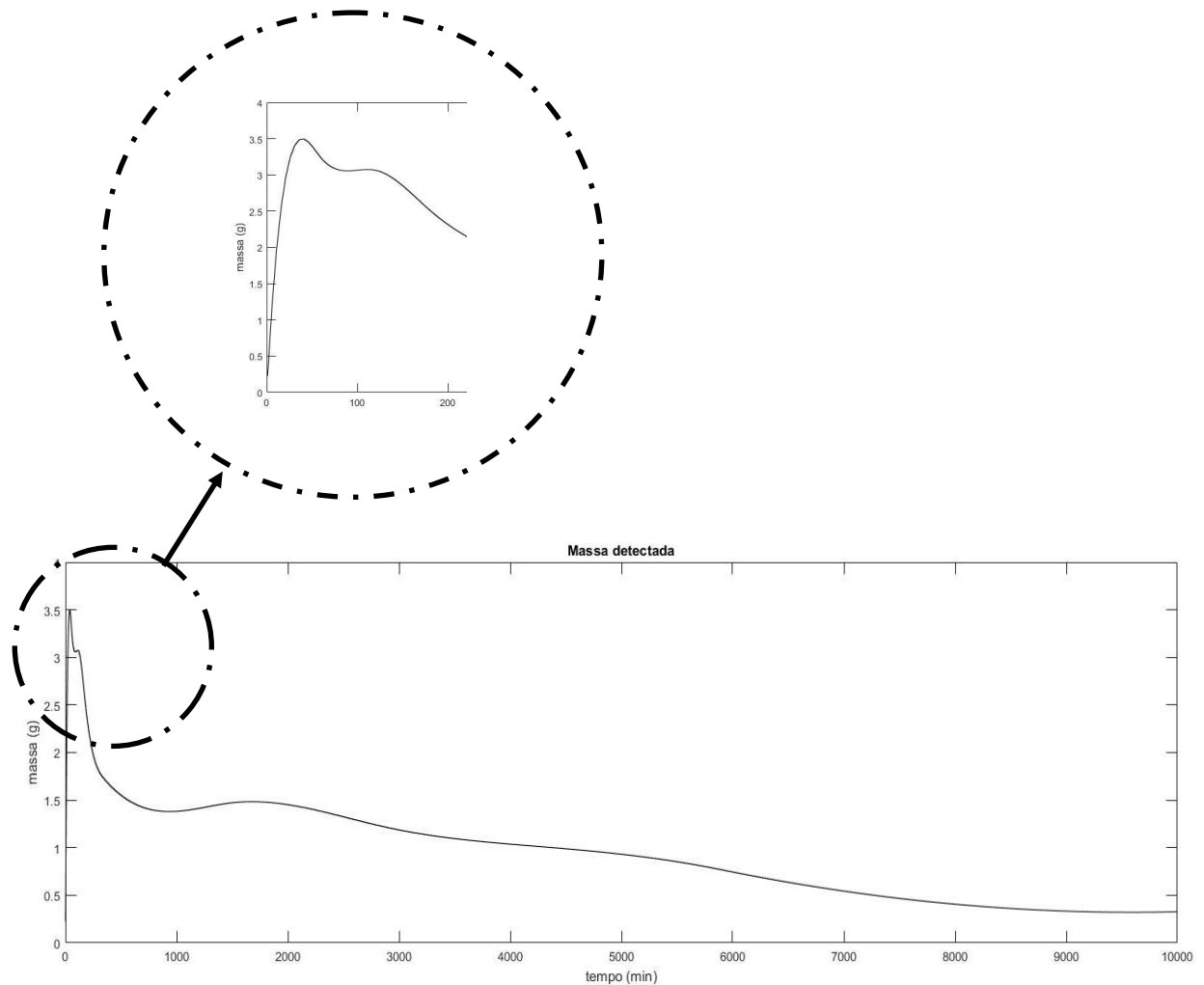
Para o ensaio descendente, realizado apenas com o tanque preenchido com água e vazão de 3,6 L.h<sup>-1</sup>, a concentração máxima de traçador detectada durante o escoamento foi de 0,1 g.L<sup>-1</sup> (Quadro 3), sendo a concentração injetada de 2 g.L<sup>-1</sup>, ocorrendo desse modo uma diluição do traçador no volume de controle.

Ocorreu uma deposição acentuada de traçador no fundo do tanque, conforme pode ser visualizado para a vista XY para esse nível. A massa máxima detectada no fundo do tanque atingiu seu pico nesse nível num tempo de 30 minutos, coincidindo assim, com o tempo do pulso de injeção de traçador no tanque, com uma massa depositada de 0,095 g. Tal massa foi transportada pelo escoamento ou sofreu difusão até um tempo de 300 minutos. A partir dos 300 minutos de escoamento pode-se observar uma uniformidade de distribuição do sal em todo o interior do tanque, com uma concentração média de 0,04 g.L<sup>-1</sup>. A massa obtida para esse tempo foi de 1,5 g de traçador (Gráfico 5), a qual foi decrescendo até um tempo de 10.320 minutos, quando se tornou indetectável.

Desde o início do escoamento até o tempo de 300 minutos ocorrem zonas que não são atendidas pelo escoamento e que o traçador não entra em contato. Isso pode ser atestado pelas vistas gerais para os tempos inferiores a 300 minutos, e também pelas vistas XZ. Nas cotas próximas à superfície do tanque há apenas a presença de água limpa. Após os 300 minutos o sal das regiões inferiores, principalmente do fundo, atinge as camadas superiores, fazendo com que todo o tanque tenda para uma uniformidade de concentração.

A massa de traçador no interior do sistema como um todo atingiu um pico de 3,5 g num tempo de 40 minutos de escoamento (Gráfico 7). Sendo assim detectado 97,22% da massa total de 3,6 g que foram injetados. A não detecção de toda a massa nessa configuração sugere a presença de zonas de curto-circuito, o que é confirmado pelo imageamento obtido para a vista XZ para o tempo de 15 minutos, onde a mancha de traçador se encontra acentuada na zona próxima à saída do tanque, na cota x (25 cm) e z (5 cm). Na imagem obtida para o tempo de 30 minutos, essa zona de alta concentração de sal se apresenta ainda mais acentuada. Desse modo, pode-se afirmar que houve perda de massa de traçador no tempo desde o início do escoamento até 30 minutos.

GRÁFICO 5: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.H}^{-1}$ )



Fonte: O autor, 2017.

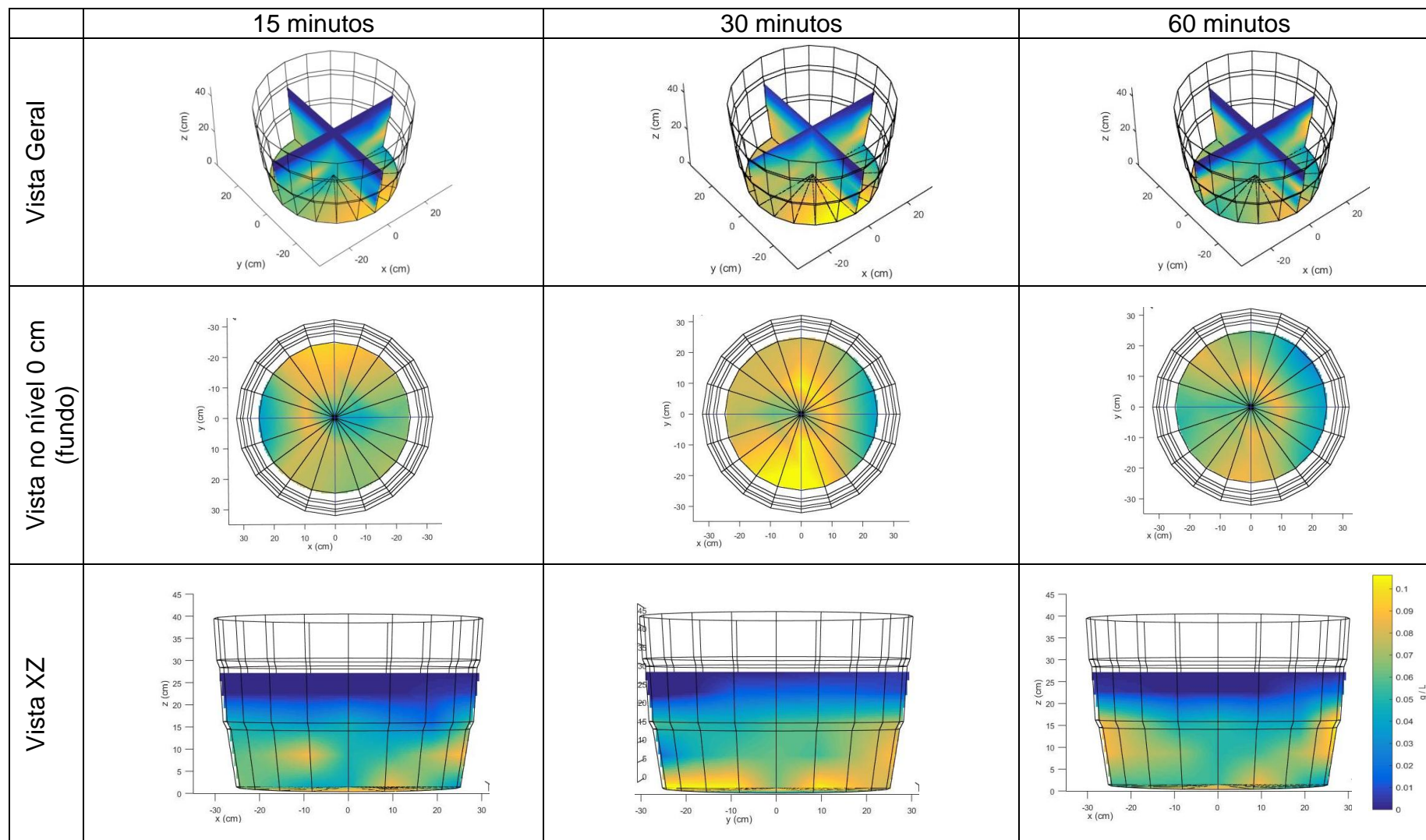
Vale ressaltar, ainda, o acúmulo de sal ocorrido no terceiro quadrante, na cota 0 cm no tempo 300 minutos, o qual pode ser visualizado na vista XY para a referida altura. Tal ponto se encontra próximo à saída, o que é um indicativo de que aquela massa está prestes a deixar o sistema e, a partir daí o sistema tenderá para a homogeneidade anteriormente descrita.

Há, ainda, para os tempos entre 15 e 300 minutos, nas cotas entre 10 e 15 cm, uma mancha significativa de sal, a qual persiste até os 300 minutos de escoamento e se difunde para os níveis superiores que se encontram com concentrações de sal menores, para haver assim a homogeneidade detectada nos 1500 minutos de escoamento.



QUADRO 3 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ 

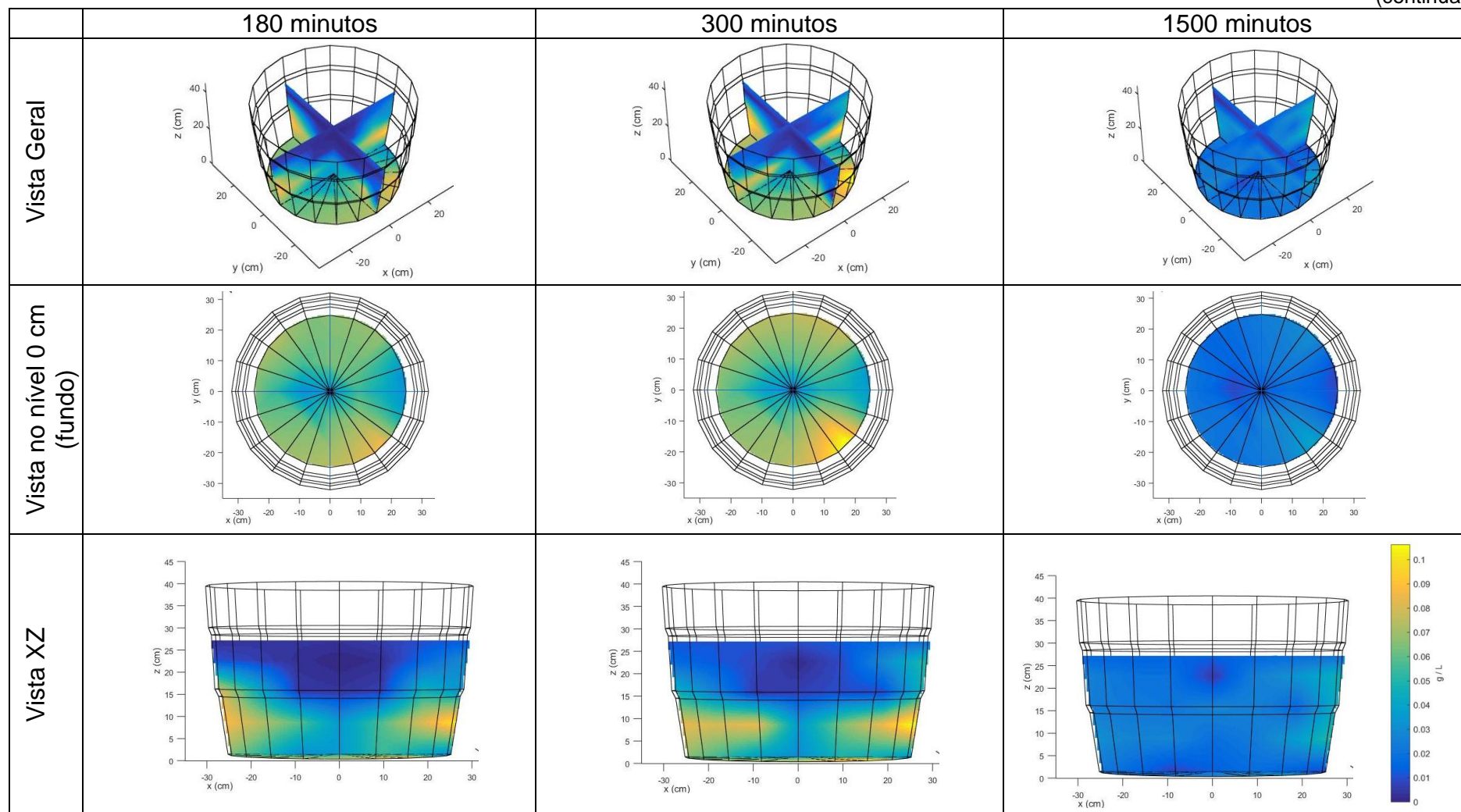
(continua)





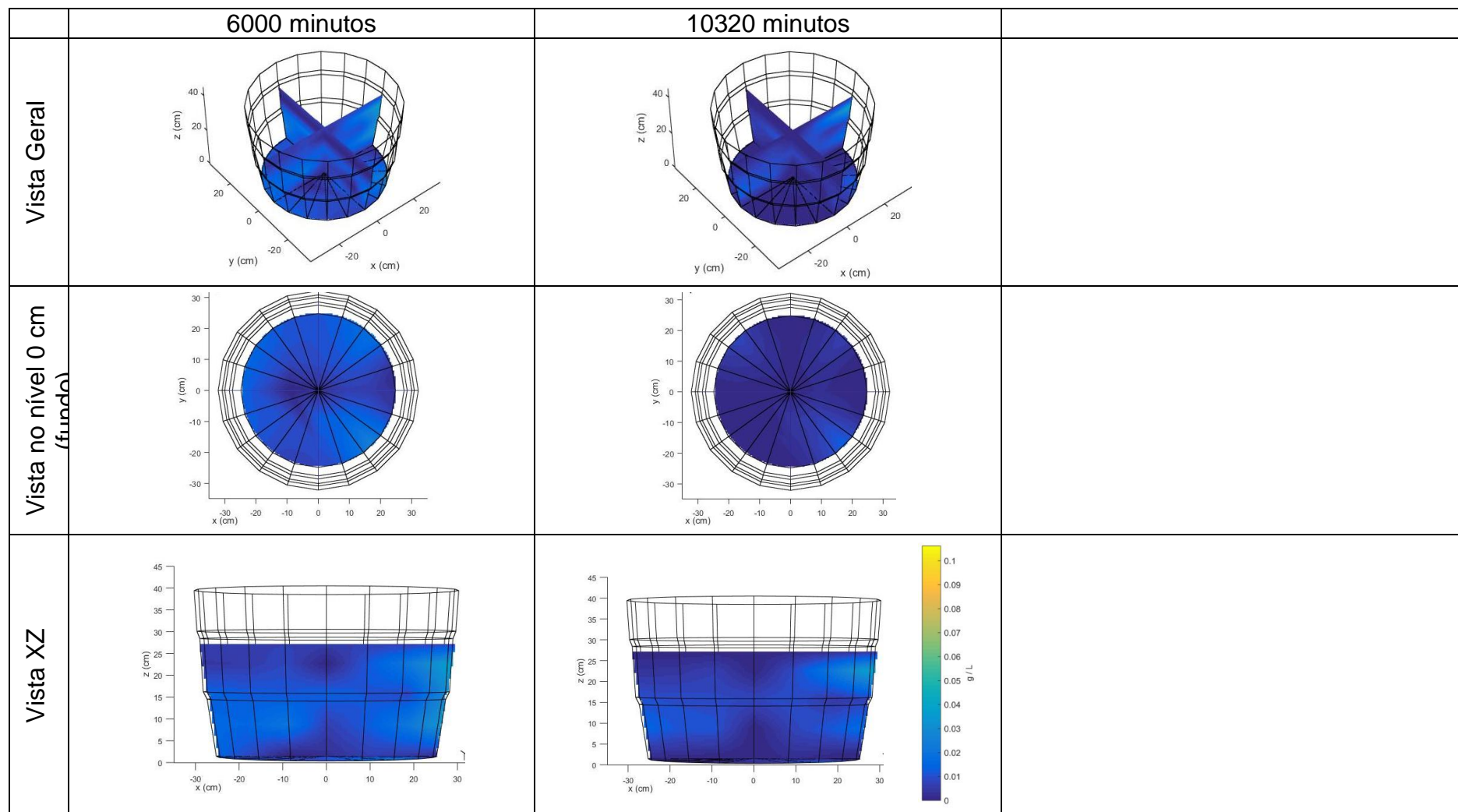
QUADRO 3 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE 3,6 L.h<sup>-1</sup>

(continua)



QUADRO 3 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ 

(conclusão)



Fonte: O autor

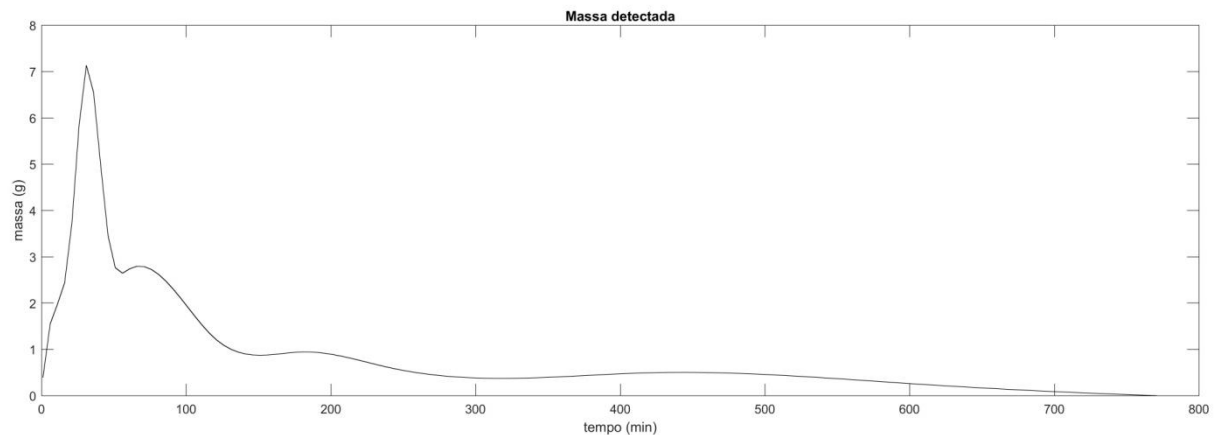
## 5.6 ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 7,2 L.H<sup>-1</sup>

A evolução da pluma de traçador salino no tempo para o ensaio na configuração de fluxo descendente e vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> com o tanque preenchido com camada de brita nº 1 e água é apresentada no Quadro 5.

A máxima concentração de sal obtida no volume de controle foi de 0,8 g.L<sup>-1</sup>, sendo a concentração de traçador injetada de 2,0 g.L<sup>-1</sup>. Dessa forma, ocorreu a diluição da solução salina durante o escoamento. A concentração máxima de traçador começa a ser detectada para um tempo de 20 minutos de escoamento no fundo do tanque, conforme a vista XY para o nível 0 cm. A massa máxima total de traçador detectada foi de 7,2 g (Gráfico 6), resultando assim em uma detecção de 100% de toda a massa de sal injetada durante o pulso de 30 minutos.

Nessa configuração de escoamento houve a ocorrência de três zonas mais acentuadas de depósito do traçador no fundo do tanque, as quais começaram a definir o seu contorno no tempo de 20 minutos e atingiram um pico de massa de 0,37 g no tempo de 30 minutos de escoamento, conforme pode ser visualizado pela vista XY para o fundo do tanque. Tais zonas estão localizados no primeiro, segundo e quarto quadrantes da seção circular contida no plano xy do fundo do tanque. Na zona localizada no quarto quadrante do fundo, ocorreu deposição de massa de sal mais acentuada, sendo detectados 0,14g de sal, o que corresponde a 38% de toda a massa depositada detectada no fundo. No primeiro quadrante, próximo à parede, foram detectados 0,032 g de sal depositados, correspondendo a 8,65% de toda a massa depositada no fundo. Na zona de deposição do segundo quadrante foram detectados 0,04 g de sal, correspondendo a 10,8% da massa de sal depositada no fundo para o tempo de trinta minutos. A zona de deposição do segundo quadrante foi desfeita após 60 minutos de escoamento, tempo no qual foi detectada uma massa total de 0,27 g de sal no fundo do tanque e, as zonas localizados no primeiro e quarto quadrante perderam sua intensidade após 120 minutos de escoamento, havendo ainda, nesse tempo, uma massa de 0,14 g de sal depositadas na cota zero, conforme o gráfico obtido para a vista XY da cota 0 cm do tanque.

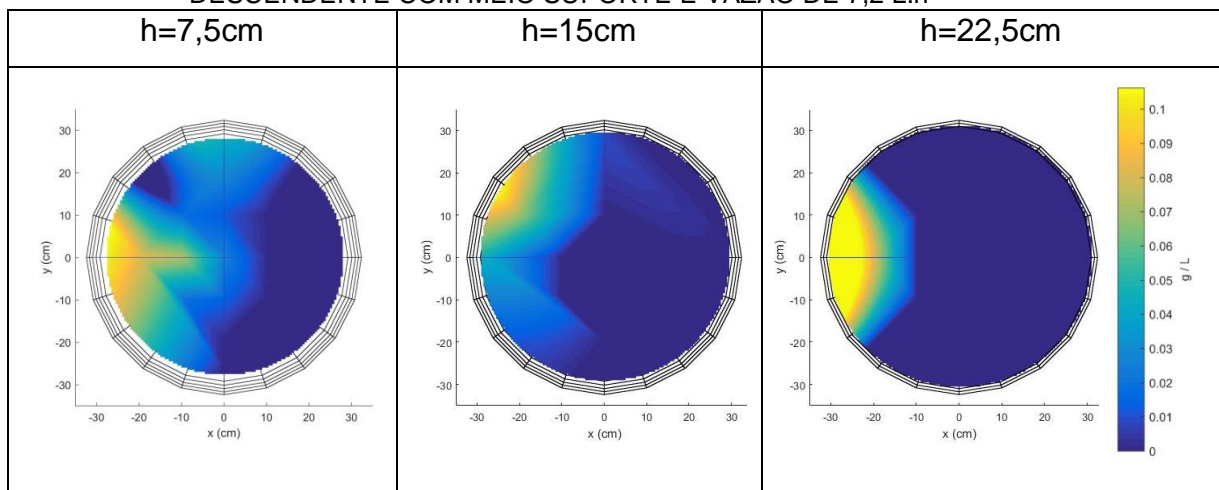
GRÁFICO 6: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.H}^{-1}$ )



Fonte: O autor, 2017.

Outro fator a ser destacado é o caminho que a pluma de traçador percorre desde a sua entrada, no topo do tanque, até a saída, no fundo do tanque. O caminho percorrido pelo escoamento pode ser observado no perfil XZ que passa pelo centro do tanque (Quadro 6). Uma parte da massa de sal injetada pode ser observada de maneira mais acentuada para um tempo de 30 minutos no perfil XZ. As maiores concentrações de traçador podem ser observadas próximos à parede do tanque para as cotas xy (-30,0) para as alturas (cota z) variando de 0 a 10 cm. O mesmo fenômeno ocorre para cotas de 20 a 25 cm de altura. O Quadro 4 traz a vista XY para um tempo de 30 minutos observada para as alturas de 7,5 cm, 15 cm e 22,5 cm. As massas de sal detectadas para cada um desses níveis num tempo de 30 minutos foram respectivamente 0,14 g, 0,08 g e 0,09 g.

QUADRO 4 - VISTA DO PLANO XY NO TEMPO DE 30 MINUTOS PARA O ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$

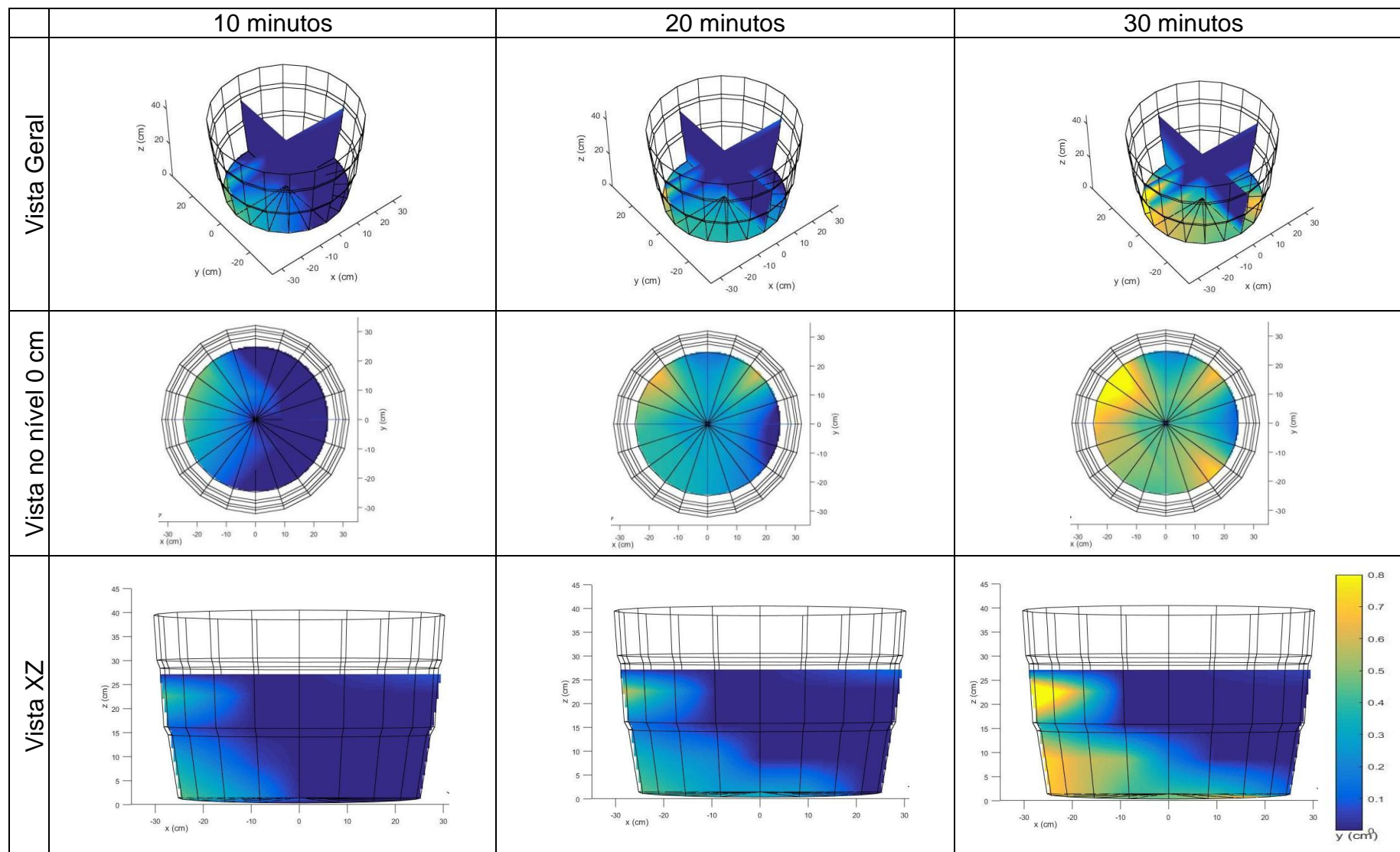


FONTE: O autor, 2017.

Pode-se perceber, que no tempo de 10 minutos, deu-se início a formação de uma camada de menor concentração de sal no fundo do tanque, a qual se apresenta consolidada após 20 minutos do início do escoamento, conforme verifica-se na vista XY para a cota 0 cm. Tal camada apresenta uma concentração da ordem  $0,3 \text{ g.L}^{-1}$  de sal. Nota-se também que não há presença de sal na região próxima à saída, no fundo do tanque, na cota x (25 cm) e y (0 cm). Percebe-se que a configuração da camada de sal formada na cota 0 cm no tempo de 20 minutos é semelhante à que ainda se mantém na mesma cota para o tempo de 120 minutos após a dispersão das três zonas de sal mais acentuadas anteriormente descritas, o que indica uma zona de deposição.

QUADRO 5 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE COM VAZÃO DE  $7,2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 

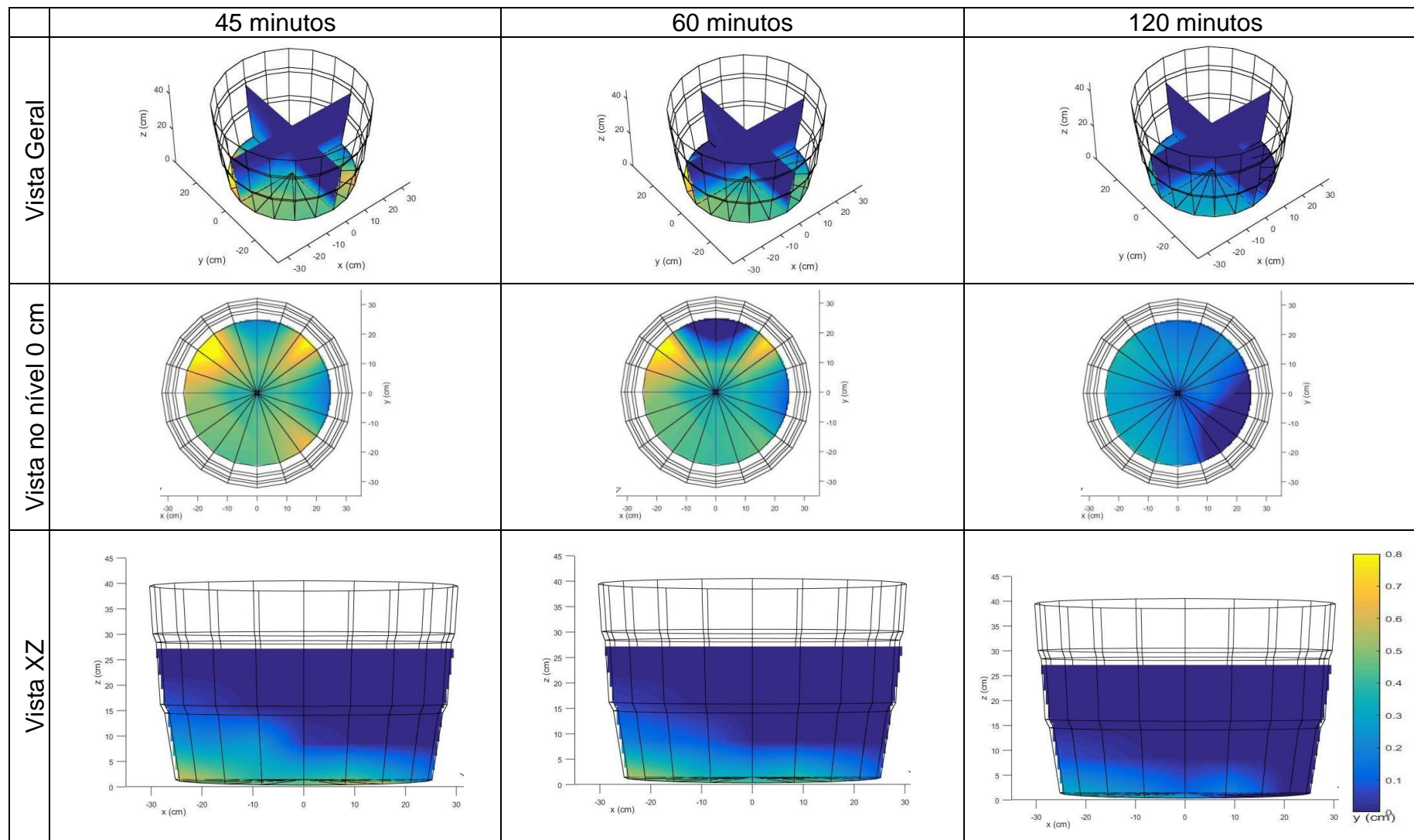
(continua)





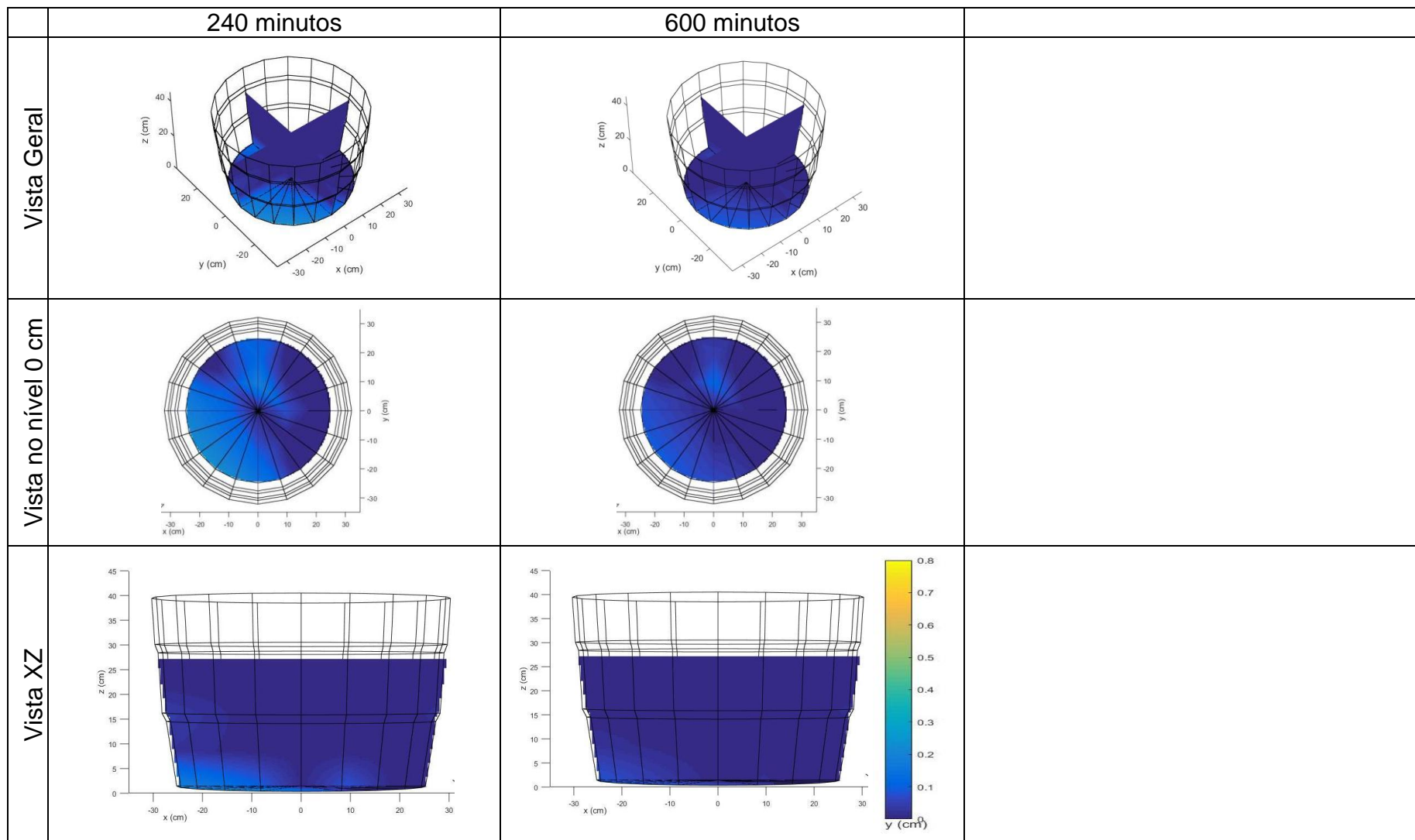
QUADRO 5 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



QUADRO 5 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ 

(conclusão)



Fonte: O autor



## 5.7 ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 3,6 L.H<sup>-1</sup>

A máxima concentração de traçador que foi detectada no tanque foi 0,8 g.L<sup>-1</sup>, sendo a concentração de traçador injetada de 2 g.L<sup>-1</sup>. Durante os 30 primeiros minutos do escoamento, tempo no qual o traçador estava sendo injetado, a pluma de sal esteve presente em todos os níveis do tanque, conforme pode-se observar na vista XZ (Quadro 6). Conforme pode-se visualizar na vista do nível 0 cm para o tempo de 30 minutos e também a vista XZ, para o mesmo tempo, pode-se notar que grande parte da massa de traçador se depositou no fundo do tanque e também até uma camada de 10 cm de altura. É possível visualizar ainda, na vista XZ para o tempo de 30 minutos, que para nos níveis de 10 cm a 27,5 cm a pluma de traçador esteve presente em metade do volume de controle, no mesmo lado onde se encontra a entrada de água. A partir dos 30 minutos, a massa de sal tendeu a se concentrar na região inferior do tanque, até uma altura de 7 cm, permanecendo nessa região, com uma concentração aproximada de 0,2 g.L<sup>-1</sup> até ser completamente eliminada pelo escoamento que deixava o tanque pela saída localizada na sua parte inferior.

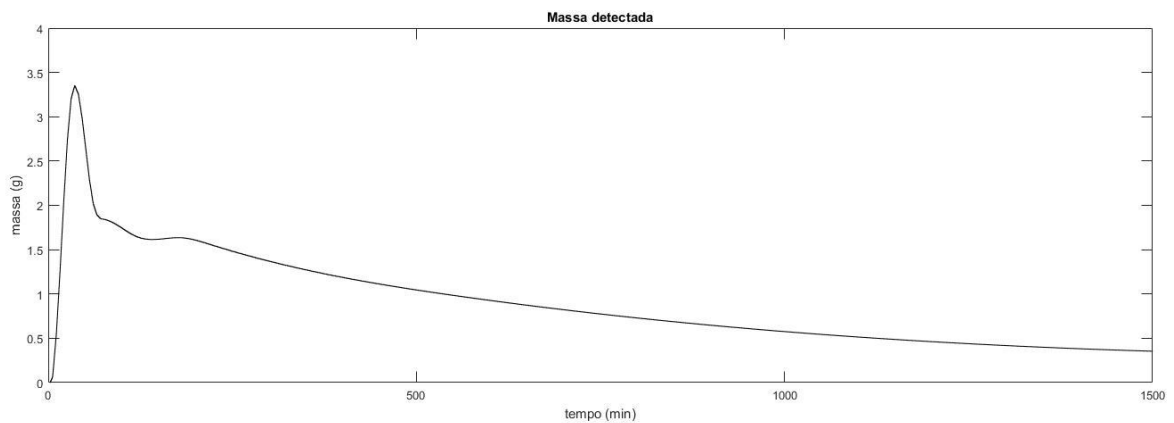
A maior massa de traçador detectada no fundo do tanque ocorreu no tempo de 30 minutos, onde foram detectados 0,25 g de sal. Nesse tempo, também nota-se a formação de duas zonas de deposição: uma no primeiro e outra no quarto quadrante do círculo que forma o perímetro do fundo do tanque, conforme a vista XY para esse nível (Quadro 6). As zonas de estagnação detectadas persistiram até o tempo de 240 minutos, não sendo mais detectadas a partir daí. Tais zonas de deposição são similares às identificadas para a mesma configuração de escoamento e vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> (Quadro 5), nos tempos de 20 a 60 minutos, fato esse que atesta a mesma tendência no escoamento quando vazões diferentes são aplicadas. No primeiro quadrante do fundo do tanque foram detectados 0,04 g de sal depositados, perfazendo 16% de toda a massa contida nesse nível. Na zona de deposição localizada no quarto quadrante foram detectados 0,11g de sal, o que corresponde a 44% de toda a massa depositada nesse nível.

Notou-se ainda, que a zona de deposição no fundo do tanque para esse ensaio, que pode ser visualizada na vista do nível 0 cm para o tempo de 15 minutos é de geometria semelhante para a obtida no tempo de 10 minutos para a mesma configuração de ensaio, mas com vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> (Quadro 7). Também se

observam zonas semelhantes em ambos os ensaios para o tempo de 120 minutos. A massa de traçador se tornou indetectável após 1500 minutos de escoamento.

A massa total de sal detectada no sistema foi de 3,4 g num tempo de pico de 40 minutos (Gráfico 7). A massa injetada total foi de 3,6 g, ocorrendo assim uma detecção de 94,44% da massa total.

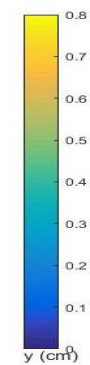
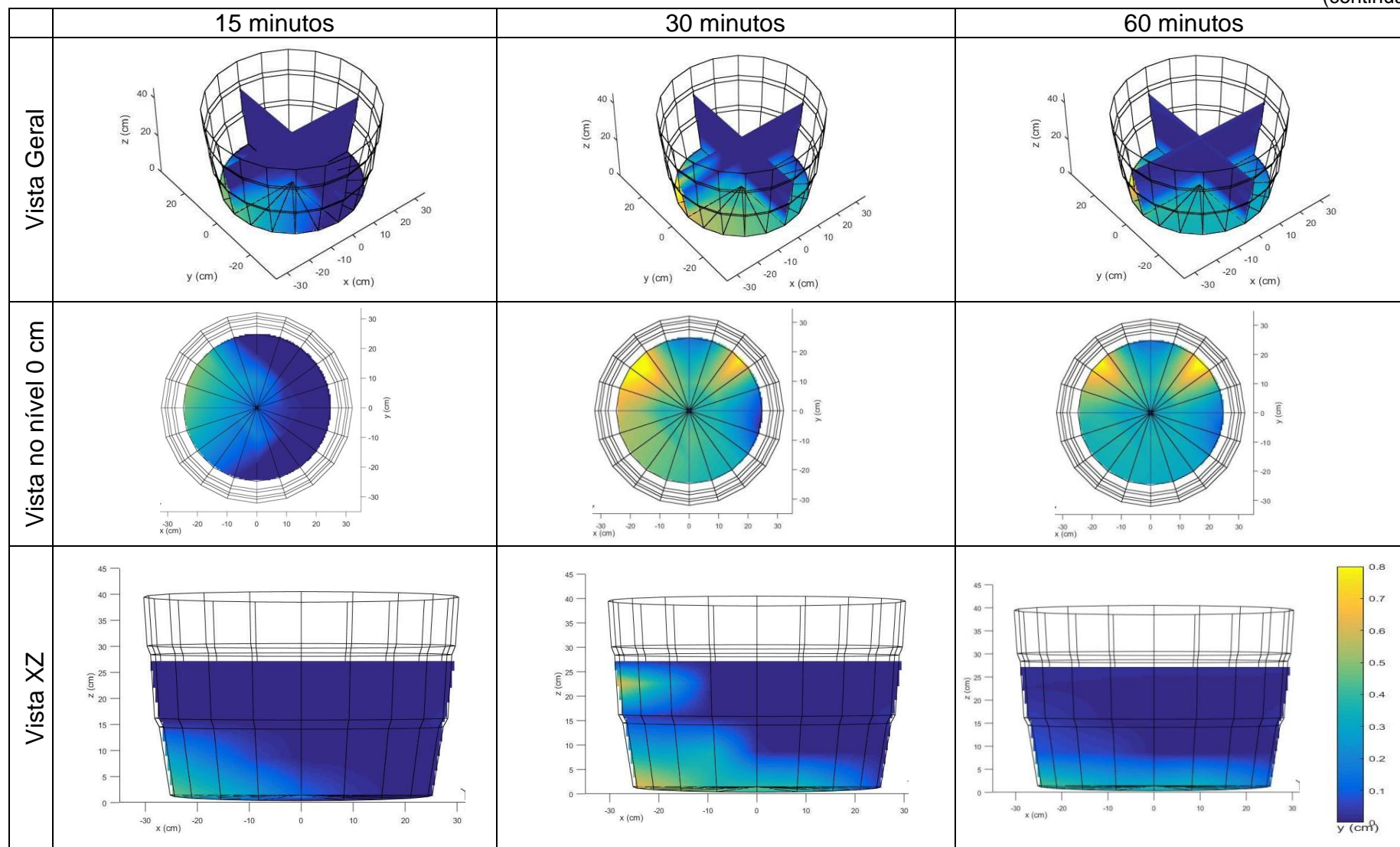
GRÁFICO 7: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.H}^{-1}$ )



Fonte: O Autor, 2017.

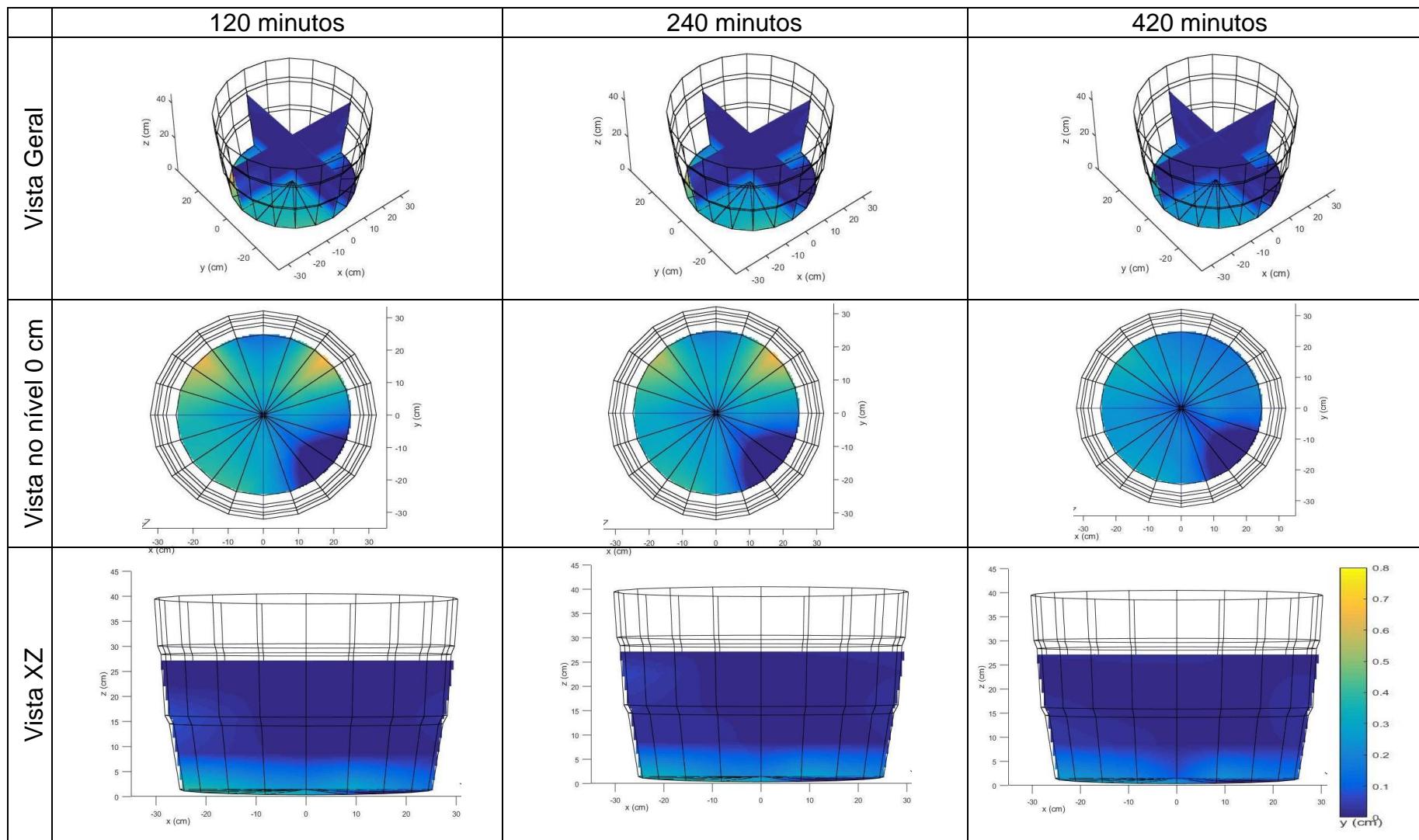
QUADRO 6 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



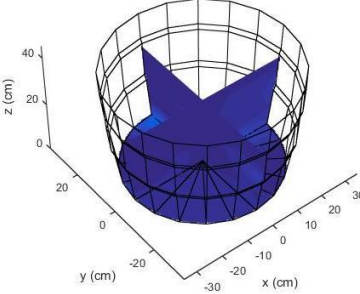
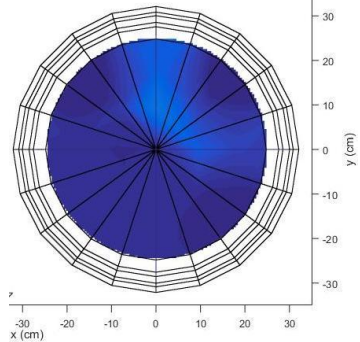
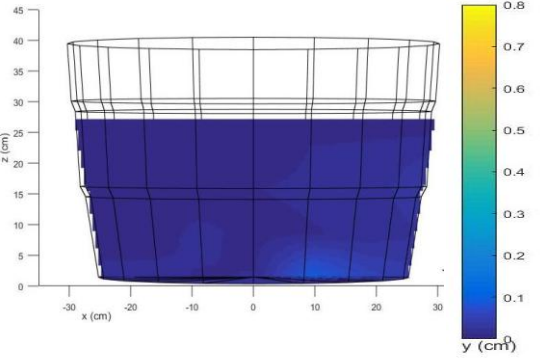
QUADRO 6 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ 

(continua)



QUADRO 6 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ 

(conclusão)

	1500 minutos		
Vista Geral			
Vista no nível 0 cm			
Vista XZ			

Fonte: O autor

## 5.8 ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E PULSO INSTANTÂNEO DE TRAÇADOR COM VAZÃO DE 7,2 L.H<sup>-1</sup>

A evolução da pluma de traçador com o tempo para o ensaio de injeção de pulso instantâneo de solução de sal com vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> é apresentada no Quadro 7.

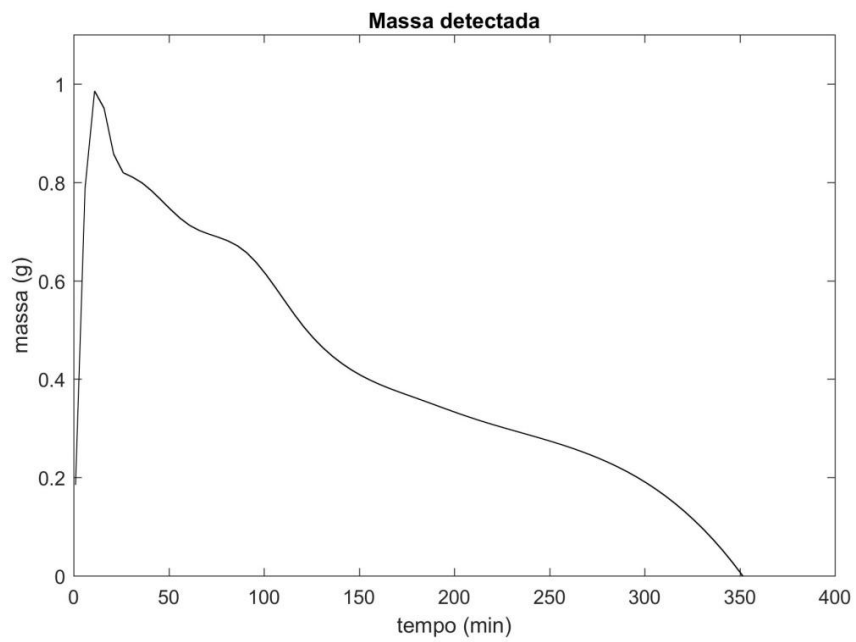
A concentração máxima de traçador detectada no volume de controle foi de 0,3 g.L<sup>-1</sup>. A massa injetada foi de 1 g de sal diluída num volume de 20 ml de água, sendo a sua concentração de 50 g.L<sup>-1</sup>. O imageamento obtido para o avanço da pluma de traçador mostra uma forte deposição de massa de traçador no fundo do tanque, a qual persiste até o final do escoamento, podendo ser visualizada nas vistas XY para o fundo do tanque. Verifica-se a ocorrência de uma zona de deposição no terceiro quadrante na região próxima à parede do tanque, no entorno das coordenadas x,y (-20,-20 cm), a qual inicia sua formação aos 10 minutos de escoamento e , atingindo seu pico no tempo de 30 minutos. Após os 30 minutos, tal zona de estagnação começou a ser desfeita, mas ainda permaneceu detectável até o tempo de 180 minutos. A máxima massa depositada no fundo do tanque foi correspondente aos 20 minutos de escoamento, num total de 0,065 g de sal depositados. A massa depositada no terceiro quadrante que foi detectada resultou em 0,037g de sal, correspondendo a 56,9% de toda a massa detectada no fundo.

Pode-se detectar, ainda, a deposição de traçador na região central do perímetro que delimita o fundo do tanque, a qual está presente durante todo o escoamento, podendo ser visualizada na vista do nível 0 cm.

A deposição de sal no fundo do tanque também é atestada pelo imageamento obtido para as vistas XZ. No tempo de 10 minutos, nota-se uma zona de máxima concentração junto à parede, a qual é proveniente da deposição imediata do pulso salino aplicado no tanque e, que foi se difundiu ou perdeu a sua intensidade com o escoamento.

A massa de traçador detectada em todo o volume de controle atingiu seu pico no tempo de 12 minutos (Gráfico 8), totalizando uma massa total de 0,975 g de sal detectados, correspondendo a uma detecção de 97,5%. A massa de traçador injetada deixou o sistema após um tempo de 350 minutos.

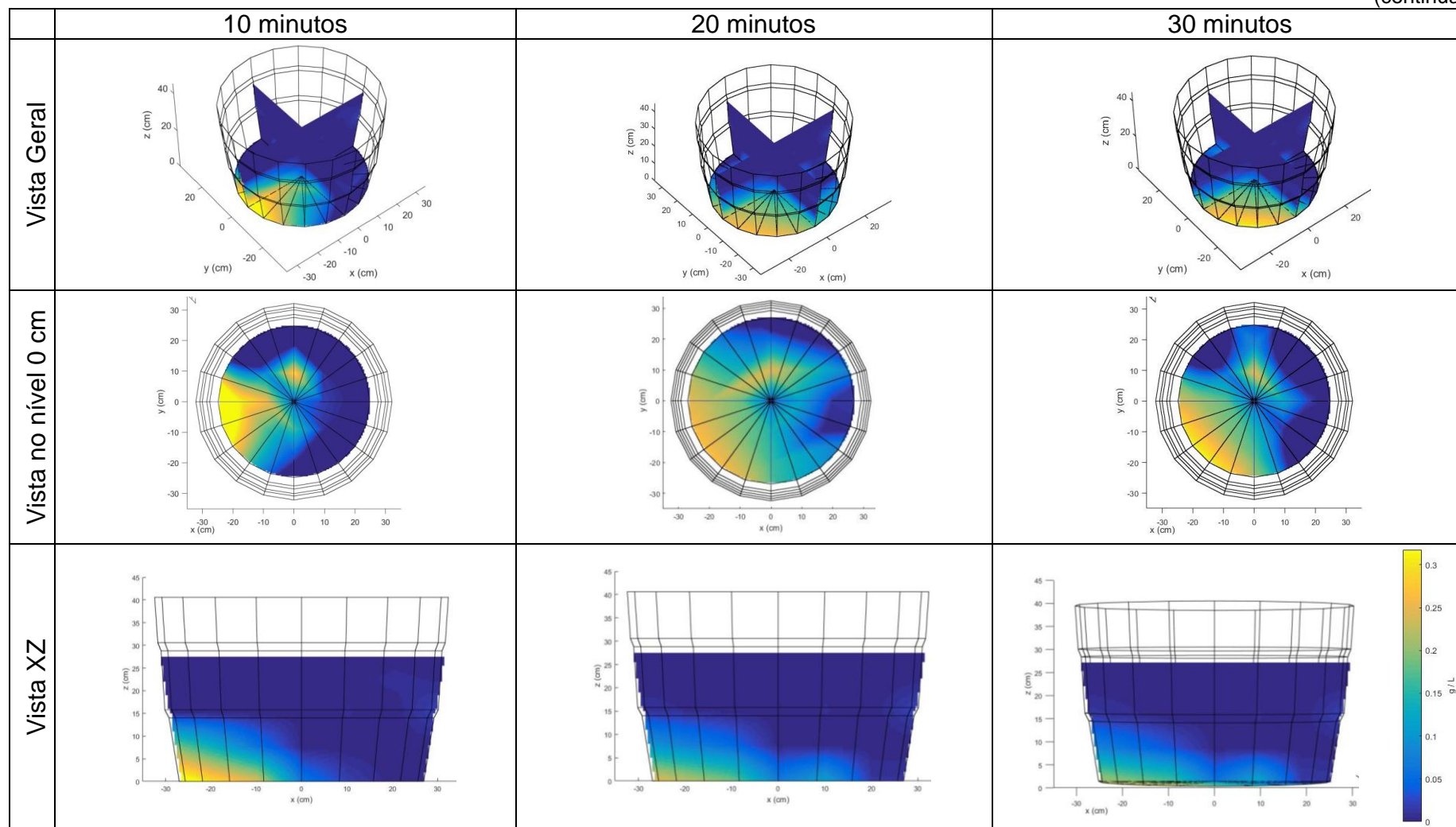
GRÁFICO 8: MASSA TOTAL DETECTADA NO VOLUME DE CONTROLE (FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE 7,2 L.H<sup>-1</sup>) PARA UM PULSO INSTANTÂNEO DE 1G DE SAL



Fonte: O Autor, 2017.

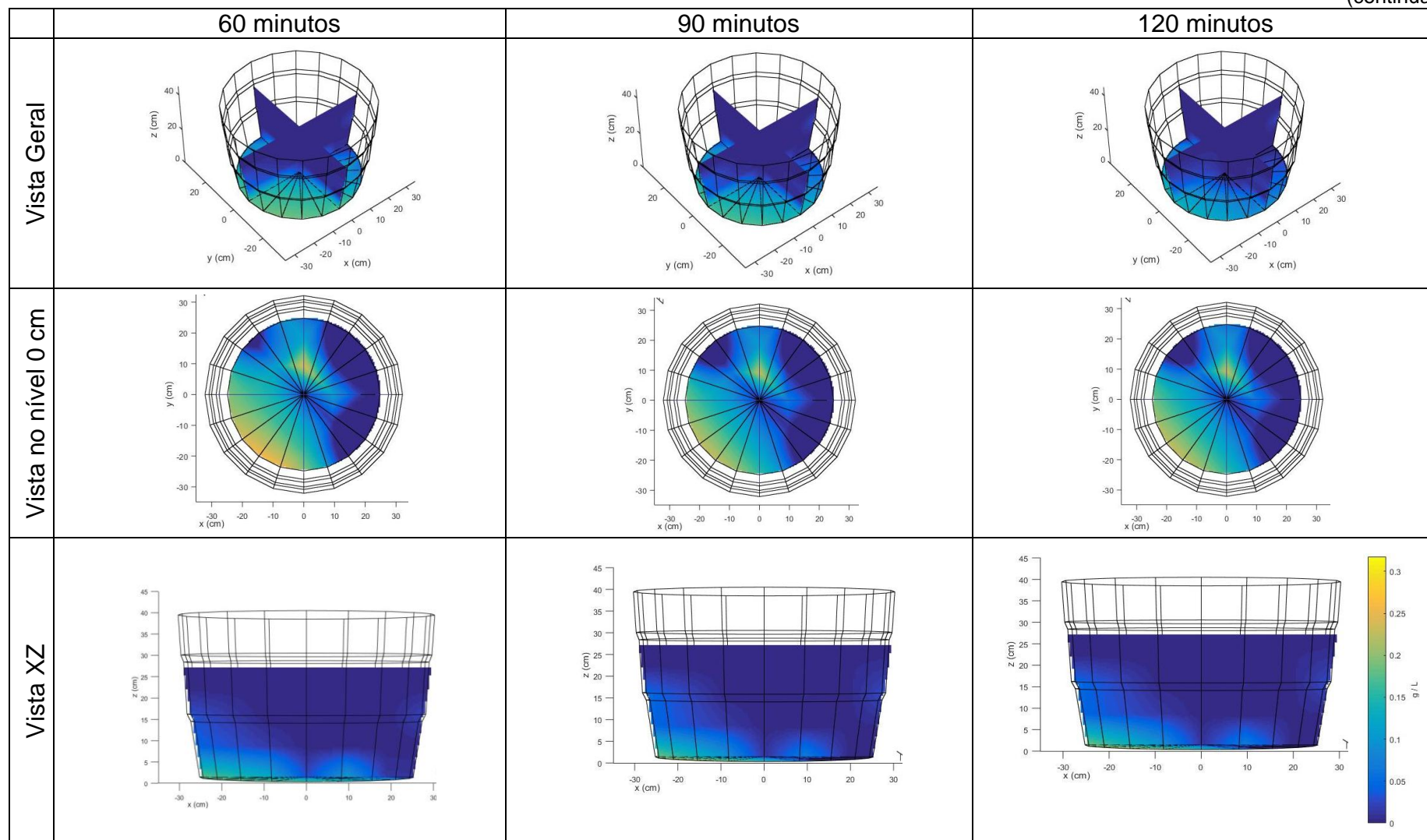


QUADRO 7 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  PARA APLICAÇÃO DE PULSO INSTANTÂNEO (continua)

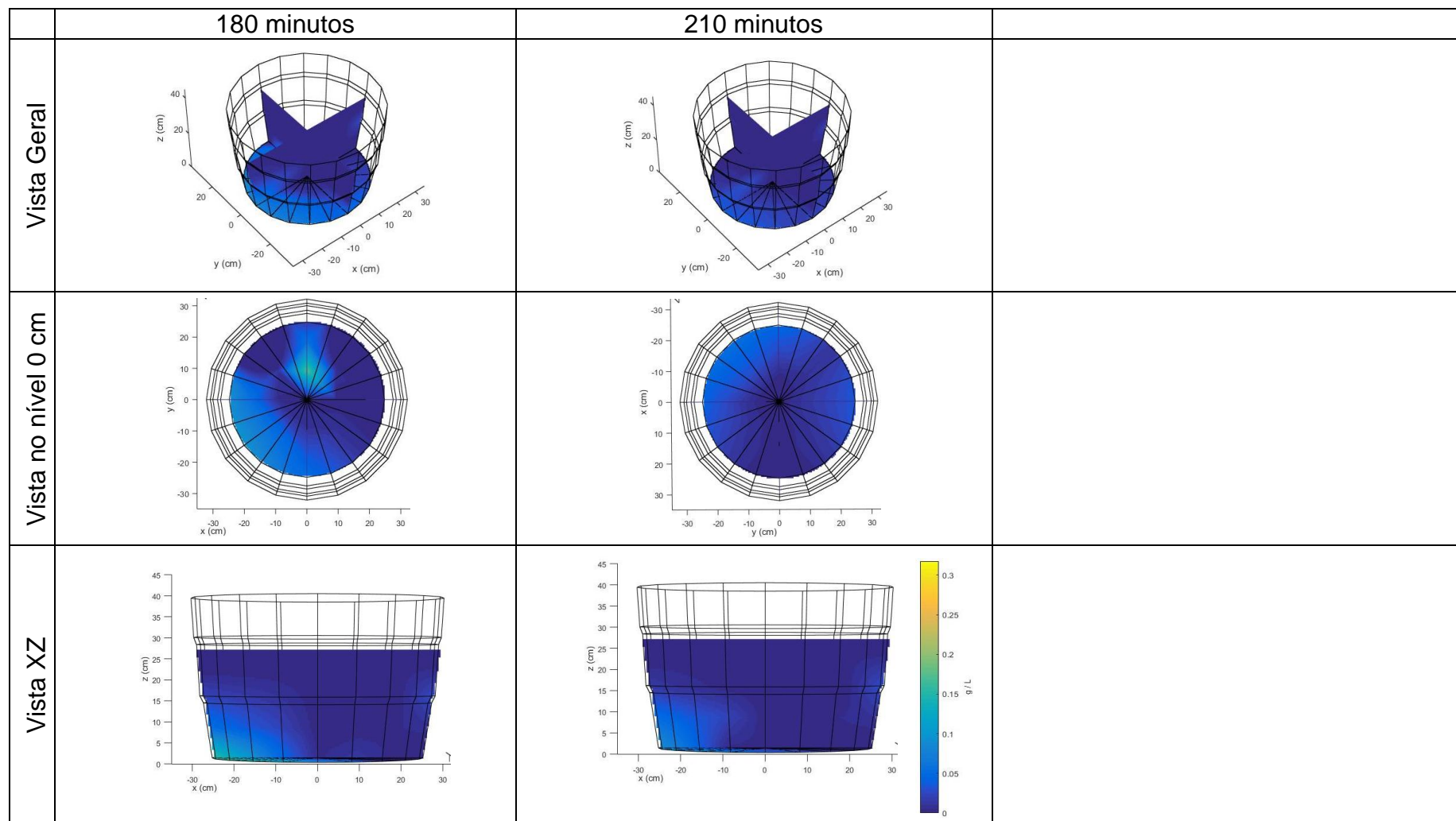




QUADRO 7 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$  PARA APLICAÇÃO DE PULSO INSTANTÂNEO (continua)



QUADRO 7 - ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE COM MEIO SUPORTE E VAZÃO DE  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$  PARA APLICAÇÃO DE PULSO INSTANTÂNEO (conclusão)

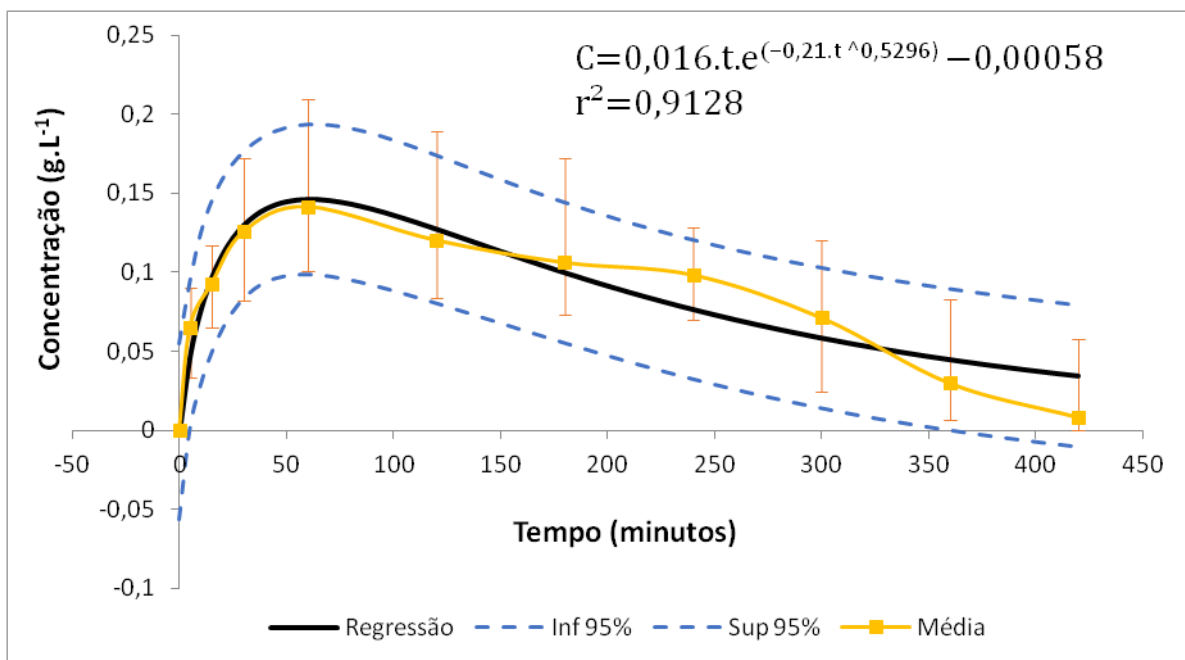


Fonte: O autor

### 5.9 EXEMPLO DE CURVA DE CURVAS DE CONCENTRAÇÃO PARA O ENSAIO DESCENDENTE DE VAZÃO 7,2 L.H<sup>-1</sup> SEM MEIO SUPORTE

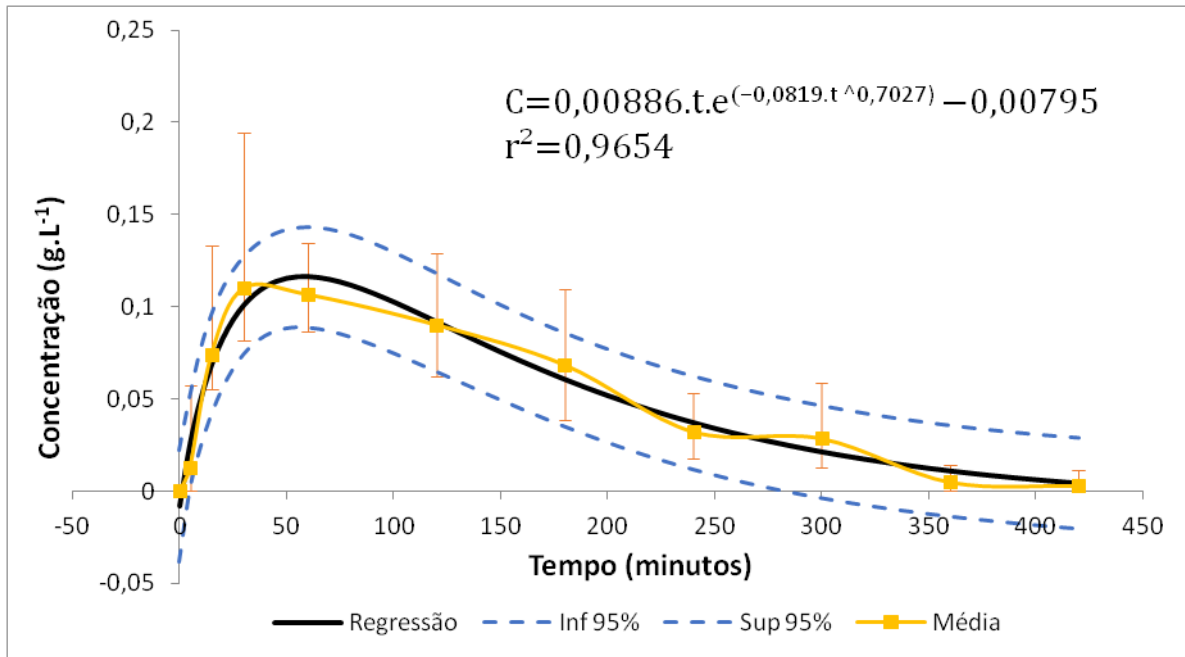
Os gráficos 9, 10, 11 e 12 trazem as curvas de concentração que foram obtidas pela regressão dos dados de concentração medidos com seus respectivos tempos para os níveis 0 cm, 7,5 cm, 15 cm e 22,5 cm para o ensaio de fluxo ascendente, sendo o tanque preenchido apenas com água e vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup>. São apresentados ainda os limites do intervalo de confiança de 95 % tanto superior, quanto inferior e também a barra de erros com as concentrações médias medidas. As curvas de regressão obtidas para todos os ensaios, com as quais é possível calcular a concentração de sal em cada um dos níveis para um determinado tempo, apresentaram uma correlação forte ( $r > 0,75$ ) com os dados reais medidos.

GRÁFICO 9 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 0 CM ENSAIO DE FLUXO DESCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( Q= 7,2L.h<sup>-1</sup>)



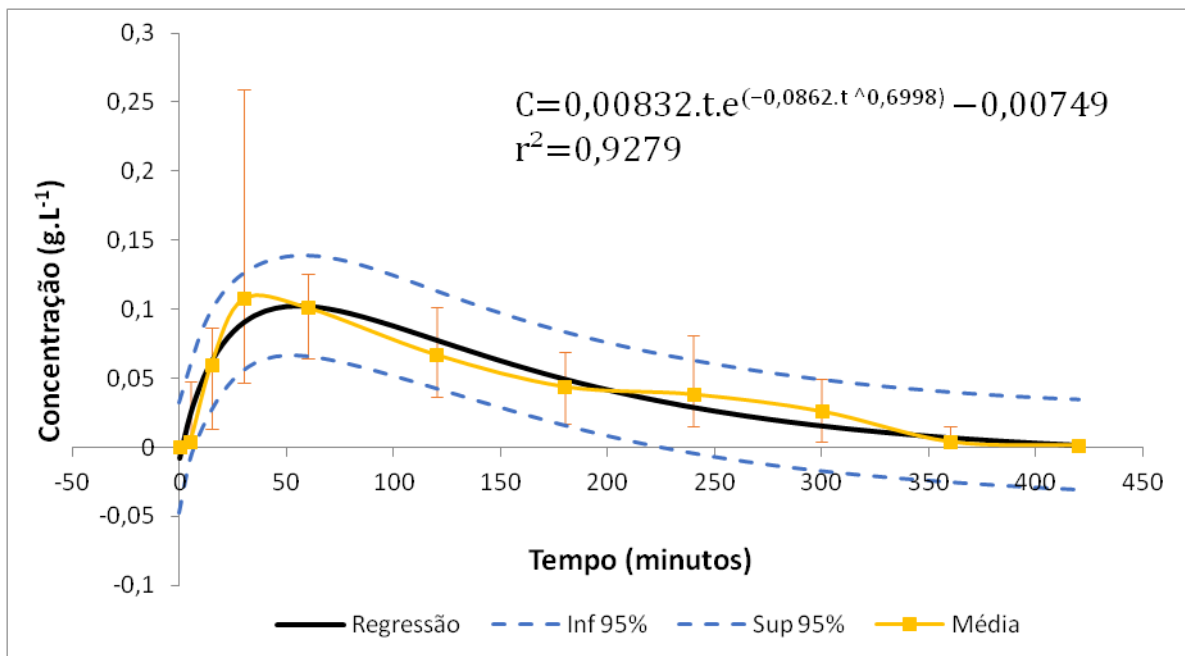
FONTE: O Autor (2018).

GRÁFICO 10 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 7,5 CM ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE (  $Q= 7,2L.h^{-1}$  )



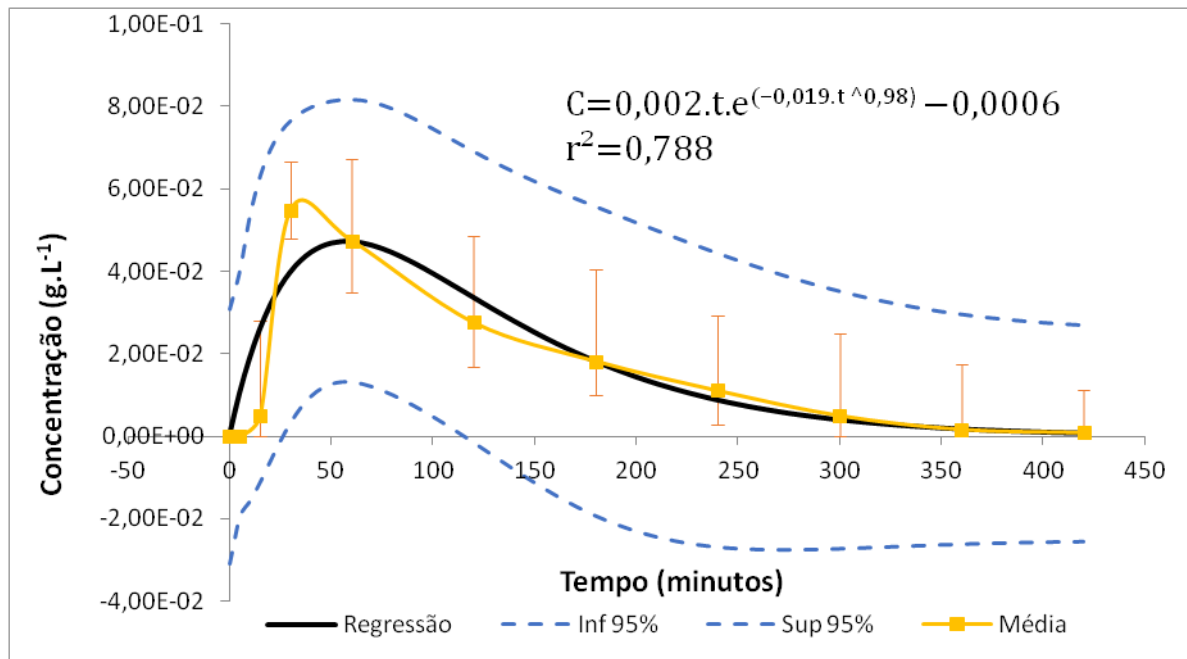
FONTE: O Autor, 2018.

GRÁFICO 11 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 15 CM ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE (  $Q= 7,2L.h^{-1}$  )



Fonte: O Autor, 2018.

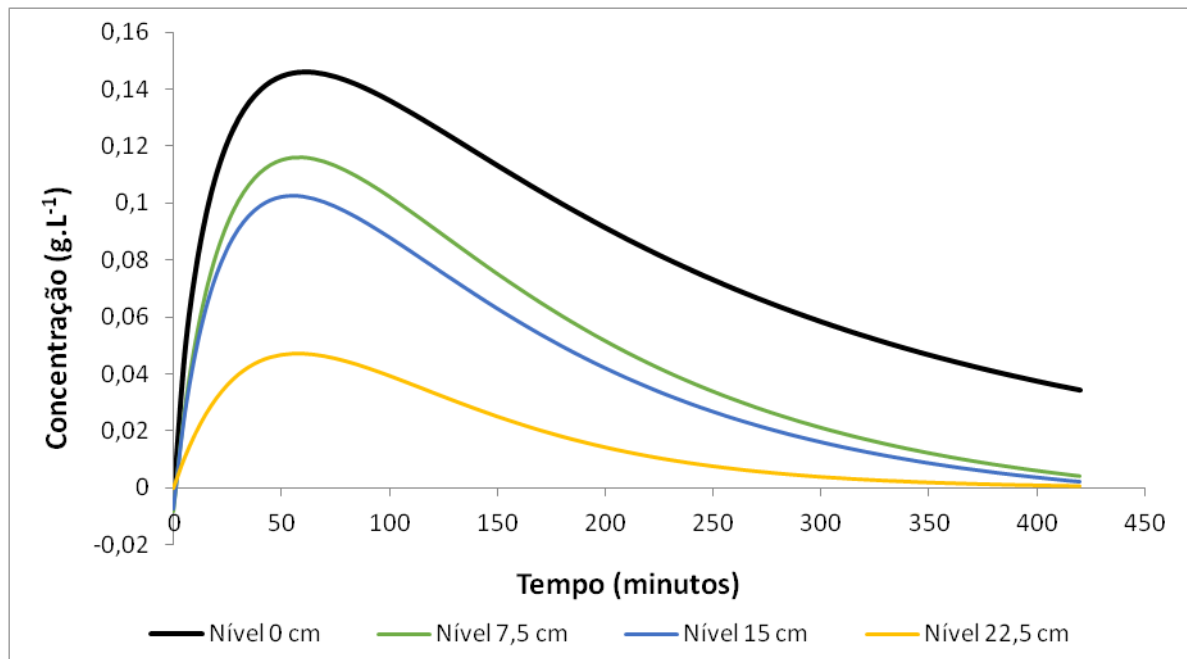
GRÁFICO 12 - CURVA DE CONCENTRAÇÃO PARA O NÍVEL 22,5 CM ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE (  $Q= 7,2L.h^{-1}$  )



Fonte: O Autor, 2018.

O gráfico 13 apresenta as curvas de concentração do traçador salino sobrepostas, para o ensaio citado acima. Verifica-se que o nível 0 cm, o fundo do tanque, apresenta a maior concentração de traçador em todo o decorrer do ensaio. Tal fato atesta a ocorrência de zonas de deposição que foram identificadas no imageamento obtido da pluma de traçador (Quadro 2). A zona de deposição localizada no fundo do tanque e que se forma nos trinta primeiros minutos de escoamento, durante a injeção da solução salina, alimenta os níveis superiores do tanque, quando o sal depositado no fundo é transferido para zonas superiores seja por difusão, seja pelo transporte das partículas devido ao escoamento. Para esta modelagem, a família de curvas apresenta concentração máxima na marca de 60 minutos. Interpreta-se que a distribuição de massa desigual segundo a profundidade do tanque é decorrente de retenção de matéria em níveis inferiores influenciando de sobremaneira o tempo de detenção médio do processo. Aos 420 minutos, quando todos os níveis superiores apresentam uma concentração média praticamente nula, o nível de fundo ainda detém uma concentração média residual em torno de  $0,034 \text{ g.L}^{-1}$ . Essa massa depositada no fundo se esvai lentamente, num processo difusivo, decorrente da zona de deposição, distante da corrente principal do escoamento.

GRÁFICO 13 - CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DO ENSAIO DE FLUXO ASCENDENTE SEM MEIO SUPORTE ( $Q = 7,2 \text{ L.h}^{-1}$ )



Fonte: O Autor, 2018.

## 5.10 PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Na tabela 2, são apresentados os parâmetros hidráulicos calculados para o SAC em suas diferentes configurações geométricas e de escoamento:

TABELA 2 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA OS SAC EM SUAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS E DE ESCOAMENTO

Ensaio	Vazão ( $\text{L.h}^{-1}$ )	$t_n$ (minutos)	$t_m$ (minutos)	$e_v$ (%)	$\lambda$	ICC (%)	N
Ascendente sem meio suporte	7,2	562,5	170	30	0,024	11,76	577
Descendente sem meio suporte	3,6	1125	748	66	0,027	2	68
Descendente sem meio suporte	7,2	562,5	126	22	0,020	3,9	62
Descendente com meio suporte	3,6	254	90	36	0,063	22,1	47
Descendente com meio suporte	7,2	562,5	115,20	16	0,0163	26,03	42
Pulso instantâneo com meio suporte	7,2	254	47	18	0,036	53,11	1600

Fonte: O Autor, 2017.

Onde  $t_n$  é o tempo de detenção nominal ou teórico,  $t_m$  é o tempo de detenção médio das partículas obtido através da curva DTR,  $e_v$  é a eficiência volumétrica,  $\lambda$  a eficiência hidráulica e ICC sendo o índice de curtos-circuitos.

O maior tempo médio de detenção, obtido com os parâmetros derivados da DTR, foi detectado no ensaio com configuração descendente de escoamento, onde o tanque estava apenas preenchido com água de abastecimento e com vazão de 3,6 L.h<sup>-1</sup>. Tal se deve à deposição de traçador salino no fundo do tanque, conforme se observa no imageamento da pluma de traçador apresentada no quadro 4, onde pode verificar uma forte deposição no fundo do tanque, mostrada com mais detalhes nas vistas do nível 0 cm e também na vista XZ. O menor tempo médio de detenção ocorreu no ensaio de injeção de um pulso instantâneo de 1 g de sal, devido a esse ensaio ser realizado com quantidade menor de traçador que os demais, nos quais foram utilizados 3,6 g e 7,2 g para os ensaios de vazões de 3,6 L.h<sup>-1</sup> e 7,2 L.h<sup>-1</sup>.

Verifica-se, que para os ensaios realizados com a vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> para o fluxo descendente, que sem a presença de brita, o tempo médio foi de 126 minutos e, com a camada de brita no interior do tanque, o tempo médio foi de 115,2 minutos, ocorrendo, assim, um tempo médio 9,38% menor com a camada de brita, sendo que nessa última configuração o índice de vazios do tanque foi reduzido para 45% devido à presença do agregado.

A maior eficiência volumétrica ( $e_v$ ) foi obtida para o ensaio descendente sem meio suporte e vazão de 3,6 L.h<sup>-1</sup>. O valor de  $e_v$  obtido foi de 66%, valor esse que representa o volume do tanque que entrou em contato com o traçador durante o escoamento, o que pode ser visualizado nas vistas XY no Quadro 3. Para o ensaio descendente com presença de meio suporte e vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup>, pode-se verificar nas vistas XY no tanque (Quadro 5) que a região superior do tanque não é atendida pelo escoamento, fator esse que justifica a baixa eficiência volumétrica obtida ( $e_v=16\%$ ).

Ainda, comparando-se os ensaios, percebe-se que a eficiência volumétrica é menor para os ensaios com vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> e maior para o ensaio com vazão de 3,6 L.h<sup>-1</sup>. A eficiência volumétrica é maior para ensaios com vazões menores, pois nessas vazões, a deposição de sal no fundo do tanque é mais acentuada e a massa de traçador será eliminada em sua maior parte pelo processo difusivo, fazendo com que a massa injetada esteja por mais tempo em contato com o tanque e sendo assim difundida para todas as regiões.

Nenhuma das configurações aplicadas para a realização dos testes apresentou eficiência hidráulica ( $\lambda$ ) satisfatória. Chang et al. (2016) classificam a eficiência hidráulica de um SAC em três níveis: aqueles que apresentam uma eficiência ( $\lambda$ ) igual ou superior a 0,75 possuem uma eficiência hidráulica boa; os que possuem o valor  $\lambda$  entre 0,5 e 0,75 possuem eficiência satisfatória. Ao passo que, os que possuem o coeficiente  $\lambda$  menor ou igual a 0,5 possuem uma eficiência baixa. Desse modo, todos os ensaios realizados resultaram em eficiência hidráulica baixa. Matos et al. (2015) analisaram 3 SAC de 25 metros de comprimento, 3 metros de largura e 40 cm de profundidade e encontraram eficiências variando de 0,37 a 0,46.

Tang et al (2017) analisaram 4 SAC de escoamento subsuperficial, de 12,5 m de comprimento, largura de 1,5 m e profundidade de 30 cm num período de 120 dias e observaram um aumento de 28% na eficiência hidráulica com o passar do tempo e a colmatação dos SAC. Também, a presença de microrganismos e das raízes das plantas tiveram um papel fundamental no aumento da eficiência hidráulica. Entretanto, considera-se que a baixa eficiência hidráulica obtida nos ensaios desenvolvidos neste trabalho de devem à densidade elevada do traçador em relação à água e à baixa vazão de operação, com um movimento que suscita sensível decantação ocasionando regiões de depósito e retenção.

Chang et al (2016) avaliaram o comportamento da eficiência hidráulica com base na profundidade de SAC de escoamento superficial. Para SAC com profundidade superior a 1,5 m os valores de  $\lambda$  variaram de 0,07 a 0,15, valores esses que se aproximam dos obtidos nesse experimento. Levando-se em conta o experimento de Chang et al (2016) pode-se influir que a baixa eficiência para os ensaios realizados se deve também a uma alta razão entre a profundidade da lâmina d'água no tanque utilizado no experimento e a área da superfície.

O índice de curtos-circuitos aumentou quando se adicionou brita ao tanque. Tal aumento provavelmente se deva à redução do volume de água presente no interior do tanque. Isso faz com que as partículas injetadas percorram em menor tempo caminhos preferenciais até a saída. Os valores obtidos por Matos et al (2015) variaram de 17 a 23%.

Em todas as configurações de escoamento testadas o escoamento é do tipo fluxo contínuo, pois o número N calculado é elevado. O maior valor obtido foi para o ensaio descendente com camada suporte e vazão de 7,2 L.h<sup>-1</sup> (N=1600). Tal valor se deve à rapidez com que o traçador deixou o tanque para essa configuração. Isso

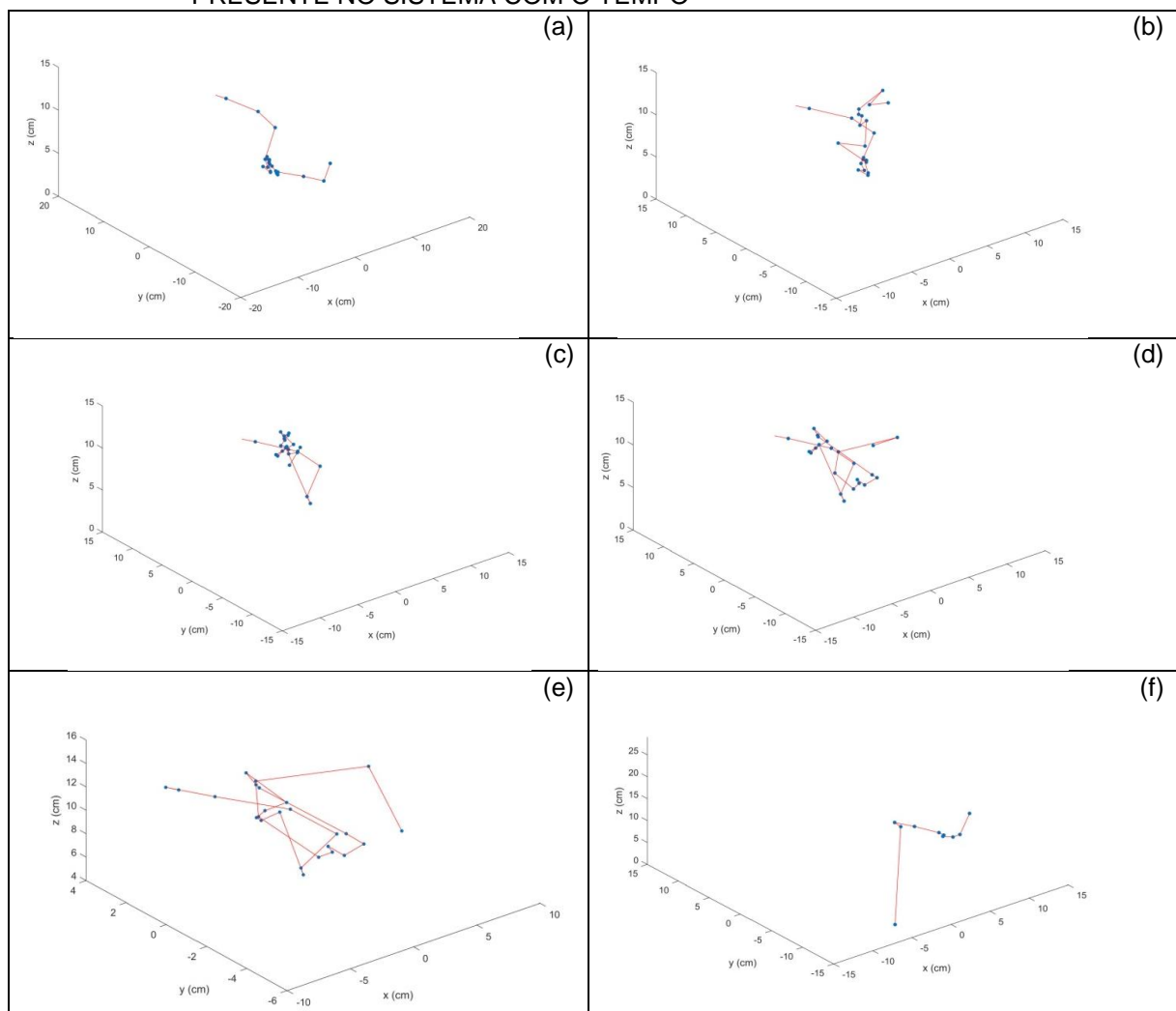


se confirme pelo fato do tempo de detenção médio ( $t_m$ ) ser o menor entre os obtidos nos ensaios (47 minutos). Destaca-se também o elevado número N (577) para o tanque sem meio suporte, com escoamento ascendente e vazão de  $7,2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ . O tanque se enquadra como de fluxo contínuo devido à deposição acentuada de traçador no fundo do tanque logo no início do ensaio (Quadro 1) e conseqüentemente ao tempo elevado que o traçador levou para deixar completamente o tanque (1500 minutos) pelo processo difusivo.

### 5.11 VARIAÇÃO DO CENTRO DE MASSA

O Quadro 8 apresenta a variação dos centros de massa para os ensaios realizados e na Tabela 3 estão contidos os valores das coordenadas médias do centro de massa no decorrer do tempo para os ensaios realizados.

QUADRO 8 - VARIAÇÃO DO CENTRO DE MASSA DA PLUMA DE TRAÇADOR SALINO PRESENTE NO SISTEMA COM O TEMPO



FONTE: O Autor, 2018.

Legenda:

- (a) Ensaio de fluxo ascendente com vazão de  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ , tanque preenchido com água
- (b) Ensaio de fluxo descendente com vazão de  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ , tanque preenchido com água
- (c) Ensaio de fluxo descendente com vazão de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ , tanque preenchido com água
- (d) Ensaio de fluxo descendente com vazão de  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ , tanque preenchido com água e brita
- (e) Ensaio de fluxo descendente com vazão de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ , tanque preenchido com água e brita
- (f) Ensaio de fluxo descendente com vazão de  $7,2 \text{ L.h}^{-1}$ , tanque preenchido com água e brita, com injeção de pulso instantâneo

TABELA 3 - MÉDIA DOS CENTROS DE MASSA DA PLUMA DE SAL NO TEMPO PARA OS TESTES EXECUTADOS

Ensaio	Vazão ( $\text{L.h}^{-1}$ )	X (cm)	y(cm)	z (cm)
Ascendente com água	7,2	1,21	0,62	10,24
Descendente com água	3,6	-2,02	0,39	11,74
Descendente com água	7,2	-0,57	-0,50	11,26
Descendente com água + brita	3,6	1,93	0,59	7,93
Descendente com água + brita	7,2	4,94	-1,30	7,55
Pulso instantâneo	7,2	4,32	-3,44	7,91

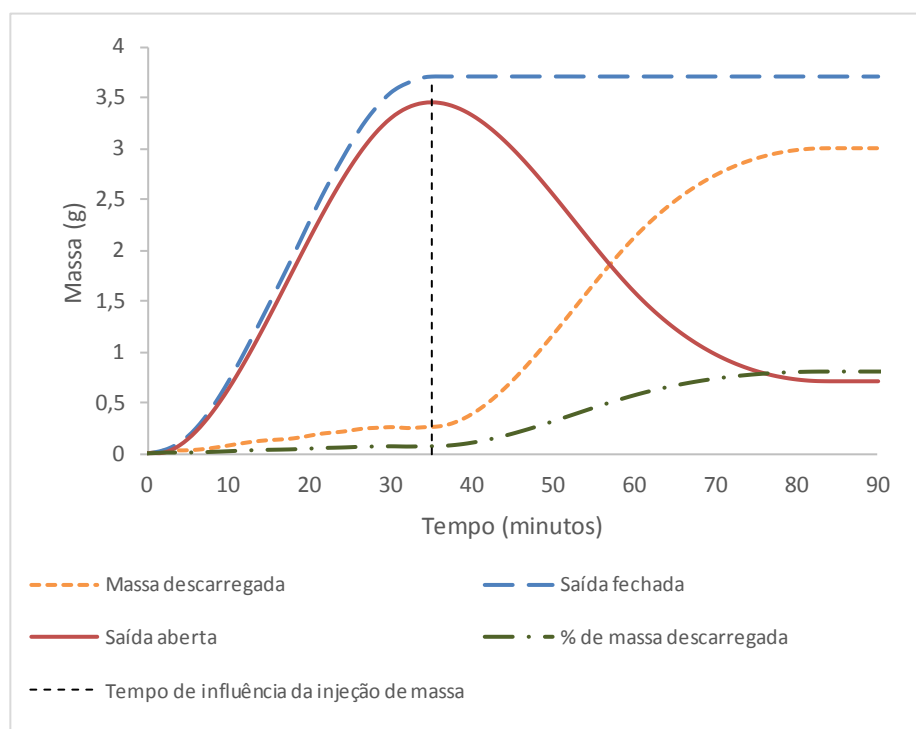
Fonte: O Autor, 2018

De uma forma geral o centro de massa se localiza próximo ao centro geométrico do volume de controle (0; 0; 13,5) com tendência a atingir cotas mais inferiores e pequena tendência no sentido de saída ( $x > 0$ ). Essa averiguação indica que não existem caminhos preferenciais laterais, junto das bordas. Como esperado o escoamento se distribui razoavelmente através das seções; ocorre, porém, intensificação da concentração em níveis inferiores, mesmo em escoamento ascendente.

## 5.12 DETECÇÃO DE MASSA E TEMPO DE DETENÇÃO

Para o ensaio descendente com presença de camada suporte e realizado com vazão média de trabalho de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ , o limite de tempo de influência da injeção de massa atingiu 35 minutos apesar da injeção ter durado 30 minutos, onde também percebe-se sua interseção com os pontos de máximo das curvas de detecção de massa para os ensaios realizados com a saída do sistema fechada e com a saída aberta.

GRÁFICO 14 - DETECÇÃO DA MASSA DE TRAÇADOR CONTIDA NO TANQUE DE ENSAIOS COM SOBREPOSIÇÃO DO ENSAIO DE INJEÇÃO DE MASSA COM SAÍDA FECHADA E ENSAIO DINÂMICO COM SAÍDA ABERTA.



Fonte: O Autor, 2018.

A curva de massa descarregada representa a diferença entre a massa injetada e a massa detectada, isto é, a massa que já deixou o sistema pela saída. A curva % de massa descarregada representa em decimal a fração de massa descarregada pela saída em função do tempo. A partir destes dados é possível inferir acerca do tempo de permanência – Tempo de Detenção – das partículas de traçador no interior do tanque. Em 2 minutos 0,7% da massa total injetada atinge a saída do sistema, a deposição densimétrica é responsável por fluxos descendentes

atingindo as camadas inferiores e a saída do sistema, assim, neste tempo as primeiras partículas já atingem a saída do sistema. Entre 20 e 21 minutos 5% da massa injetada atinge a saída. No limite de influência da injeção de massa no sistema, aos 35 minutos, 7,0 % dessa massa deixou o sistema. A partir deste instante o sistema passa a receber água isenta de sal e o decaimento de massa no sistema apresenta uma curva descendente que ao longo de mais 50 minutos, na marca de 85 minutos de operação, terá escoado para a saída um total de 81,0% da massa inicialmente injetada. A partir dos 85 minutos a saída de massa é lenta e serão mais de 2 dias para a água do sistema atingir níveis quase isentos de sal, não representados graficamente. Neste espaço de tempo, posterior aos 85 minutos, conclui-se que as áreas de deposição não atingidas pelo escoamento principal, regiões de estagnação, proporcionam apenas emanção difusiva. Neste experimento, esta massa estagnada atingiu 19,0% da massa total injetada. Entre 0 e 35 minutos houve descarte de 7% da massa, com um tempo de detenção médio de 17,5 minutos. Entre 35 e 85 minutos ocorreu 74% de queda de massa no sistema. Para esta massa o tempo de detenção médio foi de 60 minutos. Para os 19% remanescentes da massa o tempo de detenção ocorre ao longo de dias.

## 6 CONCLUSÕES

A metodologia apresentada, para a medição da concentração de traçador no volume de controle que foi utilizada para um SAC se mostrou satisfatória, sendo que a detecção da massa injetada foi superior a 95% em todos os ensaios realizados. Foi possível a obtenção do mapeamento do percurso da pluma de traçador nas condições de escoamento descritas como ferramenta de avaliação do sistema. A obtenção numérica da distribuição da concentração no volume de controle proporciona diversas aferições e, muitas delas, são apenas possíveis de serem observadas em um processo dinâmico de observação com ferramentas disponíveis em tempos de execução, como a rotação de gráficos, a ampliação para a verificação dos detalhes em determinadas zonas, cortes em seções específicas, cálculos específicos a partir de dados numéricos, além de inúmeras ferramentas e detalhamentos que fogem ao escopo do presente trabalho devido à limitação de conteúdo e viabilidade de implantação tempestiva.

Com a avaliação hidrodinâmica, pode-se concluir que na configuração de fluxo descendente tem-se uma maior homogeneidade da distribuição de massa de sal no interior do tanque, ao passo que no regime ascendente de escoamento ocorre a deposição imediata de massa no fundo, a qual é eliminada em sua maior parte pelo processo difusivo. Quando foram aplicadas vazões de  $3,6 \text{ L.h}^{-1}$  em ambas as configurações, embora a massa de sal injetada fosse menor que na vazão de  $7.2 \text{ L.h}^{-1}$ , o tempo necessário para a completa eliminação da massa de traçador foi superior, devido à deposição densimétrica do traçador e sua transferência por difusão.

A hipótese da regressão dos dados de concentração média para uma curva exponencial natural resultou em uma correlação satisfatória ( $r > 0,75$ ), podendo-se admitir a previsibilidade de dados de concentração em diferentes níveis do SAC ao longo do tempo em nível de 95% de confiança.

O baixo tempo de detenção hidráulico (de 0 a 35 minutos) para 7% da massa de traçador injetada evidencia a deposição densimétrica no sentido de saída. Também infere-se necessidade de interferências geométricas no sistema devido a zonas de curto-circuito e caminhos preferenciais.

Sugere-se para trabalhos futuros, investigações nas quais se implantem ferramentas, como simulação numérica em contraponto aos dados experimentais,

modelos de propagação, simulação de reatores ideais e a sobreposição comparativa com o reator experimental para identificação de processos de otimização, pontos de interferência geométrica, variação de modos de operação e avanços na velocidade de aquisição de dados através de mecanismos automatizados.

## REFERÊNCIAS

BIRD R. B. et al. **Transport Phenomena**. 2 ed. Wiley and Sons, p. 905, 2006

Bodin H. et al. Influence of residence time analyses on estimates of wetland hydraulics and pollutant removal. **Journal of Hydrology**, 501: 1-12. 2013a.

Bodin H. et al. Tracer behaviour and analysis of hydraulics in experimental free surface wetlands. **Ecological Engineering**, 49: 201-211. 2013b.

Bodin H., Persson J. Hydraulic performance of small free water surface constructed wetlands treating sugar factory effluent in western Kenya. **Hydrology Research**, 43(4): 476-488. 2012:

Bolster C. H., Saiers J. E. Development and evaluation of a mathematical model for surface-water flow within the Shark River Slough of the Florida Everglades. **Journal of Hydrology**, 259: 221-235. 2002

Brasil M. S., Matos A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Vol 13 no.3: 323-328. 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria Nº 2.914**. Brasília, 2011.

Chang T. et al. Flow uniformity and hydraulic efficiency improvement of deep-water constructed wetlands. **Ecological Engineering**, 92: 28-36. 2016

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. DI B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. 2. ed. São Carlos: RiMa, p. 792, 2006

FICK A. Über diffusion. Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie 94, 59–86. 1855

FOGLER H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. 5 ed. Prentice Hall, p. 1080, 2008

FOX R. W. et al. **Introduction to Fluid Mechanics**. 8 ed. Wiley Press, p. 896, 2011

GILAT A. **MATLAB® com aplicações em Engenharia**. 2 ed. Bookman, p. 359, 2006

Greenlee L. F. et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology and today's challenges. **Water Research**, 43: 2317-2348. 2009

HANSELMAN D., LITTLEFIELD B. **MATLAB® Curso Completo**. Prentice Hall, p. 676, 2003.

Harvey, J. W. et al. Solute transport and storage mechanisms in wetlands of the Everglades, south Florida. **Water Resources Research**, 41: W05009. 2005.

Holland J. F. et al. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics. **Ecological Engineering**, 23: 189-203. 2004

INCROPERA F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. LTC, p. 639, 2007.

Jordan F. L. et al. Consumptive water use and stomatal conductance of *Atriplex lentiformis* irrigated with industrial brine in a desert irrigation district, **Agricultural and Forest Meteorology**. 149: 899-912. 2009.

KADLEC R. H., KNIGHT R. L. **Treatment Wetlands**. 1 ed. CRC Press, p. 1046, 1996

KADLEC R. H., WALLACE S. D. **Treatment Wetlands**. 2 ed. CRC Press, p. 366, 2009

KUMMER A. C. B. · WIECHTECK G. K. · SZÉLIGA M. R. Sistema de alagados construídos aplicado ao tratamento e reúso do resíduo concentrado de dessalinização. In: Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Sandra Medina Benini; Maria Betânia Moreira Amador. (Org.). Recursos Hídricos Gestão e Sustentabilidade. 2ed Turã -SP.: ANAP - Associação Amigos da Natureza da Alta Paulista, 2017, v. 1, p. 169-182.

Lightbody A. F. et al. Observation of short-circuiting flow paths within a free-surface wetland in Augusta, Georgia, U.S.A., **Limnology and Oceanography**. 53(3): 1040-1053. 2008.

Lito P. F. et al. Universal model for accurate calculation of tracer diffusion coefficients in gas, liquid and supercritical systems. **Journal Of Chromatography**. 1290: 1-26. 2013.

LE MOULEC Y. et al. Comparison of systemic, compartmental and CFD modelling approaches: Application to the simulation of a biological reactor of wastewater treatment, **Chemical Engineering Science** 65: 343-350. 2010

LEVENSPIEL O. **Chemical Reaction Engineering**. ed. 3. ed. John Wiley and Sons, p. 668, 1999

Matos M. P. et al. Saline Tracer Use For Clogging And Hydrodynamic Evaluations In Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands, **Revista Engenharia Agrícola** v. 35, n.6, p.1137-1148. 2015.

Morillo J. et al. Comparative study of brine management technologies for desalination plants, **Desalination** 336: 32-49. 2014.

NETTO A; FERNÁNDEZ M. F. **Manual de Hidráulica**. ed. 9. ed. Blucher, p. 632, 2015

Phuck B. D. et al. Dynamical analysis and control synthesis of RO desalination process against water hammering. **Desalination**, 402: 133-142. 2016

ROMA, W.N.L **Fenômenos de Transporte para Engenharia**. Ed. Rima, 2003.

Silva L. L et al. Traçadores: O Uso de Agentes Químicos Para Estudos Hidrológicos, Ambientais, Petroquímicos e Biológicos. **Química Nova**. v. 32. n. 6, 1576-1585. 2009.



SVOLENSKI, A. C.; **Aspectos Fitossociológicos e Pedológicos de Três Superfícies de Agradação do Rio Guaraguaçu, Litoral do Paraná.** 2000. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

Tang P., Yu B., Zhou Y., Zhang Y., Li J. Clogging development and hydraulic performance of the horizontal subsurface flow stormwater constructed wetlands: a laboratory study. **Environmental Science and Pollution Research**, **24**: 9210-9219. 2017.

Thackston E. L., Shields F. D. J., Schoroeder P. R. Residence time distribution of shallow basins. **ASCE Journal of Environmental Engineering**, **113**: 1319-1332. 1987.

VON SPERLING, M. Estudos e Modelagem da Qualidade da Água em Rios. Belo Horizonte – DESA – UFMG. V.7, 452p. 2007.

Zahraeifard V.; DENG Z. Hydraulic residence time computation for constructed wetland design. **Ecological Engineering**, **37**: 2087-2091. 2011.

Zhao H. et al. Theoretical analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high salinity wastewater. **Desalination**, **273**: 292-298. 2011.