



**Liliana Andrea Villegas Sierra**

**Avaliação dos Parâmetros de Transporte de um Biocolóide  
através de uma Areia Saturada**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos  
Co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Denise Maria Mano Pessôa



**Liliana Andrea Villegas Sierra**

## **Avaliação dos Parâmetros de Transporte de um Biocolóide através de uma Areia Saturada**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**

Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Denise Maria Mano Pessôa**

Co-orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Eurípedes de Amaral Vargas Jr.**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Maria Claudia Barbosa**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. José Tavares Araruna Júnior**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Liliana Andrea Villegas Sierra**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Mayor de San Andrés, Bolívia em 2006. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil em 2008 na área de Geotecnia. Principais áreas de interesse e linhas de pesquisa: Geotecnia Ambiental, Geotecnia Experimental, Engenharia Sanitária e Hidráulica.

### Ficha Catalográfica

Sierra, Liliana Andrea Villegas

Avaliação dos parâmetros de transporte de um biocolóide através de uma areia saturada / Liliana Andrea Villegas Sierra ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos ; co-orientador: Denise Maria Mano Pessôa. – 2010.

126 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Transporte de contaminantes. 3. Escherichia coli. 4. Areia de quartzo. 5. Filtração mecânica. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Pessôa, Denise Maria Mano. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Para meus pais,  
Félix e Lupe

## Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro e à PUC-Rio pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao professor Tácio Mauro Pereira de Campos, pela orientação e confiança, para a realização deste trabalho.

À professora Denise Mano Pessôa, obrigada pela ajuda constante, a paciência, e dedicação que me brindou ao longo de todo este período.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pelo ensino transmitido.

A minha família que com amor incondicional, sempre me apóia e incentiva em cada etapa da minha vida.

A todos os meus amigos pela amizade sincera, que com alegria, entusiasmo e companheirismo me ajudaram a superar todos os obstáculos e fizeram do mestrado uma das melhores etapas da minha vida.

Em especial ao Gerardo, pela compreensão e carinho, principalmente naqueles momentos em que todo parecia dar errado, obrigada por me ajudar a tornar este trabalho possível.

## Resumo

Sierra, Liliana Andrea Villegas; Campos, Tácio Mauro Pereira de; Pessoa, Denise Maria Mano. **Avaliação dos Parâmetros de Transporte de um Biocolóide através de uma Areia Saturada**. Rio de Janeiro, 2010. 126p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho são avaliados os parâmetros de transporte da bactéria *Escherichia coli* ATCC11229, microrganismo indicador de contaminação fecal, através de colunas de areia de quartzo saturadas. Com este propósito foi desenvolvido o equipamento para a execução dos ensaios Advecção-Dispersão-Sorção (ADS), com injeção contínua de uma suspensão bacteriana em água destilada em uma concentração inicial de  $10^8$  bactérias/mL, por até doze horas em temperatura ambiente e sob condições que permitiram desprezar os efeitos do crescimento e decaimento dos microrganismos. Para a determinação dos parâmetros de transporte foram executados ensaios microbiológicos, ensaios de batelada e oito ensaios ADS para diferentes valores de gradiente hidráulico. Os ensaios de batelada mostraram uma baixa adsorção bactéria-solo nas condições avaliadas. As curvas de chegada obtidas nos ensaios ADS, mostraram elevados valores para o fator de retardamento entre três e nove, variando proporcionalmente com o incremento de gradiente hidráulico. Os valores de dispersão hidrodinâmica variaram entre  $1,44 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/min e  $5,47 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/min. Os resultados dos ensaios sugerem que os processos físico-químicos têm pouca influência no transporte deste microrganismo em areia de quartzo, enquanto que o processo de filtração mecânica, forças hidrodinâmicas, a forma e distribuição de tamanho dos grãos parecem explicar mais adequadamente o comportamento das curvas de chegada.

## Palavras-chave

Transporte de contaminantes; *Escherichia coli*; Areia de quartzo; Filtração mecânica.

## Abstract

Sierra, Liliana Andrea Villegas; Campos, Tácio Mauro Pereira de (Advisor); Pessoa, Denise Maria Mano (Advisor). **Evaluation of the Transport Parameters of a Biocolloid through a Saturated Sand**. Rio de Janeiro, 2010. 126p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study deals with the assessment of the transport parameters of the *Escherichia coli* ATCC11229 bacteria, a fecal contamination indicator, through saturated quartz sand columns. With this purpose, it was developed an equipment to carrying out Advection-Dispersion-Sorption (ADS) experiments, with continuous input of bacterial distilled water suspension at an influent concentration of  $10^8$  cell/mL for about twelve hours, at environmental temperature and under conditions that allow disregard the effect of the growth and decay of the microorganisms. Microbiological experiments, batch tests, and eight ADS experiments at several hydraulic gradient values, were executed for determine the transport parameters. The batch tests indicated a low bacterium-soil adsorption under evaluated conditions. The breakthrough curves, obtained by ADS experiments, showed high values for the retardation factor, ranged from three to nine with increasing the hydraulic gradient. The hydrodynamic dispersion values ranged between  $1,44 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$  and  $5,47 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$ . The results of the experiments suggested that the physical-chemical processes have a little influence on the transport of this microorganism in quartz sand, whereas the straining process, hydrodynamic forces, the shape and grain distribution, would can explain more appropriately the behavior of the breakthrough curves.

## Keywords

Transport of contaminants; *Escherichia coli*; Quartz sand; Straining.

# Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo	16
1.2. Estrutura da Dissertação	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Generalidades	18
2.2. Áreas de proteção	21
2.3. Sobrevivência de bactérias e vírus na água subterrânea	22
2.4. <i>Escherichia coli</i>	24
2.5. Transporte de Biocolóides	27
2.6. Processos de Transporte	29
2.6.1. Advecção	29
2.6.2. Dispersão Hidrodinâmica	30
2.6.3. Adsorção	32
2.6.3.1. Sorção de equilíbrio	34
2.6.3.2. Sorção Dinâmica	35
2.6.4. Filtração mecânica ( <i>straining</i> )	43
2.6.5. Exclusão	46
2.6.6. Bloqueamento e <i>Ripening</i>	47
2.7. Ensaaios experimentais	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1. Considerações Gerais	50
3.2. Meio poroso	50
3.2.1. Caracterização geotécnica do meio poroso	51
3.3. Bactéria	55
3.3.1. Manutenção da cepa de <i>Escherichia Coli</i>	55
3.3.2. Determinação do número de bactérias	56
3.3.2.1. Contagem celular em Câmara de Neubauer	56
3.3.2.2. Leitura da densidade óptica por espectrofotometria	57
3.3.2.3. Contagem de microrganismos pela Técnica dos Tubos Múltiplos	58
3.3.2.4. Contagem de Número de Unidades Formadoras de Colônias em	



Placas de Petri	59
3.4. O equipamento para o ensaio ADS	60
3.4.1. Características do frasco de Mariotte	62
3.4.2. Características da coluna	63
3.5. Ensaio Microbiológicos	65
3.5.1. Correlação entre Número de Células e Absorbância	65
3.5.2. Curva de crescimento	67
3.5.3. Ensaio de Sobrevivência	68
3.6. Ensaio de Adsorção em Batelada	69
3.7. Ensaio Advecção-Dispersão-Sorção (ADS)	70
3.7.1. Saturação da areia	72
3.7.2. Injeção contínua da suspensão de <i>E. coli</i>	73
3.7.3. Obtenção das curvas de chegada	76
3.8. Ensaio de controle	77
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	79
4.1. Ensaio Microbiológicos	79
4.1.1. Curvas de correlação entre absorbância e número de células	79
4.1.2. Curva de Crescimento <i>Escherichia coli</i> em meio TSB	81
4.1.3. Avaliação da sobrevivência de <i>E. coli</i> em água	82
4.2. Ensaio de Adsorção em Batelada	83
4.3. Ensaio ADS	85
4.3.1. Curvas de chegada	86
4.3.2. Fator de Retardamento e Dispersão Hidrodinâmica	89
4.3.3. Ensaio de controle	94
4.4. Discussão	95
4.4.1. Retardamento	95
4.4.2. Filtração Mecânica como processo dominante no transporte de <i>E. coli</i> nos ensaios ADS	97
4.4.3. Influência das propriedades do meio poroso	100
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	103
5.1. Conclusões	103
5.2. Sugestões	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

APÊNDICE A	112
A.1. Determinação do número de células durante o ensaio de adsorção em batelada	112
A.2. Cálculo do coeficiente de distribuição $K_D$	115
APÊNDICE B	117
B.1. Dados para a construção da curva de chegada	117
B.2. Determinação gráfica dos parâmetros “b” e “R”	122

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Fontes de contaminação biológica das águas subterrâneas (Adaptado de Corapcioglu e Haridas, 1984)	18
Figura 2.2. Micrografia eletrônica da <i>E. coli</i> . Escala: o corpo da célula é de aproximadamente 1 $\mu\text{m}$ de comprimento (Berg, 2004)	25
Figura 2.3. Mecanismos básicos de transporte em filtração de água (Adaptado de Yao <i>et al.</i> , 1971)	37
Figura 2.4. Teoria de energia DVLO. As forças combinadas de atração e repulsão governam a agregação de partículas com relação à distância entre elas (Gwyn, 2003)	42
Figura 2.5. Formas em que a filtração limita a migração das partículas, a) Filtração completa, b) Filtração incompleta ou <i>straining</i> , e c) Filtração físico química (McDowell-Boyer <i>et al.</i> , 1986)	43
Figura 2.6. a) Cinética inicial de deposição, b) Efeito do bloqueamento e c) Efeito do <i>ripening</i> (Kretzschmar <i>et al.</i> , 1999)	48
Figura 3.1. Areia de quartzo. Lupa ZEISS Stereo Discovery V8 x10 de aumento	51
Figura 3.2. Distribuição de tamanhos dos grãos de quartzo	52
Figura 3.3. Aparato para a determinação da condutividade hidráulica saturada	53
Figura 3.4. a) Câmara de Neubauer utilizada, b) Esquema da CNB com a lâminula sobre a área de contagem	56
Figura 3.5. Área de Contagem da CNB e esquema da metodologia de contagem.	57
Figura 3.6. Esquema da Técnica de Contagem em Placa	60
Figura 3.7. Esquema de funcionamento do equipamento para os ensaios ADS a) $\Delta h=0$ , b) $\Delta h>0$	61
Figura 3.8. Corte transversal e detalhe da tampa do Mariotte	62
Figura 3.9. Corte transversal e detalhe da base do Mariotte	63
Figura 3.10. Esquema dos componentes da coluna	63
Figura 3.11. Corte transversal da coluna	64
Figura 3.12. Esquema da metodologia seguida para a obtenção das curvas de correlação entre absorbância e a) Suspensão bacteriana em meio TSB; b) Suspensão bacteriana em água destilada	67
Figura 3.13. Crescimento das colônias de <i>E. coli</i> no ensaio de adsorção	

para diferentes concentrações iniciais	70
Figura 3.14. Foto do equipamento utilizado no ensaio ADS	71
Figura 3.15. Vista superior e lateral da coluna após do processo de conformação da coluna de areia	73
Figura 3.16. Crescimento do inóculo de <i>E. coli</i> em 500 mL de meio de cultura TSB	74
Figura 3.17. Linha continua - Forma da curva de chegada sem retardamento nem decaimento; Linha tracejada - a) Forma da curva de chegada com retardamento b) Forma da curva de chegada com decaimento	76
Figura 4.1. Curvas de correlação entre Número de Células e Absorbância (a) para meio TSB; (b) para água destilada	79
Figura 4.2. Curva de Correlação para células suspensas em meio de cultura TSB	80
Figura 4.3. Curva de Correlação para células suspensas em água destilada	80
Figura 4.4. Curvas de crescimento da <i>Escherichia coli</i> ATCC 11229	82
Figura 4.5. Isoterma de adsorção da <i>E. coli</i> em areia de quartzo	84
Figura 4.6. Curvas de chegada para cada ensaio ADS	88
Figura 4.7. Curvas de chegada para diferentes gradientes hidráulicos	90
Figura 4.8. Variação do fator de Retardamento com relação ao gradiente hidráulico	91
Figura 4.9. Variação da Dispersão Hidrodinâmica com relação à velocidade de poros	91
Figura 4.10. Variabilidade da condutividade hidráulica no ensaio ADS	93
Figura 4.11. Distribuição do tamanho dos grãos ao longo da coluna de areia	95
Figura 4.12. Tipos de locais dentro do meio poroso, susceptíveis à retenção de bactérias devido ao processo de Filtração mecânica	99
Figura 4.13. Fotos ampliadas 600 vezes, da deposição de <i>E.coli</i> O157: H7 em areia de 150 µm (Bradford <i>et al.</i> , 2006)	100
Figura 4.14. Imagens ESEM ( <i>Environmental Scanning Electron Microscope</i> ) de a) leito de esferas de vidro (ampliadas 200 vezes, b) quartzo com forma irregular (ampliada 500 vezes) (Tufenkji <i>et al.</i> , 2004)	102

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Doenças causadas pelo consumo de água contaminada por excretos humanos ou animais (Bactérias, Protozoários e Vírus) ( <i>Cajazeiras, 2007</i> )	20
Tabela 2.2. Fatores físico-químicos que afetam a sobrevivência de bactérias entéricas e vírus no solo ( <i>Abu-Ashour et al., 1993</i> )	23
Tabela 2.3. Componentes utilizados em experimentos realizados para o estudo do transporte de microrganismos	49
Tabela 3.1. Determinação da condutividade hidráulica saturada	54
Tabela 3.2. Características físicas da areia de quartzo limpa	54
Tabela 4.1. Cálculo da concentração de células viáveis suspensas em água destilada pela Técnica dos Tubos Múltiplos	83
Tabela 4.2. Resultados obtidos através da técnica de contagem em placa	83
Tabela 4.3. Condições hidráulicas durante a saturação da areia	85
Tabela 4.4. Condições hidráulicas do sistema experimental durante a injeção da suspensão de <i>E. coli</i>	86
Tabela 4.5. Parâmetros de transporte: Retardamento e Dispersão hidrodinâmica	90
Tabela 4.6. Concentração de <i>E. coli</i> retida ao longo da coluna de areia (Ensaio ADS 1)	94
Tabela 4.7. Número de volume de poros necessários para preencher com bactérias os espaços de poro destinados à filtração mecânica	98