Campus de São Carlos

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE METODOLOGIA PARA
QUANTIFICAR A DISPERSÃO DE UM SOLUTO NO
ESCOAMENTO DE ÁGUA EM MEIO POROSO**

MARIA VIRGÍNIA MASCHIETTO RUZZA

Orientador: Prof. Dr. MARCIUS F. GIORGETTI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE METODOLOGIA
PARA QUANTIFICAR A DISPERSÃO DE UM SOLUTO
NO ESCOAMENTO DE ÁGUA EM MEIO POROSO

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 25 / 07 / 01

Ass.: *Guilherme*

Maria Virgínia Maschietto Ruzza

Orientador: Prof. Dr. Marcius F. Giorgetti

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036710

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento

São Carlos

2001

Class.	TESE-EEESC
Curr.	5003
Tombo	T0171/01

1197188
24/09/01

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

R987e Ruzza, Maria Virgínia Maschietto
Estudo da viabilidade de metodologia para
quantificar a dispersão de um soluto no escoamento de
água em meio poroso / Maria Virgínia Maschietto Ruzza.
-- São Carlos, 2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Marcius F. Giorgetti.

1. Meio poroso. 2. Dispersão. 3. Escoamento.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Licenciada **MARIA VIRGÍNIA MASCHIETTO RUZZA**

Dissertação defendida e aprovada em 27-04-2001
pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular **MARCIUS FANTOZZI GIORGETTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Titular **JOÃO BAPTISTA NOGUEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **ANTENOR RODRIGUES BARBOSA JUNIOR**
(UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)

Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais,

que são a minha fortaleza.

Aos meus irmãos.

Agradecimentos

Ao professor Marcius F. Giorgetti o meu profundo agradecimento pela orientação, pela amizade e pela grande colaboração no tocante ao desenvolvimento do conhecimento adquirido.

À CAPES pelo auxílio financeiro através da bolsa de mestrado.

Aos técnicos do Laboratório de Fenômenos dos Transportes representados por Roberto César Bérghamo e Wagner Lamon.

Ao engenheiro Paulo Eduardo Silveira pela colaboração através da montagem do sistema de aquisição de dados.

Ao colega Alexandre pelo companheirismo e pelas trocas de informações.

Ao professor Roberto Cleto Pires pelas sugestões.

Às amigas Andréa Buzzini, Denise Osiro e Lucimara Aparecida Forato pelo incentivo.

RESUMO

Este trabalho investiga o fenômeno do transporte advectivo e difusivo de um soluto no escoamento permanente de água em um meio poroso, utilizando medidas condutivimétricas. O meio poroso é constituído por areia compactada no interior de um duto cilíndrico submetido a um escoamento longitudinal de água. O experimento típico consiste na introdução de um traçador na seção de montante do escoamento com a conseqüente observação da resposta a jusante do corpo de prova. Dois tipos de fonte são utilizadas para a introdução do traçador, fonte pulso e fonte degrau. A primeira parte do trabalho investiga a possibilidade técnica do uso de medidas condutivimétricas para descrever o fenômeno da dispersão do soluto no meio poroso. A segunda parte do trabalho consiste no estudo da viabilidade de desenvolvimento de metodologia para a estimação dos parâmetros de interesse a partir da modelagem matemática respectiva.

ABSTRACT

The phenomenon of the advective and diffusive transport of a solute in a steady state flow of water in a porous medium, using conductivimeters, is investigated. The porous medium is made up of sand compacted inside a piece of cylindrical pipe through which a longitudinal water flow is established. For the typical experiment a tracer is injected at the upstream section of the pipe with the consequent observation of the response downstream of the sample. Two kinds of sources are tested for the tracer injection, pulse and step. In the first part of the study the technical possibility of using conductivity tests to describe the dispersion of a solute in a porous medium is investigated. The second part involves the development of the methodology for the estimation of the parameters of interest from the respective mathematical simulation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Instrumentos	4
3.2 Transrência de massa	6
3.2.1 Difusão	6
3.2.2 Advecção	7
3.2.3 Dispersão	8
3.3 Efeito parede	10
4 MATERIAIS E MÉTODOS	12
4.1 Primeira montagem	13
4.1.1 Primeira montagem	13
4.1.2 Segunda montagem	14
4.1.3 Terceira montagem	16
4.2 Metodologia dos ensaios	21
4.2.1 Metodologia dos ensaios da primeira montagem	21
4.2.2 Metodologia dos ensaios da segunda montagem	21
4.2.3 Metodologia dos ensaios da terceira montagem	23
4.3 Desenvolvimento dos ensaios	24
5 INSTRUMENTAÇÃO	31
5.1 Calibração	32
5.1.1 Calibração dos condutivímetros	32

5.1.2	Calibração do termômetro eletrônico	38
6	MODELO MATEMÁTICO	39
6.1	A equação diferencial	39
6.2	A solução da equação diferencial	40
7	RESULTADOS	43
7.1	Resultados da primeira montagem	43
7.2	Resultados da segunda montagem	46
7.2.1	Resultado de um ensaio simulando uma fonte pulso	46
7.2.2	Resultado de um ensaio simulando uma fonte degrau	47
7.3	Resultados da terceira montagem	49
8	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	BIBLIOGRAFIA	57
	APÊNDICE I	59
	Curvas de calibração do termômetro eletrônico	59
	APÊNDICE II	61
	Metodologia para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal, da velocidade linear média, do ponto x_1 e do coeficiente C''	61
	APÊNDICE III	64
	Procedimento utilizado para determinação da velocidade linear média, do ponto x_1 de injeção e do coeficiente C'' , obtidos a partir dos pontos experimentais	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos funcionais de um instrumento	5
Figura 2 - Transporte advectivo e a influência da dispersão longitudinal e da difusão no transporte de um soluto em um escoamento unidimensional	9
Figura 3 - Linhas de escoamento em uma matriz porosa	11
Figura 4 - Linha de escoamento junto à parede de um tubo preenchido com uma matriz porosa	11
Figura 5 - Perfil de velocidade do escoamento quando há influência do efeito parede	11
Figura 6 - Primeira montagem	14
Figura 7 - Segunda montagem	15
Figura 8 - Esboço da peça 1 e da malha utilizada para a confecção da câmara de distribuição	17
Figura 9 - Extremidade do tubo	18
Figura 10 - Peça 1 e extremidade do tubo	19
Figura 11 - Montagem final	20
Figura 12 - Experimento realizado antes do tubo receber o revestimento de vaselina sólida	25
Figura 13 - Experimento realizado depois que o tubo recebeu o revestimento de vaselina sólida	25
Figura 14 - Introdução de solução salina no reservatório de saída, que continha água limpa, no 23 ^o ponto coletado (230s)	27
Figura 15 - Introdução de solução salina no reservatório de saída, que continha água limpa, no 23 ^o ponto coletado (230s)	27

Figura 16 - Condutivímetro que faz a medida na entrada do tubo desconectado dos eletrodos no 10° ponto coletado (100s)	28
Figura 17 - Ajuste por uma exponencial de decaimento da curva de concentração medida na entrada em função da concentração medida na saída	34
Figura 18 - Ajuste por uma exponencial da curva de concentração medida na saída em função da concentração medida na entrada	34
Figura 19 - Ajuste por uma exponencial da concentração em função das medidas de condutividade na entrada do tubo	36
Figura 20 - Ajuste por uma exponencial da concentração (%) em função das medidas de concentração (ND) realizadas na saída do tubo	36
Figura 21 - Gráfico de um experimento antes de passar pela calibração	37
Figura 22 - Gráfico do mesmo experimento depois da calibração	37
Figura 23 - Gráfico da condutância em função da concentração de saturação para amostras de areia não lavada	45
Figura 24 - Gráfico da condutância em função da concentração de saturação para amostras de areia lavada	45
Figura 25 - Evolução do perfil de tensão ao longo do tempo para os eletrodos situados na entrada e na saída do tubo	46
Figura 26 - Injeção de uma solução salina de concentração 15g/l	48
Figura 27 - Injeção de uma solução salina de concentração 20g/l	48
Figura 28 - Injeção de uma solução salina de concentração 20g/l	49
Figura 29 - Injeção de 1,02g de traçador a uma vazão de 3,59cm ³ /s	50
Figura 30 - Injeção de 1,02g de traçador a uma vazão de 3,59cm ³ /s	51
Figura 31 - Injeção de 2,04g de traçador a uma vazão de 3,48cm ³ /s	51
Figura 32 - Curva de calibração do sensor que lê a temperatura na entrada	60
Figura 33 - Curva de calibração do sensor que lê a temperatura na saída	60
Figura 34 - Exemplo de uma planilha para o cálculo de C", x ₁ , v _x e E _L	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas para calibração dos condutivímetros	33
Tabela 2 - Medidas de concentração na saída do tubo em função das medidas de concentração na entrada do tubo	35
Tabela 3 - Medidas de condutância para diversas concentrações de saturação em cápsulas contendo areia sem lavar	43
Tabela 4 - Medidas de condutância para diversas concentrações de saturação em cápsulas contendo areia lavada	44
Tabela 5 - Comparação entre os valores encontrados empiricamente e os encontrados no ajuste	52
Tabela 6 - Valores de E_L encontrados no ajuste	53

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área da secção transversal do tubo (cm^2)
a_L, α_L	- Dispersividade dinâmica (cm)
C	- Concentração do soluto (% ND)
C''	- Razão entre m'' e $\sqrt{4\pi}$ (g/cm^2)
C_E	- Concentração na entrada do tubo (% ND)
C_S	- Concentração na saída do tubo (% ND)
C_0	- Concentração inicial (%)
D	- Coeficiente de difusão (cm^2/s)
D_L	- Coeficiente de dispersão (cm^2/s)
$\frac{dh}{dl}$	- Gradiente hidráulico (cm/cm)
$\frac{\partial C}{\partial t}$	- Variação da concentração em relação ao tempo ($\text{g/cm}^3/\text{s}$)
$\frac{\partial C}{\partial x}$	- Gradiente de concentração na direção x ($\text{g/cm}^3/\text{cm}$)
Δx	- Comprimento do tubo (cm)
E_L	- Coeficiente de dispersão longitudinal (cm^2/s)
K	- Condutividade hidráulica (cm/s)
m''	- Razão entre massa total do soluto e a área da secção transversal (g/cm^2)
n_e	- Porosidade efetiva
Q	- Vazão (cm^3/s)
t	- Tempo (s)
T	- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
v_x	- Velocidade linear média (cm/s)

x - Ponto de injeção do soluto (cm)

x_1 - Ponto referente à entrada do tubo (cm)

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem havido uma crescente preocupação com os materiais não reutilizáveis, detritos industriais, lixo radioativo, lixo hospitalar e doméstico, materiais pesados, dentre outros, jogados na superfície do solo, sobretudo nas áreas urbanas, assim como o uso desenfreado de produtos químicos no solo procurando o aumento de produtividade agrícola a qualquer custo, colocando solo e água sob risco de contaminação.

Muitas são as fontes de poluição que podem atingir as águas subterrâneas. Entre elas, os aterros sanitários que por vezes não obedecem a critérios de construção, efluentes de indústrias que não recebem um tratamento adequado, derramamentos acidentais de combustíveis ou outro poluente qualquer em rios ou rodovias.

Levando em consideração o grande número de municípios (47,7% no estado de São Paulo em especial) que são totalmente abastecidos com água subterrânea e uma outra parte (23,9%) na qual o abastecimento é misto, entende-se que é de relevante importância a preservação da qualidade da água subterrânea. Sabe-se, no entanto, que a ação poluidora do homem pode colocar em risco a qualidade da água de alguns aquíferos.

Tendo em vista a extensão do prejuízo que uma contaminação pode acarretar, este trabalho presta-se a um estudo em torno da transferência de massa através de um

material poroso procurando desenvolver uma metodologia que permita obter informações rápidas sem a demanda de altos investimentos e mediante o uso de programas de computação de fácil acesso e manuseio para que se possa ter controle da situações de risco como por exemplo a ocorrência de um derramamento de um contaminante que possa vir a alcançar o lençol freático.

2 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia que auxilie na determinação de parâmetros que descrevam a velocidade de dispersão de um poluente que tenha se originado de fonte não permanente, e que esteja sendo transportado através de um meio poroso homogêneo.

A primeira parte do trabalho, consiste na verificação da possibilidade de uso de medidas condutivimétricas para descrever o fenômeno da dispersão de um poluente em meio poroso, permitindo o cálculo dos parâmetros envolvidos. A escolha do uso de medidas condutivimétricas sobrecai no fato de ser barato, de fácil aplicação e além disso, não alterar a estrutura da amostra.

Em seguida, foi desenvolvida uma metodologia alternativa para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal do traçador através do escoamento em meio poroso. O modelo matemático descritivo do fenômeno de dispersão de um traçador através do escoamento em meio poroso, que permite por meio de sua solução calcular o coeficiente de dispersão longitudinal, é apresentado bem como a comparação entre os dados obtidos experimentalmente e os obtidos através do modelo.

Esse trabalho é um passo inicial na direção de, futuramente, realizar um estudo bidimensional para a determinação de parâmetros que descrevam a velocidade de dispersão de um poluente através do escoamento em meio poroso.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados temas importantes para a fundamentação teórica do modelo matemático que descreve o fenômeno em estudo. São conceitos básicos para o estudo da transferência de massa. São abordados também assuntos que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Instrumentos

Todo trabalho que utilize algum tipo de medição deve, em primeiro plano, considerar os conceitos relacionados ao funcionamento do instrumento de medida.

A descrição de um instrumento pode ser feita a partir de sua operação e do seu grau de aproximação da medida real. A operação pode ser descrita em termos dos elementos funcionais do instrumento, enquanto que o grau de aproximação é definido em função das características estáticas e dinâmicas do instrumento (Doebelin, 1990).

Figura 1 - Elementos funcionais de um instrumento^a

O sensor primário é o elemento responsável por entrar em contato com o meio, recebendo alguma forma de energia tal como uma variação de posição, dimensão, entre outras e que seja representativa da grandeza que se quer medir. O conversor de variáveis converte este sinal para outro mais utilizado. A partir daqui o sinal convertido é enviado para o manipulador de variáveis que promove novas conversões, manipula, filtra, amplifica o sinal até obter uma grandeza que seja proporcional à observada. Assim, os sinais são transmitidos, armazenados e em seguida apresentados por meio do apresentador de dados que pode ser um mostrador analógico, digital ou até mesmo a tela de um microcomputador, chegando, assim, até o observador.

O instrumento sempre acaba extraindo alguma energia do meio, fato que não permite a obtenção de uma medida perfeita. Bons instrumentos são preparados para minimizar prováveis interferências na entrada dos sinais.

^a Doebelin, Ernest O., Measurement Systems: application and design 4th edition, 1990, p.11

3.2 Transporte de massa

Serão apresentadas aqui algumas equações diferenciais que descrevem processos de transporte de massa através de um escoamento unidimensional por um meio homogêneo.

3.2.1 Difusão

O processo pelo qual um soluto diluído em água se move de uma área de maior concentração para outra com concentração menor, ou ainda, o processo pelo qual a matéria é transportada por mobilidade molecular (**Harleman, 1989**), é conhecido como difusão.

Para que este processo ocorra, o fluido não precisa estar em movimento, pois, a difusão ocorrerá contanto que haja um gradiente de concentração, mesmo que o fluido não esteja em movimento (**Fetter, 1994**).

Fick propôs a taxa de transferência de massa por difusão a qual é conhecida como segunda lei de Fick. A difusão é freqüentemente chamada de gradiente de difusão, porque ela pode ser descrita por uma lei observacional na qual a razão da taxa de transferência de massa de uma substância por unidade de área é proporcional ao gradiente espacial de concentração da substância (**Harleman, 1989**). Na forma conhecida como segunda lei de Fick para sistemas unidimensionais, é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

onde,

D: coeficiente de difusão

$\frac{\partial C}{\partial t}$: variação da concentração com o tempo

Esta lei é análoga à lei de Newton para a viscosidade ou ainda à lei de Fourier para condução de calor.

3.2.2 Advecção

No transporte advectivo, também chamado de convectivo, ao contrário da difusão, a transferência de massa só ocorre se houver o movimento do fluido através do qual o soluto será transportado.

A equação para um transporte advectivo unidimensional é expressa por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.2)$$

onde, v_x é a velocidade linear média. Esta velocidade linear média é determinada pela lei de Darcy como:

$$v_x = -\frac{K}{n_e} \frac{dh}{dx} \quad (2.3)$$

onde,

K : condutividade hidráulica

n_e : porosidade efetiva

$\frac{dh}{dx}$: gradiente hidráulico

3.2.3 Dispersão

Supondo que através de um meio poroso, todas as partículas se deslocassem com a mesma velocidade, ao introduzir uma certa quantidade de poluente no escoamento, resultaria na criação de uma interface abrupta entre água e poluente, ou seja, não ocorreria uma mistura entre eles.

Como há uma variação na velocidade das partículas de fluido dentro do meio poroso, causada pela resistência oferecida pelas paredes, ocorre a advecção heterogênea, à qual se soma a difusão, caracterizando a dispersão longitudinal.

Os processos de difusão e dispersão não podem ser separados no escoamento de água em meio poroso (**Fetter, 1993**). Introduce-se, então, um termo chamado coeficiente de dispersão hidrodinâmica, E_L , que leva em consideração a difusão e a advecção heterogênea e que para um escoamento unidimensional é representado por

$$E_L = a_L v_x + D \quad (2.4)$$

onde,

E_L : coeficiente de dispersão longitudinal

a_L : dispersividade dinâmica

D : coeficiente de difusão

Se analisarmos a introdução de um traçador através de meio poroso, o processo de dispersão hidrodinâmica longitudinal, pode ser contemplado na figura abaixo.

Figura 2 - Transporte advectivo e a influência da dispersão longitudinal e da difusão no transporte de um soluto em um escoamento unidimensional.^a

Se assumirmos que a dispersão pode ser descrita pela lei de Fick para a difusão e que é uma função da velocidade linear média, então pode-se introduzir um coeficiente de dispersão que, na direção de x , é dado por:

$$D_L = \alpha_x v_x \quad (2.5)$$

^a Fetter, C.W., Applied Hydrogeology, 2th edition, New York: Macmilan Publishing Company, 1988.

onde α_x é a dispersividade dinâmica e v_x é a velocidade linear média.

Utilizando a lei de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha_x v_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

onde $E_L = \alpha_x v_x + D$ é o coeficiente de dispersão.

Então, está explícito aqui, a hipótese de que uma única grandeza pode descrever o efeito difusivo e o efeito dispersivo (**Gershon, 1969**).

3.3 Efeito parede

Em tubos preenchidos com material poroso ocorre uma maior ordenação das partículas junto a parede fazendo com que a porosidade se torne maior. Como a velocidade do escoamento é diretamente proporcional à porosidade, tem-se a presença do efeito parede que é responsável pela ocorrência de um escoamento preferencial próximo às paredes do tubo (**Zotin, 1985**). As figuras 3 e 4 mostram linhas de escoamento em uma matriz porosa e em uma matriz porosa compactada dentro de um tubo, respectivamente.

Figura 3 - Linhas de escoamento em uma matriz porosa.

Figura 4 - Linha de escoamento junto a parede de um tubo preenchido com uma matriz porosa.

Desta forma, se tomarmos uma seção transversal de um tubo preenchido com material poroso, o perfil de velocidade levando em consideração a presença do efeito parede será semelhante ao apresentado abaixo.

Figura 5 - Perfil de velocidade do escoamento quando há influência do efeito parede.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Toda a parte experimental do trabalho foi realizada no Laboratório de Fenômenos dos Transportes do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esta parte experimental pode ser dividida em três montagens igualmente importantes. A primeira montagem foi realizada para verificação da possibilidade do uso de medidas condutivimétricas para o estudo em questão e não havia escoamento de água pela matriz porosa.

A segunda montagem teve o objetivo de estudar a evolução do perfil de voltagem ao longo do tempo e o sistema estava sujeito a um escoamento permanente de água. Nestas duas primeiras fases do trabalho não houve preocupação com a unidimensionalidade dos experimentos e nem com possíveis interferências causadas por fatores internos e externos (efeito parede, temperatura, ruídos,...).

Com o sucesso dos resultados das fases anteriores, deu-se início à construção da montagem definitiva, já que a anterior era precária.

4.1 Configuração da montagem experimental

4.1.1 Primeira montagem

O objetivo dessa primeira montagem foi o de verificar se a variação da concentração das soluções salinas a serem utilizadas como traçadores implicaria na variação de medidas condutivimétricas. As medidas condutivimétricas citadas são relacionadas a condutividade elétrica.

Para realizar as medidas condutivimétricas durante toda a pesquisa, foi desenvolvido um condutivímetro especial a fim de atender às suas necessidades e que neste ponto do trabalho estava em fase de construção. Nesta fase, o aparelho foi acoplado a um multímetro para que a leitura dos dados fosse realizada. As coletas dos dados eram feitas manualmente e eram obtidas em medidas de voltagem.

Para acondicionar o material poroso foram utilizadas cápsulas cilíndricas, plásticas, de 3cm de diâmetro e 5cm de altura, com tampa. Cada cápsula foi preparada introduzindo-se através de suas paredes dois percevejos metálicos em posições diametralmente opostas para servirem de eletrodos, possibilitando assim, que a leitura das medidas condutivimétricas fosse realizada. Das 19 cápsulas, 11 foram preenchidas com areia grossa que não sofreu lavagem e nem foi peneirada e 8 com areia previamente lavada. Foram feitas algumas medidas com areia lavada para verificar se havia interferência das características do material poroso utilizado nas medidas de condutividade elétrica que seriam realizadas.

Figura 6 –Primeira montagem

4.1.2 Segunda montagem

O objetivo dessa segunda montagem foi observar a evolução do perfil de tensão ao longo do tempo, utilizando fontes pulso e degrau.

Para observar esta evolução, a leitura deveria ser feita em mais de um ponto para que os perfis pudessem ser comparados. O material poroso foi acondicionado em um tubo de PVC de 1/2" de diâmetro e 50cm de comprimento recebendo em suas paredes dois pares de eletrodos confeccionados com percevejos metálicos, cada par próximo a uma de suas extremidades e seus componentes colocados em posições diametralmente opostas. As faces dos eletrodos voltadas para o interior do corpo de prova, se encontravam em contato com a matriz porosa.

As extremidades do tubo foram fechadas com uma tela plástica e com um cap e devidamente vedadas com silicone. Para estabelecer um escoamento de água através da areia foram utilizados dois reservatórios, um para abastecer e outro para captar a água de saída do corpo de prova. Cada reservatório utilizado tinha capacidade aproximada de 1 litro e foi conectado a um registro que, por sua vez, foi conectado as extremidades do tubo por meio de mangueiras de silicone. Os

reservatórios foram colocados com um pequeno desnível entre si, possibilitando, assim, o escoamento de água.

Na fase da segunda montagem em que foi simulada a fonte pulso, o condutivímetro já estava acoplado a um microcomputador preparado com uma placa A/D (analógico digital) de aquisição e com um software responsável pela leitura contínua dos dados e sua armazenagem. O intervalo de tempo entre as coletas e o número de pontos a ser coletado eram informados antes de dar início ao ensaio. Para a coleta dos dados, o condutivímetro foi conectado ao par de eletrodos de interesse. Já para a simulação da fonte degrau, haviam dois condutivímetros disponíveis.

Figura 7 – Segunda montagem.

4.1.3 Terceira montagem

Verificada a possibilidade do uso de medidas condutivimétricas e obtidos os perfis de tensão satisfatórios, fez-se então a montagem definitiva para o experimento.

O material poroso foi acondicionado em um cilindro circular construído a partir de um tubo de PVC com diâmetro interno de uma polegada e comprimento de 107cm.

Nesta montagem foram utilizados três reservatórios, cada um com capacidade aproximada de oito litros. Cada reservatório recebeu, próximo à sua base inferior, um adaptador roscável com flange e anel de vedação que na entrada funcionavam como alimentador e na saída como receptor de água do tubo. Próximo à base superior de cada reservatório, utilizando o mesmo material, foi feito um extravasor para manter o nível de água constante. Cada reservatório foi conectado a um registro de esfera VS - roscável por meio de mangueiras plásticas de 1/2".

Para possibilitar que o abastecimento do tubo fosse feito tanto por um reservatório quanto por outro, os dois reservatórios da entrada foram ligados a um adaptador de mangueira em T e este, por sua vez, foi ligado ao tubo.

A parte mais importante dessa montagem foi a elaboração e construção das extremidades do tubo que foram confeccionadas de maneira idêntica. O material utilizado para a montagem foi pesquisado entre conexões disponíveis no mercado.

As extremidades do tubo teriam que ser fechadas, de modo a impedir a saída da areia mas ao mesmo tempo permitir o escoamento da água através do mesmo. Para isto foi montada uma peça composta por uma bucha de redução de 1¼" para ¾", uma bucha de redução de ¾" para ½" e um adaptador para mangueira e que será chamada de peça 1. Entre os dois redutores, foram feitos dois furos diametralmente opostos e em cada um foi introduzido um fio de aço inoxidável, que foi fixado com

borracha de silicone. A ponta que ficou na parte externa da peça 1, mais tarde foi conectada ao condutivímetro e a outra ficou faceando a parede interna da peça.

Para segurar a areia e ao mesmo tempo formar uma câmara de distribuição de volume mínimo, uma micro tela de poliéster de alta resistência e durabilidade foi colada em um O_ring e encaixada dentro da peça 1 com a parte do anel voltada para a peça 1 e a parte da micro tela voltada para o tubo. Esta câmara de distribuição tem a função de distribuir a solução rápida e uniformemente pela área da seção transversal do tubo.

Figura 8 - Esboço da peça 1 e da malha utilizada para a confecção da câmara de distribuição

Para manter fixa a peça 1 na extremidade do tubo durante os ensaios, foi utilizado um cap com rosca interna de 1/4" vazado em sua extremidade fechada com um diâmetro de aproximadamente 1,2" para que o tubo pudesse passar por dentro da peça. Ainda, foi colado um anel de PVC na parede externa do tubo próximo a sua extremidade e que funciona como um 'stop' para o cap. Deve-se deixar claro que os eletrodos, ao contrário da montagem anterior, não estão em contato com a matriz porosa. Eles estão dispostos de forma que suas faces internas se encontram nas câmaras de distribuição, ou seja, um recebe a informação num ponto à montante da matriz porosa e o outro à jusante da mesma.

Ficou ainda o problema da vedação que foi resolvido fazendo um sulco no tubo, bem próximo à extremidade, e foi encaixado neste sulco um O_ring.

Figura 9 - Extremidade do tubo

Para isolar cada um dos pares de eletrodos, foi confeccionada uma blindagem que consiste de dois pedaços de arame de aço inoxidável um deles atravessado no tubo e o outro atravessado no adaptador de mangueira, ambos próximos aos eletrodos e ambos foram aterrados.

A união do tubo e dos registros dos reservatórios foi feita por meio de mangueiras plásticas de ½".

Figura 10 - Peça 1 e Extremidade do tubo

Os reservatórios da entrada eram abastecidos por meio de torneiras cuja vazão podia ser controlada para que se mantivesse o nível de água constante, sem no entanto haver muita perda de água. O reservatório de saída descarregava o excesso de água pelo extravasor que foi ligado a uma saída de água. A água utilizada era captada diretamente da rede de abastecimento.

O nível de água de cada reservatório era monitorado por meio de dois piezômetros. A leitura dos níveis era feita manualmente em média três vezes por experimento.

Figura 11 - Montagem final

- (1) Reservatórios de entrada com carga hidráulica constante
- (2) Piezômetro (medida de nível)
- (3) Corpo de prova (tubo de PVC preenchido com areia)
- (4) Condutivímetros especialmente desenvolvidos para o experimento
- (5) Termômetro eletrônico (medida da temperatura da solução)
- (6) Reservatório de saída com carga hidráulica constante

4.2 Metodologia dos ensaios

4.2.1 Metodologia dos ensaios da primeira montagem

O primeiro passo foi a preparação de uma solução salina diluindo cloreto de sódio em água até que houvesse precipitação do cloreto de sódio. Esta solução será chamada de solução inicial. A partir desta solução inicial, com o auxílio de uma seringa plástica graduada, foram preparadas várias soluções com diferentes concentrações. Cada uma das cápsulas plásticas que estavam preenchidas com areia recebeu uma solução com concentração diferente. O procedimento para a saturação das cápsulas com solução salina consistia em introduzir uma quantidade de solução em seu interior, bater com o fundo da cápsula em uma superfície firme para que o ar contido nos poros da matriz se desprendesse e este fosse preenchido com solução. Esta operação era repetida até que os poros estivessem aparentemente preenchidos. A tabela 3 indica as concentrações das soluções para areia que não foi lavada e a tabela 4, as concentrações das soluções para areia lavada.

Foram feitas seis séries consecutivas de medidas que foram realizadas tendo início na cápsula contendo solução de menor concentração e finalizando com a cápsula que continha a solução de maior concentração. A coleta dos dados foi feita manualmente.

4.2.2 Metodologia dos ensaios da segunda montagem

A primeira etapa para a execução dos ensaios foi a preparação da solução inicial a ser utilizada como traçador. A solução foi preparada diluindo cloreto de sódio em água até que houvesse precipitação do cloreto de sódio. Para a utilização de fontes de grau foram feitas, a partir da solução inicial, outras soluções com concentrações menores.

A etapa seguinte foi estabelecer um escoamento de água através do tubo. Para isso, o reservatório de entrada foi preenchido com água, dando início ao escoamento. Procurando evitar presença de eventuais bolhas de ar que pudessem interferir no processo de medida, antes de começar os ensaios, permitiu-se a estabilização do escoamento. Durante um certo intervalo de tempo, o tubo foi mantido com a extremidade relativa à saída de água acima do nível da extremidade relativa à entrada. Os reservatórios de entrada e saída foram mantidos com nível constante.

A partir do ponto de estabilização do escoamento, o objetivo era provocar uma perturbação e verificar o resultado. Foram utilizados dois tipos de perturbação, uma em forma de fonte pulso e a outra em forma de fonte degrau.

A simulação da fonte pulso foi feita com o auxílio de uma seringa plástica, com a qual o traçador foi injetado na mangueira de silicone, num ponto à montante do corpo de prova. O mecanismo de injeção utilizado, juntamente com a câmara de distribuição localizada na entrada do tubo, garantiam que a solução penetrasse através do meio poroso numa camada uniforme e em toda a seção transversal do tubo. No momento em que a injeção era feita, o programa de coleta de dados era acionado.

As leituras contínuas dos dados, para o par de eletrodos da entrada, foram feitas com o auxílio do condutivímetro e apresentadas na tela do microcomputador por meio de um gráfico de tensão em função do tempo. Como havia apenas um condutivímetro disponível, o ensaio foi repetido adotando a mesma rotina descrita anteriormente para que fossem feitas as leituras dos dados para o par de eletrodos da saída.

Foi adotado um procedimento básico para a simulação de fonte degrau: depois de estabilizado o escoamento, os registros do reservatório de entrada e de saída foram fechados, a água do reservatório de entrada foi descartada e em seguida ele foi preenchido com uma das soluções previamente preparadas. Abertos os registros, foi acionado o programa para o qual já havia sido informado o intervalo de

tempo a ser utilizado entre as leituras, os dados foram sendo coletados e apresentados na tela do microcomputador através de um gráfico de tensão em função do tempo. Finalizou-se a coleta de dados a partir da estabilização do valor de tensão medido. Aqui, a coleta na entrada e na saída foram feitas simultaneamente, já que haviam dois condutivímetros à disposição.

4.2.3 Metodologia dos ensaios da terceira montagem

As etapas de preparação das soluções, estabilização do escoamento e a simulação da fonte pulso foram executadas da mesma forma que para a segunda montagem.

Apenas o procedimento adotado para a simulação de fonte degrau, que foi utilizada para a calibração dos condutivímetros, difere um pouco do apresentado anteriormente. Como haviam dois reservatórios disponíveis na entrada do tubo, um deles foi abastecido com água, enquanto o outro, foi abastecido com uma das soluções preparadas para a fonte degrau. O registro do reservatório que continha o traçador permaneceu fechado. O registro do reservatório que continha água foi aberto e começou o processo de estabilização do escoamento.

Depois de estabilizado o escoamento, o programa de coleta de dados foi acionado e, a partir do 5º ponto coletado, o registro da entrada de água foi fechado e o da entrada de solução foi aberto simultaneamente. Os dados foram sendo coletados e apresentados na tela do microcomputador através de um gráfico de concentração em níveis digitais (ND) em função do tempo. Finalizava-se a coleta de dados a partir da estabilização do valor de tensão medido.

Durante os ensaios, a vazão foi medida pelo método volumétrico com o auxílio de um recipiente de vidro graduado e um cronômetro. A temperatura do ambiente nos ensaios definitivos era constante e foi controlada com o auxílio de um

condicionador de ar. Este controle foi necessário para que não houvesse variações de temperatura durante os ensaios, já que esta se mostrou motivo de alterações nas medidas.

4.3 Desenvolvimento dos ensaios

Inicialmente alguns testes foram feitos para poder determinar a frequência com que a tomada de dados seria feita, verificar e reparar possíveis desajustes nos condutivímetros, observar se a montagem não apresentava vazamentos, etc..

Durante estes testes iniciais, pôde-se perceber que o tempo gasto pelo traçador para chegar ao final do corpo de prova era muito curto, às vezes questão de segundos. Este fato foi associado ao efeito parede, já discutido na revisão bibliográfica, que permite um escoamento preferencial junto às paredes do tubo devido à ordenação das partículas nesta região, resultando num aumento relativo da velocidade (Zotin, 1985) e podendo interferir na unidimensionalidade do experimento em questão.

Na tentativa de minimizar o efeito parede, a parede interna do tubo foi revestida com uma espessa camada de vaselina sólida com o intuito de acabar com o caminho preferencial existente. Alguns testes foram feitos para verificar a eficácia do procedimento. Antes do tubo ser revestido, o traçador levava segundos para atingir a saída e a vazão era de 1,13ml/s. Após o revestimento, repetindo-se o ensaio nas mesmas condições do anterior, o traçador passou a levar horas para atingir a saída e a vazão diminuiu para 0,16ml/s. Os gráficos apresentados nas figuras 12 e 13 mostram os resultados.

Figura 12 - Experimento realizado antes do tubo receber o revestimento de vaselina sólida.

Figura 13 - Experimento realizado depois que o tubo recebeu o revestimento de vaselina sólida.

Um outro ponto que chamou atenção está relacionado à evolução do perfil de concentração. Pôde-se perceber, por diversas vezes, que quando uma fonte pulso era simulada, havia a formação de dois picos na curva referente à medida feita na entrada do corpo de prova, outras vezes notava-se a formação de picos alargados. Após algumas tentativas de identificação do problema, percebeu-se que ao trocar o conteúdo do reservatório de saída por água limpa, o valor da condutividade medido na saída do tubo, diminuía consideravelmente.

A partir daí, foi feita uma observação do comportamento dos valores medidos pelos condutivímetros quando havia traçador misturado à água do reservatório da saída e quando havia somente água. Prosseguindo com as observações, constatou-se ainda que havia interferência dos pares de eletrodos entre si, o que contribuía para a distorção dos dados.

A idéia inicial para tentar solucionar o problema seria a colocação de duas malhas de aço inoxidável, uma a montante e outra a jusante do par de eletrodos responsável pela leitura da condutividade e que seriam aterradas. Para testar se isso bastaria, foi feita uma blindagem com dois fios de cobre, que foram introduzidos na saída do tubo e foram fixados entre a mangueira e o adaptador de mangueira. Estes fios foram ligados entre si e aterrados. Isto significa que só se pode observar a interferência ou não da concentração do reservatório de saída na leitura feita pelo condutivímetro acoplado à saída. Depois de alguns testes, ficou claro que a interferência tinha desaparecido. Pode-se observar isto nas figuras 14 e 15 apresentadas a seguir.

Experimento feito sem a blindagem:

Figura 14 - Introdução de solução salina no reservatório de saída, que continha água limpa, no 23° ponto coletado (230s).

Experimento feito com a blindagem:

Figura 15 - Introdução de solução salina no reservatório de saída, que continha água limpa, no 23° ponto coletado (230s).

O passo seguinte foi verificar se havia interferência entre os pares de eletrodos.

Para isso, o seguinte procedimento foi adotado: Os condutivímetros estavam fazendo as leituras na entrada e na saída. Depois de um certo tempo, o condutivímetro da entrada foi desconectado do par de eletrodos, o que fez com que a condutividade caísse na entrada e ao mesmo tempo, aumentasse na saída, mostrando assim a interferência existente entre os pares de eletrodos.

Figura 16 - Condutivímetro que faz a medida na entrada do tubo desconectado do eletrodos no 10° ponto coletado (100s).

O passo seguinte foi fazer a mesma blindagem para o outro lado do eletrodo e realizar outros testes semelhantes aos anteriores para verificar sua eficácia.

Como não daria para utilizar o mesmo fio de cobre, a solução foi atravessar dois fios de aço inoxidável no tubo, um antes e outro depois do par de eletrodos. Em seguida, outros testes foram feitos para verificar a eficácia dessa blindagem. Em vista do bom resultado, o mesmo procedimento foi adotado para o par de eletrodos localizados na entrada do tubo.

Dando continuidade aos testes preliminares, alguns ajustes foram sendo feitos no condutivímetro devido algumas oscilações que apareceram, mas ainda assim, os resultados não estavam satisfatórios. Foi questionado então, se a qualidade da areia que estava sendo utilizada não estaria interferindo nos resultados.

Com o intuito de melhorar a qualidade do material, optou-se por utilizar areia proveniente de uma mineradora, que além de ser totalmente livre de qualquer tipo de matéria orgânica, vem separada por faixas granulométricas (portanto, possibilitando o uso de uma amostra homogênea).

A intenção era trabalhar com três faixas granulométricas, uma maior, uma menor e uma intermediária. No decorrer dos testes, pôde-se perceber que quando estava sendo utilizada uma amostra de granulometria intermediária, ou fina, os ensaios levavam muito tempo para serem realizados. Assim, a solução foi trabalhar com uma amostra de maior granulometria, descartando as outras possibilidades.

Com todos os melhoramentos feitos até então, os resultados continuavam insatisfatórios. Um outro passo foi verificar se a temperatura ambiente não estava interferindo, já que alguns ensaios começavam de manhã e só terminavam à tarde, tomando o período de maior transição de temperatura.

Para isto, foi construído um termômetro eletrônico que seria utilizado para medir a temperatura da solução contida nos reservatórios, permitindo a avaliação da variação das medidas com a temperatura. Foi observado que para dias de temperatura mais elevada, a variação da condutividade era muito maior que para dias com temperatura mais amena. Então, a temperatura ambiente passou a ser controlada, utilizando um condicionador de ar para manter constante a temperatura da sala.

Já havia também a preocupação com a qualidade dos eletrodos que estavam sendo utilizados e que foram confeccionados com arame de aço inoxidável utilizado para soldagem, então, foi feita a troca destes eletrodos por outros confeccionados

com arame de aço inoxidável empregado em aparelhos ortodônticos, o que provocou uma melhora significativa nos sinais.

Uma outra tentativa para melhorar o sinal foi realizar alguns experimentos utilizando ácido acético como traçador, e o resultado foi uma maior nitidez do sinal.

Com as mudanças que foram feitas ao longo dos testes preliminares muitos problemas foram solucionados e a qualidade dos resultados melhorou significativamente, possibilitando uma boa visualização do fenômeno em estudo e direcionando o trabalho para o próximo passo que foi a calibração dos condutivímetros, a realização dos ensaios definitivos e mais tarde, o desenvolvimento da modelagem do problema.

5 INSTRUMENTAÇÃO

Para coleta dos dados foi utilizado um sistema de aquisição acoplado a um microcomputador automatizando as medidas de condutividade e temperatura. As medidas foram feitas em intervalos de tempo pré estabelecidos e os dados armazenados num arquivo.

A parte mais importante da instrumentação é a relativa à medida de condutividade cujo sistema foi desenvolvido pelo engenheiro Paulo Eduardo Silveira e é composto por dois condutivímetros que fazem a leitura da condutividade através de dois pares de eletrodos posicionados na entrada e na saída da montagem (do tubo).

Cada par de eletrodos produz um sinal analógico, que é a diferença de potencial elétrico entre eles e é proporcional à condutividade. Este sinal é enviado para uma placa A/D que converte o sinal analógico em um sinal digital. Há um programa instalado no microcomputador que é responsável por interpretar e converter o sinal para níveis digitais. Este programa foi desenvolvido em Visual Basic pela mesma pessoa responsável pela confecção dos condutivímetros e estava disponível no laboratório. Numa outra etapa, com o auxílio da planilha eletrônica Excel, os dados armazenados pelo software foram convertidos em medidas de condutividade dadas em porcentagem através de uma curva de calibração.

Dois dos canais da placa A/D faziam a leitura da condutividade e outros dois faziam a leitura da temperatura, já que foi utilizado um termômetro eletrônico para monitorar a temperatura da água dos reservatórios. Da mesma forma, cada um dos

sensores do termômetro eletrônico produz um sinal analógico da medida, que é uma diferença de potencial elétrico proporcional à temperatura. Este sinal é enviado a placa A/D que por sua vez o converte em um sinal digital. Este sinal é interpretado pelo software que fornece o valor da temperatura em níveis digitais. Então, por meio de uma curva de calibração e com o auxílio do Excel, este sinal é convertido em valores de temperatura.

5.1 Calibração

5.1.1 Calibração dos condutivímetros

As medidas feitas pelos condutivímetros na entrada e na saída do tubo, não estavam com a mesma ordem de grandeza devido a vários fatores como, por exemplo, a área de contato dos eletrodos para leitura dos dados, ganho na intensidade da medida de cada um dos condutivímetros. Um outro ponto considerado foi o fato dos dados obtidos serem apresentados em níveis digitais. Foi feita, então, a calibração desses condutivímetros a fim de converter níveis digitais em concentração dada em porcentagem.

Para a calibração o procedimento básico adotado foi a realização de vários ensaios simulando fonte degrau, em cada um deles a solução utilizada apresentava uma concentração diferente, possibilitando assim, corrigir a diferença na ordem de grandeza das medidas da entrada e da saída e obter uma relação entre a medida feita em níveis digitais e a concentração do traçador.

Utilizando uma balança digital, com precisão de 1mg, para a pesagem do ácido acético e uma balança analógica, com precisão de 1g, para a pesagem da água, uma solução padrão foi preparada com 400g de ácido acético e 19600g de água que foram misturados em um recipiente plástico, resultando em uma solução de

concentração 2%. Seguindo o mesmo procedimento, a partir desta solução padrão, foram produzidas outras soluções com concentrações de 0,2%; 0,4%; 0,6%; 0,8%; 1%; 1,2%; 1,4%; 1,6% e 1,8%.

Foram feitos dois ensaios seguidos para cada uma das concentrações descritas acima iniciando com a água limpa e terminando com a solução de concentração 2%. A água limpa foi utilizada como uma solução com concentração zero.

Para obter cada um dos valores da tabela 1, foi feita uma média dos 100 últimos pontos coletados para cada ensaio, sendo que as medidas 1 e 2 correspondem respectivamente à primeira e segunda coletas feitas para cada solução. Os valores utilizados para os gráficos e cálculos foram obtidos da média feita entre a medida 1 e a medida 2.

Tabela 1 – Medidas para calibração dos condutivímetros

Concentração (%)	Entrada			Saída		
	Medida 1 (ND)	Medida 2 (ND)	Média (ND)	Medida 1 (ND)	Medida 2 (ND)	Média (ND)
0	155,11	157,70	156,41	314,43	312,72	313,58
0,2	351,9	357,08	354,49	768,73	771,73	770,23
0,4	402,45	406,97	404,71	1004,16	998,27	1001,212
0,6	411,38	418,63	415,01	1060,94	1063,95	1062,44
0,8	434,87	437,63	436,25	1184,43	1177,19	1180,81
1	449,97	452,01	450,99	1299,46	1284,44	1291,95
1,2	459,24	459,49	459,36	1372,92	1368,93	1370,92
1,4	465,79	465,40	465,59	1461,24	1444,29	1452,76
1,6	471,37	468,51	469,94	1527,05	1522,09	1524,57
1,8	472,92	473,85	473,39	1592,19	1580,36	1586,28
2	475,71	476,32	476,02	1642,3	1629,21	1635,76

Para que os dois condutivímetros apresentassem as leituras com a mesma ordem de grandeza, foi necessário obter a leitura de um em função da leitura do outro. Para isto, foi feito um gráfico dos valores da saída em função dos valores da entrada e um gráfico dos valores da entrada em função dos valores da saída. Em seguida, cada uma das curvas foi aproximada por uma exponencial e foi escolhida a curva que melhor se ajustou através da análise dos gráficos de resíduos referentes a cada ajuste. Os ajustes foram feitos através do método dos mínimos quadrados. Os gráficos estão apresentados nas figuras 17 e 18 a seguir.

Figura 17 – Ajuste por uma exponencial de decaimento da curva de concentração medida na entrada em função da concentração medida na saída

Figura 18 – Ajuste por uma exponencial da curva de concentração medida na saída em função da concentração medida na entrada

Observando os gráficos das figuras 17 e 18, foi escolhida a aproximação por exponencial de decaimento no gráfico da entrada em função da saída e a equação é:

$$C_E = 511,83 - 355,43e^{-\frac{(C_S - 313,56)}{564,81}} \quad (5.1)$$

onde C_E e C_S são as concentrações na entrada e na saída, respectivamente.

Assim:

Tabela 2 – Medidas de concentração na saída do tubo em função das medidas de concentração na entrada do tubo

Concentração (%)	C_E (ND)	C_S (ND)
0	156,41	156,22
0,2	354,49	353,4
0,4	404,71	406,58
0,6	415,01	417,39
0,8	436,25	435,25
1	450,99	448,93
1,2	459,37	457,13
1,4	465,60	464,51
1,6	469,94	470,16
1,8	473,39	474,47
2	476,02	477,61

Em seguida, para obter um gráfico da concentração em função do tempo, foi construído um gráfico da concentração em porcentagem em função dos dados obtidos na entrada do experimento em níveis digitais e a curva foi aproximada por uma exponencial utilizando o método dos mínimos quadrados. Também foi construído um gráfico da concentração em função dos dados obtidos na saída do experimento em níveis digitais e a curva também foi aproximada por uma

exponencial utilizando o método dos mínimos quadrados. Em seguida, a escolha do melhor ajuste foi feita através da análise dos gráficos dos resíduos. Os gráficos estão apresentados nas figuras 19 e 20, abaixo:

Figura 19 – Ajuste por uma exponencial da concentração (%) em função das medidas de concentração (ND) na entrada do tubo

Figura 20 – Ajuste por uma exponencial da concentração (%) em função das medidas de concentração (ND) na saída do tubo

A equação utilizada foi:

$$C(\%) = 0,045 + 0,016 \times e^{[(C(ND) - 267,43)/44,29]} \quad (5.2)$$

Abaixo, o gráfico de um dos experimentos é apresentado:

Figura 21 – Gráfico de um experimento antes de passar pela calibração

Depois de aplicadas as duas equações obtidas acima:

Figura 22 – Gráfico do mesmo experimento depois da calibração

5.1.2 Calibração do termômetro eletrônico

O padrão utilizado para a calibração do termômetro eletrônico foi um termômetro de mercúrio com precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$. O termômetro eletrônico possuía dois sensores, que foram fixados ao termômetro de mercúrio e em seguida introduzidos num recipiente que receberia a água a ser tomada a temperatura. Com o auxílio de um ebulidor, uma certa quantidade de água foi sendo aquecida e em seguida misturada à água do recipiente contendo o termômetro. Decorrido um certo intervalo de tempo para que atingisse o estado de equilíbrio, foram feitas as leituras da temperatura obtida através do termômetro de mercúrio e da temperatura de cada sensor, exibida pelo software em níveis digitais. Após cada leitura, mais água aquecida era adicionada ao recipiente onde estavam o termômetro e os sensores, para alterar a temperatura e assim obter os pontos para a curva de calibração.

Em posse dos dados obtidos acima, foi feito um ajuste usando regressão linear para a obtenção da equação da curva de calibração para cada um dos sensores. Estas curvas e suas respectivas equações estão apresentadas no apêndice I.

6 MODELO MATEMÁTICO

6.1 A equação diferencial

O objetivo aqui é obter uma relação matemática da concentração de traçador em função do espaço e do tempo, que permita a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal do traçador através do meio poroso utilizado. Para chegarmos a uma equação diferencial que represente o movimento da água através do meio poroso, precisamos da equação de Darcy e da Equação da continuidade.

O volume de controle é o volume do tubo preenchido com areia. É limitado pelas paredes do tubo e pelas micro telas posicionadas em suas extremidades.

O traçador é transportado para o meio poroso através do escoamento da água. Neste processo os fenômenos de difusão e advecção provocada pelo escoamento forçado de água.

Para que se possa simplificar o processo de modelagem, alguns cuidados foram tomados. Para que se tivesse um meio homogêneo e isotrópico, foi utilizada uma amostra de areia com granulometria regular. Antes de dar início aos experimentos, o volume de controle foi saturado, ou seja, todos os poros foram preenchidos com água.

Como o objetivo do trabalho é fazer um estudo unidimensional do processo, a preocupação fundamental foi com a presença do efeito parede que colocaria em risco esta unidimensionalidade. O mecanismo utilizado para a eliminação do efeito parede e os resultados favoráveis foram apresentados anteriormente.

Os traçadores escolhidos foram NaCl e Ácido Acético. São materiais conservativos e portanto não sofrem decaimento biológico e nem radioativo.

Tomadas as precauções acima, o meio utilizado era homogêneo, isotrópico e saturado com água. O regime de escoamento era permanente, a vazão constante e a velocidade média constante.

Levando em consideração o fato de que o transporte subsuperficial ocorre por difusão, advecção e dispersão e aplicando a equação de conservação da massa para o volume de controle, temos que a equação diferencial que representa a variação da concentração ao longo do tempo pode ser expressa por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6.1)$$

6.2 A solução da equação diferencial

A solução de uma equação diferencial pode ser obtida através de métodos numéricos ou então, analiticamente. Para obter uma solução analítica da equação diferencial acima, é preciso ter conhecimento das condições iniciais e de contorno envolvidas no problema e que devem refletir a geometria do campo e também o modo de injeção do traçador e o caminho de mistura desta concentração (Klotz, 1980). A influência das condições de contorno no cálculo da distribuição de um

soluto foi investigada por Gershon and Nir (1969), Van Genuchten (1980), entre outros.

Para um escoamento unidimensional em um meio poroso homogêneo, isotrópico e saturado, com a injeção de massa em forma de pulso efetuada no sentido do escoamento e no ponto central da seção transversal do tubo, as condições iniciais e de contorno para a solução da equação são:

$$C(x,0) = C_0, \quad \forall x \quad (6.2)$$

$$C(0,t) = \begin{cases} C_0 & \text{para } 0 < t < t_0 \\ 0 & \text{para } t > t_0 \end{cases} \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) = 0, \quad \forall t \quad (6.4)$$

A solução analítica da equação (6.1) admitindo as condições acima é:

$$C(x,t) = \frac{m''}{\sqrt{4\pi E_L t}} \exp \left\{ - \left[\frac{((x - x_1) - v_x t)^2}{4E_L t} \right] \right\} \quad (6.5)$$

onde $m'' = \frac{M}{A}$ é razão entre a massa total do traçador e a área da seção transversal e x_1 é o ponto de injeção do traçador.

A determinação de E_L é feita através dos dados experimentais com auxílio do comando solver da planilha Excel utilizando o método dos mínimos quadrados para obter o melhor ajuste.

7 RESULTADOS

7.1 Resultados da primeira montagem

As leituras feitas estão apresentadas nas tabelas 3 e 4, a seguir.

Tabela 3- Medidas de condutância para diversas concentrações de saturação em cápsulas contendo areia não lavada.

Concentração da Solução (%)	Condutância (S)					
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6
100	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
75	0,037	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
50	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
40	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
25	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
10	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
5	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
2,5	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0	0	0	0	0	0	0

Tabela 4 - Medidas de condutância para diversas concentrações de saturação em cápsulas contendo areia lavada.

Concentração da Solução (%)	Condutância (S)					
	Medida 1	Medida 2	Medida3	Medida4	Medida5	Medida6
37,5	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
25	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
10	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
5	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Pode-se perceber que, para valores coincidentes de concentração de saturação, as medidas feitas em tubos contendo areia lavada são sempre inferiores às medidas realizadas em tubos contendo areia não lavada.

A partir dos dados da tabela 3, foi construído o gráfico da condutância em função das concentrações de saturação para verificar o comportamento entre elas e que é apresentado na figura 23.

Figura 23 - Gráfico da condutância em função da concentração de saturação para amostras de areia sem lavar.

O mesmo foi feito com os dados da tabela 4 e os resultados estão apresentados na figura 24.

Figura 24 - Gráfico da condutância em função da concentração de saturação para amostras de areia lavada.

Pode-se perceber que a relação existente não é linear já que a condutância aumenta com a concentração de saturação, mas, a partir do ponto onde a mistura se torna saturada há uma tendência da condutância se tornar constante.

Com base nestes resultados, deu-se início à próxima etapa do trabalho que consiste no estudo da evolução do perfil de concentração de um poluente quando há um escoamento permanente de água através da matriz porosa.

7.2 Resultados da segunda montagem

7.2.1 Resultado de um ensaio simulando uma fonte pulso

A partir dos dados obtidos em um experimento onde a perturbação provocada foi em forma de fonte pulso, foi construído um gráfico da tensão em função do tempo e a figura 25 representa a evolução do perfil de tensão para este teste.

Figura 25 - Evolução do perfil de tensão ao longo do tempo para os eletrodos situados na entrada e na saída do tubo.

Pode-se observar pela figura 25 que a tensão máxima atingida no eletrodo de entrada é menor que a tensão máxima atingida no eletrodo de saída. Isto ocorre porque o par de eletrodos da saída está bem mais sensível que o da entrada. Na construção do tubo, os pares foram deixados o mais parecido possível, mas até mesmo pelo tipo de material utilizado isto se tornou inviável.

7.2.2 Resultado de um ensaio utilizando fonte degrau

A figura abaixo representa a evolução do perfil de tensão ao longo do tempo utilizando uma perturbação em forma de fonte degrau.

Os gráficos apresentados nas figuras 26 e 27 mostram as curvas obtidas ao longo do experimento para concentrações iguais a 1,5% e 2,0%, respectivamente. Quando a solução começa a entrar no tubo, este ainda contém água e então ocorre uma mistura entre elas. A partir do momento que esta mistura cessa, ou seja, quando o que passa pelo tubo é apenas a solução contida no reservatório, a tensão atinge um patamar. O que pode ser observado nos gráficos é que este patamar para a tensão de entrada é distinto do patamar para a tensão de saída, isto ocorre devido a diferença de sensibilidade existente entre os eletrodos.

Figura 26 - Injeção de uma solução salina de concentração 1,5%

Figura 27 - Injeção de uma solução salina de concentração 2,0%

Figura 28 - Injeção de uma solução salina de concentração 2,0%

Normalizando as curvas, na figura 28 pode-se observar ainda que há uma defasagem no ponto de inflexão das duas curvas, fato que ocorre devido ao tempo que o traçador leva para chegar do par de eletrodos da entrada para o da saída.

7.3 Resultados da terceira montagem

São apresentados neste capítulo o modelo ajustado aos dados experimentais obtidos na simulação de uma fonte pulso usando ácido acético como traçador.

$$\text{O ajuste da curva } C(x, t) = \frac{C''}{\sqrt{E_L t}} \exp \left\{ - \left[\frac{((x - x_1) - v_x t)^2}{4E_L t} \right] \right\} \quad (6.6)$$

onde $C'' = \frac{m''}{A\sqrt{4\pi}}$, foi realizado variando os valores de C'' , E_L , v_x e x_1 , e o procedimento está detalhado no apêndice II.

Nas figuras 30 e 31 são apresentados os resultados de 3 experimentos em gráficos. O gráfico principal contém quatro curvas, duas construídas com os pontos experimentais coletados na entrada e na saída do tubo, em função do tempo e são representados por símbolos individuais e as outras duas são resultado do modelo e apresentadas por linha cheia e linha pontilhada. Os gráficos são apresentados em concentração relativa (C_R) em função do tempo. Os gráficos menores mostram os valores dos resíduos para cada um dos ajustes, também em função do tempo.

Figura 29 - Injeção de 1ml de traçador a uma vazão de 3,59ml/s.

Figura 30 - Injeção de 1ml de traçador a uma vazão de 3,59 ml/s.

Figura 31 - Injeção de 2ml de traçador a uma vazão de 3,48 ml/s.

Para ter uma estimativa dos valores reais da velocidade média, do termo C'' e de x_1 foram feitos alguns cálculos utilizando os dados experimentais disponíveis. Os procedimentos utilizados para o cálculo dos valores acima estão descritos no apêndice III. Já o cálculo de E_L será estimado somente a partir da calibração do modelo. O ajuste foi feito utilizando uma fonte imagem instantânea, por isso a necessidade de encontrar a posição x_1 da entrada do tubo. Os valores encontrados por meio dos pontos experimentais e os encontrados no ajuste do modelo estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Comparação dos valores encontrados empiricamente e os encontrados no ajuste

Figura	v_x (cm/s)		C'' (g/cm ²)		x_1 (cm)	
	Exp.	Mod.	Exp.	Mod.	Exp.	Mod.
29	2,95	3,11	0,23	0,62	27,32	25,64
30	2,43	2,63	0,19	0,88	31,45	31,42
31	2,45	2,63	0,41	0,84	31,40	31,36

Tabela 6 - Valores de E_L encontrados no ajuste

Figura	E_L (cm ² /s)
29	5,02
30	1,84
31	2,65

Nos gráficos de 29 a 31, pode-se observar que o modelo se aproxima mais dos pontos experimentais na curva de saída. Segundo Fischer (1967), a dispersão das partículas de um traçador originado de uma fonte pontual pode ser dividido em dois períodos: um advectivo, durante o qual o movimento do traçador depende de sua velocidade inicial de advecção e outro difusivo, ou período de Taylor, durante o qual a frente de traçador pode ser descrita por uma equação de difusão unidimensional na direção do fluxo. Como o modelo utilizado representa um fluxo dispersivo, se ajusta melhor após a mistura do traçador com a água do escoamento se torne homogênea através da área transversal do tubo.

Deve-se levar em consideração ainda, o fato de que as leituras dos dados na entrada e na saída do tubo são feitas, respectivamente, antes e depois da passagem pela matriz porosa. Quando o traçador chega nos eletrodos da saída, leva as informações referentes ao escoamento através do meio poroso. Já na entrada, o traçador vem do escoamento pela mangueira de ligação entre o reservatório e a entrada do tubo, que tem um diâmetro menor que o do tubo, não sofrendo interferência do meio poroso. Esta é uma consideração importante a ser feita no momento de verificar o ajuste do modelo.

8 CONCLUSÃO

Foi verificada a viabilidade do uso de medidas condutivimétricas para a representação do fenômeno de dispersão de um soluto no escoamento de água em meio poroso.

A partir destas medidas, foi possível determinar teoricamente os parâmetros que auxiliam na determinação da velocidade de dispersão do soluto. Estes valores foram considerados confiáveis quando comparados com os valores determinados empiricamente.

A conclusão final é a viabilidade do emprego da metodologia desenvolvida em trabalhos futuros, salvas as limitações, visto que este trabalho foi uma investigação inicial para a determinação de parâmetros que determinem a velocidade de dispersão de um soluto no escoamento permanente de água em um meio poroso homogêneo. Mesmo não estando aqui representados, foram realizados experimentos com diversas faixas granulométricas de areia e verificou-se que o comportamento se repete sempre, refletindo na possibilidade de emprego desta metodologia para meios porosos homogêneos com granulometrias variadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DOEBELIN, E. O. - Measurement Systems: Application and Design. 4th edition, McGraw-Hill, 1990.

FETTER, C. W. - Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, 1993.

FETTER, C. W. - Applied Hydrogeology. 3th edition, Prentice-Hall. Inc., New Jersey, 1994.

FISCHER, H. B. - The Mecanics of Dispersion in Natural Streams. Journal of the Hydraulics Division pp. 187 - 216, 1967.

GERSHON, N. D.; NIR A. - Effects of Boundary Conditions of Models on Tracer Distribution in Flow through Porous Mediums. Water Resources Research Vol. 5 No. 4 pp. 830 - 839, 1969.

HARLEMAN, D. R. F. - Transport Processes In Water Quality Control. Massachussets, Institute of Technology. Department of Civil Engineering, 1989.

KLOTZ, D.; SEILER, H. MOSER; NEUMAIER, F. - Dispersivity and Velocity Relationship from Laboratory and Field Experiments. Journal of Hydrology, 45: pp. 169 - 184, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. Th. - Analytical Solutions for Chemical Transport with Simultaneous Adsorption, Zero-Order Production and First-Order Decay. Journal of Hydrogeology, 49: pp. 213 - 233, 1981.

ZOTIN, F. M. Z - O Efeito de Parede em Colunas de Recheio. São Carlos, 85p. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 1985.

BIBLIOGRAFIA

BANTON, O.; POREL, G.; DELAY, F. Coupling of the time Domain Random Walk Method With the Finite Fragment Method to Simulate Flow and Transport in 1-D Heterogeneous Media. Journal of Hydrology, 201: pp. 49 - 61, 1997.

BEAR, J. Some Experiments in Dispersion. Journal of Geophysical Research Vol. 66 No. 8 pp. 2455 - 2465, 1961.

BEAR, J.; VERRUIJT, A. Modeling Goundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland 1987.

BERAN, M. J. Dispersion of Soluble Matter in Flow throug Granular Media. The Journal of Chemical Physics Vol. 27 No. 1 pp. 270 - 274, 1957.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J.C. Conduction of Heat in Solids Second edition, Oxford University Press 1959.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Grownwater. Prentice-Hall 1979.

INCROPERA, P. F.; WITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 3ª edição LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 1990.

KREYSZIG, E. Advanced Engineering Mathematics. 7th edition, John Wiley & Songs, Inc. New York, 1993.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo. 1ª edição, Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, Piracicaba, 1995.

LUCKNER, L.; SCHESTAKOW, W. M. Migration Processes in the Soil and Groundwater Zone. Lewis Publishers, Inc. 1991.

SAUTY, Jean-Pierre An Analysis of Hydrodispersive Transfer in Aquifers. Water Resources Research Vol. 16, No.1, pp. 145 - 158, 1980.

SAWER, C.; McCARTY, P.L.; PARKIN, G. F. Chemistry for Enviromental Engineering. McGraw-Hill, 4ª edição.

SMEDT, F.DE; WIERENGA, P. J. A Generalized Solution for Solute Flow in Soils With Mobile and Immobile Water. Water Resources Research, Vol. 15, No. 5, pp. 1137 - 1141, 1979.

APÊNDICE I

Curvas de Calibração do Termômetro Eletrônico

Figura 32 – Curva de calibração do sensor que lê a temperatura na entrada.

Figura 33 - Curva de calibração do sensor que lê a temperatura na saída.

APÊNDICE II

Metodologia para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal, da velocidade linear média, do ponto x_1 de injeção e do coeficiente C'' .

Tendo em mãos os dados experimentais e o modelo empregado, a metodologia consiste em uma sucessão de regressões feitas para o modelo, por tentativa e erro, procurando os valores de v_x , x_1 , E_L e C'' que minimizem a soma dos quadrados dos resíduos da entrada e da saída do experimento. Esta análise foi executada com o auxílio de um comando da planilha Excel utilizado para otimização. Este comando que facilita a análise de regressão é o solver.

Observando a planilha da figura 34, as colunas A, B e C trazem os valores de tempo e os dados coletados de concentração de entrada e concentração de saída, respectivamente. As colunas D e E, são formadas pela equação 6.6 aplicada para os valores correspondentes de x na entrada e na saída do tubo. Para o cálculo da concentração em função do tempo os valores de C'' , x_1 , v_x e E_L e são procurados nas células livres I2, I3, I4 e I5, respectivamente. As colunas F e G são responsáveis pelo cálculo dos resíduos ao quadrado.

No menu Ferramentas, existe a opção Solver que acionada apresenta uma caixa de diálogo onde pode-se entrar com as opções de otimização. A opção é minimizar o valor da célula G304 que corresponde à somatória dos mínimos quadrados tendo como variáveis I2, I3, I4 e I5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Tempo	Dados experimentais (Entrada)	Dados experimentais (Saída)	Modelo Eq. (6.6) (Entrada)	Modelo Eq. (6.6) (Saída)	Resíduos ao quadrado (Entrada)	Resíduos ao quadrado (Saída)		
2	t_1	C_{E1}	C_{S1}	$C(x, t_1)$	$C(x+\Delta x, t_1)$	$(B2-D2)^2$	$(C2-E2)^2$	$C''=$	C''
3	t_2	C_{E2}	C_{S2}	$C(x, t_2)$	$C(x+\Delta x, t_2)$	$(B3-D3)^2$	$(C3-E3)^2$	$x_1=$	x_1
4	t_3	C_{E3}	C_{S3}	$C(x, t_3)$	$C(x+\Delta x, t_3)$	$(B4-D4)^2$	$(C4-E4)^2$	$v_x=$	v_x
5	t_4	C_{E4}	C_{S4}	$C(x, t_4)$	$C(x+\Delta x, t_4)$	$(B5-D5)^2$	$(C5-E5)^2$	$E_L=$	E_L
6	t_5	C_{E5}	C_{S5}	$C(x, t_5)$	$C(x+\Delta x, t_5)$	$(B6-D6)^2$	$(C6-E6)^2$		
7	t_6	C_{E6}	C_{S6}	$C(x, t_6)$	$C(x+\Delta x, t_6)$	$(B7-D7)^2$	$(C7-E7)^2$		
8	t_7	C_{E7c}	C_{S7}	$C(x, t_7)$	$C(x+\Delta x, t_7)$	$(B8-D8)^2$	$(C8-E8)^2$		
9	t_8	C_{E8}	C_{S8}	$C(x, t_8)$	$C(x+\Delta x, t_8)$	$(B9-D9)^2$	$(C9-E9)^2$		
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
301	t_{149}	C_{E149}	C_{S149}	$C(x, t_{149})$	$C(x+\Delta x, t_{149})$	$(B149-D149)^2$	$(C149-E149)^2$		
302	t_{150}	C_{E150}	C_{S150}	$C(x, t_{150})$	$C(x+\Delta x, t_{150})$	$(B150-D150)^2$	$(C150-E150)^2$		
303						$\Sigma(F1:F302)$	$\Sigma(G1:G302)$		
304							$\Sigma(F303:G303)$		

Figura 34 - Exemplo de uma planilha para o cálculo de C'' , x_1 , v_x e E_L

APÊNDICE III

Procedimento utilizado para determinação da velocidade linear média, do ponto x_1 de injeção e do coeficiente C'' , obtidos a partir dos pontos experimentais

A primeira informação necessária e que foi anotada para cada um dos experimentos é a massa M de traçador injetada no sistema.

A vazão Q foi medida para cada ensaio com o auxílio de um recipiente graduado e um cronômetro.

Para o cálculo da velocidade linear média de cada experimento, foram encontrados os centros de massa das curvas. O centro de massa corresponde ao primeiro momento e é obtido pela fórmula:

$$\mu_t = \left[\frac{\sum_i \frac{(C_i + C_{i+1})}{2} \frac{(t_i + t_{i+1})}{2}}{\sum_i \frac{(C_i + C_{i+1})}{2}} \right] (t_{i+1} - t_i)$$

Os valores encontrados para a entrada e para a saída serão denotados por t_E e t_S , respectivamente.

Então:

$$v_x = \frac{\Delta x}{(t_S - t_E)}$$

fornece o valor da velocidade linear média.

A constante C'' é dada por:

$$C'' = \frac{M}{A\sqrt{4\pi}}$$