Lizardo Glorioso Romero Velasquez

**Análise numérica de transporte incluindo
biodegradação de misturas de benzeno-etanol
dissolvidos na água subterrânea**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil da PUC-Rio

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior
Co-orientadora: Dr^a. Patrícia Österreicher-Cunha

Rio de Janeiro
Abril de 2015

Lizardo Glorioso Romero Velasquez

**Análise numérica de transporte incluindo
biodegradação de misturas de benzeno-etanol
dissolvidos na água subterrânea**

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

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dr^a. Patrícia Österreicher-Cunha

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Juliana Gardenalli de Freitas

Universidade Federal de São Paulo

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de Abril de 2015.

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

Lizardo Glorioso Romero Velásquez

Graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM (Lima - Perú) em 2008. Principais áreas de interesse: Geotecnia ambiental e modelagem de contaminantes na água subterrânea.

Ficha Catalográfica

Romero Velasquez, Lizardo Glorioso.

Análise numérica de transporte incluindo biodegradação de misturas de benzeno-etanol dissolvidos na água subterrânea / Lizardo Glorioso Romero Velasquez; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior; Co-orientadora: Patricia Österreicher-Cunha – 2015.

110 f. il. (color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Contaminação. 3. Biodegradação 4. Modelo cinético de Monod 5. Modelagem numérica 6. Coluna I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Aos meus pais, e meus irmãos, porque mesmo de longe me incentivaram para atingir este momento e tiveram que suprir minha falta.

Ao professor Eurípedes Vargas Jr, pela orientação e conhecimentos transmitidos.

A Dra. Patrícia Österreicher-Cunha pela orientação, paciência e aportes, além disso, á revisão de este trabalho.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio que andaram e compartilharam comigo todo este tempo.

A Julia Camargo pela sua grande ajuda e acompanhamento ao longo deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Romero Velasquez, Lizardo Glorioso; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral; Österreicher-Cunha, Patrícia. **Análise numérica de transporte incluindo biodegradação de misturas de benzeno-etanol dissolvidos na água subterrânea.** Rio de Janeiro, 2015. 110p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, apresenta-se um estudo dos processos de transporte e biodegradação do benzeno e da mistura benzeno/etanol em um solo contaminado, através de simulações em diferentes modelos. Nas simulações foi utilizado o programa de elementos finitos *FEFLOW 6.1*, para análise de fluxo e transporte de contaminantes. No estudo incorporou-se satisfatoriamente o modelo de reação cinético de Monod multiplicativo, para problemas de transporte de contaminantes, no módulo de reação definido pelo usuário (*FEMATHED*) do programa *FEFLOW 6.1*. Este modelo foi utilizado nas diversas simulações realizadas. Para encontrar os valores de parâmetros de Monod e da população bacteriana, simulou-se o comportamento de um bloco de solo *in situ* contaminado com benzeno usando dados experimentais publicado na dissertação de mestrado de Martins (2010). Como aplicação dos procedimentos estudados, foram simuladas duas colunas em PVC com amostras indeformadas de um solo residual (lisímetros), onde foi fornecida uma solução contaminante na direção vertical, contrário à gravidade, com a finalidade de avaliar ao longo da coluna, a biodegradação dos compostos de benzeno e a influência do etanol nesse processo. Além disso, avaliou-se o atraso da degradação do benzeno por causa da presença do etanol na zona saturada e pelo aumento de biomassa nos domínios simulados. O trabalho também mostra uma descrição do programa utilizado e sua formulação. Finalmente, apresenta-se, comentam-se os resultados e concluem-se a pesquisa.

Palavras – chave

Contaminação; biodegradação; modelo cinético de Monod; modelagem numérica; colunas.

Abstract

Romero Velásquez, Lizardo Glorioso; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (Advisor); Österreicher-Cunha, Patrícia (Co-Advisor). **Numerical analysis of transport including biodegradation of benzene-ethanol mixtures dissolved in groundwater**. Rio de Janeiro, 2015. 110p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work was studied the transport and biodegradation processes of benzene and of the benzene/ethanol mixture in a contaminated soil using different simulation models. In the simulations, were used the finite element program called FEFLOW 6.1 for flow analysis and transport of contaminants. The study successfully incorporated the kinetic reaction model of multiplicative Monod, for contaminant transport problems, in a reaction module defined by the user (FEMATHEd - FEFLOW 6.1). This model was applied in the simulations. To find the values of Monod parameters and bacterial population the behavior of an *in situ* benzene contaminated soil-block was simulated using experimental data published by Martins (2010). As an application of the studied procedures, two PVC columns filled with undisturbed residual soil were simulated (lysimeters). The lysimeters were vertically provided with a contaminant solution in the vertical direction opposite to gravity, in order to evaluate along the column, the biodegradation of benzene compounds and the influence of the ethanol in the process. In addition, was evaluated the delay of benzene degradation due to the presence of ethanol in the saturated zone and the increasing in biomass in the region of simulated model. This study also shows a description of the program used and its formulation. Finally, the results of the analyses and the incorporation of the model performed are presented, conclude and commented.

Keywords

Contamination; biodegradation; Monod kinetic model; numerical modeling; columns.

Sumário

1 Introdução	17
1.1. Aspectos gerais	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivo geral	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Organização do trabalho	18
2 Revisão Bibliográfica	20
2.1. A problemática do derramamento de contaminantes	20
2.2. Preferência de biodegradação	21
2.3. Toxicologia e legislação do benzeno	22
2.4. Mecanismos responsáveis do comportamento de multicomponentes	23
2.4.1. Mecanismos de transporte	23
2.4.2. Mecanismos de atenuação	24
2.4.2.1. Sorção	25
2.4.2.2. Biodegradação	26
2.5. Fatores de influência no processo de biodegradação do BTEX	29
2.6. A influência do etanol na biodegradação dos BTEX	30
2.7. Cossolvência e volatilização	32
2.8. Efeito do etanol no crescimento microbiano	32
2.9. Modelos de quantificação do processo de biodegradação	32
2.9.1. Modelo cinético de decaimento de primeira ordem	33
2.9.2. Modelo cinético de Michaelis-Menten.	33
2.9.3. Modelo cinético de Monod (1942)	33
2.9.3.1. Modelo de Monod simples	34
2.9.3.2. Modelo de Monod multiplicativo	36
2.10. Equações de fluxo e transporte	37
3 Simulação de Problemas em Águas Subterrâneas.	39
3.1. Modelagem numérica	39
3.2. Programas para análise de fluxo	40
3.2.1. Modelo de fluxo com elementos finitos	40
3.3. Programas para análise de transporte	40
3.3.1. Programa para análise de transporte FEFLOW 6.1.	41
3.3.2. Taxas de reações químicas incorporadas no FEFLOW 6.1.	42
3.3.2.1. Módulo de reação de Monod	43

3.3.2.2. Módulo de reações definidas pelo usuário: editor FEMATHED	43
3.3.2.3. Limitações do modelo incorporado (Monod multiplicativo)	48
3.4. Decaimento linear e tipo Monod.	49
3.5. Critério de convergência ou discretização do modelo	50
3.5.1. Critério do número de Péclet	50
3.5.2. Critério do numero de Courant	50
3.6. Condições iniciais e de contorno	51
3.7. Modelagem de cenários	51
3.7.1. Cenário 1: Verificação e validação do modelo incorporado.	52
3.7.2. Cenário 2: Calibração de parâmetros	52
3.7.3. Cenário 3: Exemplos de aplicação em coluna de solo (Lisímetro)	54
4 Resultados e Comparações	55
4.1. Malha de elementos finitos	55
4.2. Dados de entrada	55
4.3. Modelagem de cenários desenvolvidos	56
4.3.1. Cenário 1: Verificação e validação do modelo incorporado	56
4.3.1.1. Condições geométricas do modelo	56
4.3.1.2. Condições do fluxo no modelo	57
4.3.1.3. Condição de transporte no modelo	58
4.3.1.4. Resultados das simulações numéricas	60
4.3.2. Cenário 2: Retroanálise de parâmetros	73
4.3.2.1. Condições geométricas do modelo	73
4.3.2.2. Condições de fluxo no modelo	74
4.3.2.3. Condições de transporte no modelo	76
4.3.2.4. Resultados das simulações numéricas	77
4.3.3. Cenário 3: Exemplos de aplicação na coluna de solo	81
4.3.3.1. Condições geométricas do modelo	81
4.3.3.2. Condições de fluxo do modelo	82
4.3.3.3. Condições de transporte do modelo	83
4.3.3.4. Resultados das simulações numéricas	85
4.4. Discussões dos modelos simulados	101
5 Conclusões e Sugestões	102
5.1. Conclusões	102
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	104
Referências bibliográficas	105

Lista de figuras

Figura 2.1 - Avanço da pluma de contaminação no solo contaminado (Hidroplan, 2012)	21
Figura 2.2 - Tipos de mecanismos de transporte de contaminantes	23
Figura 2.3 - Tipos de mecanismos de atenuação dos contaminantes	24
Figura 2.4 - Diferença entre os fenômenos de adsorção e absorção	25
Figura 2.5 - Degradação do substrato orgânico pelos microrganismos (EPA, 1996)	27
Figura 2.6 - Exemplo de derramamento de contaminante no solo (Cordazzo, 2010)	29
Figura 2.7 - Risco de contaminação com o BTEX acentua-se devido à presença do etanol, pois a sua degradação é retardada.	31
Figura 2.8 - Representação gráfica da equação de Monod	35
Figura 3.1 - Variação da velocidade de reação com a concentração (Diersch, 2002)	43
Figura 3.2 - Processos considerados por FEFLOW e FEMATHED para a simulação de destino e transporte do benzeno-etanol (Adaptado de Gomez, 2007)	45
Figura 3.3 - Vista do bloco in situ sem as formas (Martins, 2010)	53
Figura 3.4 - Corte longitudinal mostrando a disposição do bloco de degradação e concentração bacteriana (Martins, 2010)	53
Figura 3.5 - Colunas de solo saturado, submetidas a fluxo vertical (Martins, 2014)	54
Figura 4.1 - Elemento finito utilizado, quadrangular de 4 nós (Apud Diersch, 2002)	55
Figura 4.2 - Dimensão do domínio, com 7500 elementos e 7676 nós	56
Figura 4.3 - Dimensões do elemento quadrangular	57
Figura 4.4 - Condições do contorno e a direção de fluxo no modelo	58
Figura 4.5 - Condições do transporte no modelo	58
Figura 4.6 - Avanço da pluma do benzeno em estado estacionário em 9,60 anos, e os efeitos de 10 mg/L de benzeno (linha de base)	60
Figura 4.7 - Avanço da pluma do benzeno em estado estacionário em 20 anos, mostram-se os efeitos de 10 mg/L de benzeno (linha	

de base) (Gomez, 2007)	61
Figura 4.8 - Comparação das curvas do alongamento da pluma de benzeno, proveniente de uma fonte constante, obtido por Gomez (2007) e nesta pesquisa	61
Figura 4.9 - Concentração do benzeno, em 3500 dias de simulação	62
Figura 4.10 - Concentração do oxigênio durante a biodegradação do benzeno	62
Figura 4.11 - Concentração do oxigênio na degradação do benzeno, nos 3500 dias	63
Figura 4.12 - Concentração de bactérias aeróbias na degradação do benzeno, nos primeiros 40 dias de simulação	63
Figura 4.13 - Isolinhas de avanço da concentração das bactérias anaeróbias, na biodegradação do benzeno	64
Figura 4.14 - Concentração das bactérias anaeróbias durante a degradação de benzeno	64
Figura 4.15 - Pluma do benzeno na mistura de benzeno/etanol	65
Figura 4.16 - Comparação do alongamento da pluma de benzeno, na mistura de benzeno/etanol, desde a fonte constante, obtido por Gomez (2007) e nesta pesquisa	66
Figura 4.17 - Concentração de benzeno na mistura de benzeno/etanol, nos 500 dias	66
Figura 4.18 - Pluma do avanço da concentração do etanol na mistura de benzeno/etanol	67
Figura 4.19 - concentração do etanol na mistura de benzeno/etanol, primeiros 500 dias	67
Figura 4.20 - Consumo do oxigênio na mistura de benzeno/etanol no domínio	68
Figura 4.21 - Consumo de oxigênio contaminado com mistura de benzeno/etanol	68
Figura 4.22 - Crescimento na concentração das bactérias anaeróbias na mistura de benzeno/etanol. (a) Degradoras de etanol. (b) degradadoras de etanol e benzeno	69
Figura 4.23 - Comportamento da concentração das bactérias aeróbias na mistura de benzeno/etanol. (a) degradadoras de	

etanol e benzeno. (b) degradadoras de etanol	70
Figura 4.24 - Avanço da pluma do benzeno sem bactérias degradadoras benzeno	71
Figura 4.25 - Avanço da pluma do etanol sem bactérias degradadoras de benzeno	72
Figura 4.26 - Comparação do comprimento da pluma de benzeno, com e sem bactérias degradadoras do benzeno, na mistura de benzeno/etanol	72
Figura 4.27 - Corte longitudinal mostrando a disposição do bloco <i>in situ</i> e o ponto avaliado de degradação bacteriana (Martins, 2010)	73
Figura 4.28 - Dimensões do elemento quadrangular	73
Figura 4.28 - Dimensão do bloco, com 4712 elementos e 4851 nós	74
Figura 4.30 - Condição de fluxo na área do domínio	75
Figura 4.31 - Área do domínio, condição de transporte na simulação	76
Figura 4.32 - Posição da linha freática nas diferentes seções de instalação dos tubos de monitoramento (Martins, 2010)	78
Figura 4.33 - Posição da linha freática e isolinhas de cargas hidráulicas	78
Figura 4.34 - Concentração do benzeno no perfil de solo <i>in situ</i> , ensaio de Martins (2010)	79
Figura 4.35 - Isolinhas de concentração do benzeno ate os 13,3 dias de simulação	79
Figura 4.36 - Curva de concentração do benzeno, em 13,30 dias	79
Figura 4.37 - Avanço da concentração do benzeno, em 37,7 dias, de simulação	80
Figura 4.40 - Curva de concentração do benzeno, simulação de 38 dias	80
Figura 4.41 - Dimensão da coluna, com 3125 elementos e 3276 nós	81
Figura 4.42- Dimensões da célula	81
Figura 4.43 - Condição de direção do fluxo 1D do modelo	82
Figura 4.44 - Condição de transporte 1D do modelo	83
Figura 4.45 - Degradação do benzeno na coluna de solo, mudando a população bacteriana no tempo: a) 0 a 14 dias; b) 14 a 16 dias; c) 16 a 42 dias; e d) 42 a 55 dias	86

Figura 4.46 - Concentração do benzeno simulado na coluna de solo	87
Figura 4.47 - Teores de concentração de oxigênio na coluna de solo	87
Figura 4.48 - Concentração das bactérias anaeróbias no tempo	88
Figura 4.49 - Curva da concentração das bactérias aeróbias	88
Figura 4.50 - Isolinhas de concentração de etanol e benzeno no aumento da população de bactérias. a) etanol, b) benzeno	90
Figura 4.51 - Curva de concentração dos substratos e concentração bacteriana na mistura benzeno/etanol; a) etanol; b) benzeno; c) oxigênio; aeróbias degradadoras de: d) etanol; e) etanol/benzeno; anaeróbias degradadoras de: f) etanol; g) etanol/benzeno	92
Figura 4.52 - Isolinhas de avanço da concentração de etanol e benzeno na mesma coluna de solo, com bactérias degradadoras de etanol; a) etanol; b) benzeno	93
Figura 4.53 - Concentração dos substratos com bactérias degradadoras de etanol na mistura de benzeno/etanol; concentração de: (a) etanol, (b) benzeno, (c) oxigênio; (d) aeróbias degradadoras de etanol, (e) anaeróbias degradadoras de etanol	95
Figura 4.54 - Avanço da concentração a) etanol; b) benzeno; com bactérias degradadoras de benzeno e etanol na coluna de solo	96
Figura 4.55 - Concentração dos substratos e das bactérias degradadoras de etanol e benzeno na mistura de benzeno/etanol: a) etanol; b) benzeno; c) oxigênio; d) aeróbias degradadoras de etanol e benzeno; e) anaeróbias degradadoras de etanol e benzeno	97
Figura 4.56 - Isolinhas de concentração do etanol nas colunas misturadas com bactérias degradadoras de: (a) etanol e etanol/benzeno, (b) etanol, (c) etanol/benzeno	99
Figura 4.57 - Concentração do etanol na coluna de solo, caso: a, b, c.	99
Figura 4.58 - Isolinhas de concentração do benzeno nas colunas misturadas com bactérias degradadoras: (a) etanol e de etanol e benzeno, (b) etanol, (c) etanol e benzeno	100
Figura 4.59 - Concentração do benzeno na coluna, caso: a, b, c.	101

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades físico-químicas do benzeno	22
Tabela 2.2 - Vantagens e limitações da biorremediação de solos	27
Tabela 3.1 - Cenários de simulação de uma fonte de concentração constantes	52
Tabela 4.1 - Parâmetros geométricos do domínio (Gomez, 2007)	57
Tabela 4.2 - Parâmetros hidrogeológicos e de dispersividade do modelo (Gomez, 2007)	57
Tabela 4.3 - Coeficiente de partição e fator de retardamento do modelo (Gomez, 2007)	59
Tabela 4.4 - Parâmetros de biodegradação cinética do modelo (Gomez, 2007)	59
Tabela 4.5 - Comprimento máximo da linha central ao alongamento da pluma, na simulação de concentração constante na zona de origem, na pesquisa e Gomez (2007)	71
Tabela 4.6 - Parâmetros de simulação do domínio (Apud de Gomez, 2007)	74
Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros de ajuste da curva de retenção de água pelo modelo de <i>Van Genuchten</i> (1980) (Martins, 2010)	74
Tabela 4.8 - Parâmetros hidrogeológicos do modelo (Adaptado de Martins, 2010)	75
Tabela 4.9 - Parâmetros de adsorção (<i>Apud</i> Gomez, 2007)	76
Tabela 4.10 - Parâmetros de biodegradação cinética utilizados na simulação do bloco	77
Tabela 4.11 - Condições geométricas do domínio da coluna do solo	82
Tabela 4.12 - Parâmetros hidrogeológicos do modelo	83
Tabela 4.13 - Parâmetros de adsorção do modelo	83

Tabela 4.14 - Parâmetros do modelo de biodegradação cinética (Apud Gomez, 2007)	84
Tabela 4.15 - Aumenta de populações aeróbias e anaeróbias degradadoras do benzeno-	85
Tabela 4.16 - Concentração do benzeno na coluna e no bloco do solo, variando o tempo	85
Tabela 4.17 - Mudanças das populações de bactérias aeróbias e anaeróbias degradadoras de etanol e benzeno, no tempo	89
Tabela 4.18 - Concentração na base e no topo de etanol e benzeno da coluna	89
Tabela 4.19 - Concentração inicial e máxima dos substratos e bacteriana no topo da coluna do solo, antes e depois do aumento bacteriano na simulação	92
Tabela 4.20 - Aumento das populações aeróbias e anaeróbias degradadoras do etanol	93
Tabela 4.21 - Concentração na base e topo de etanol e benzeno no final da simulação	94
Tabela 4.23 - Aumento de populações bacterianas degradadoras do etanol e benzeno	95
Tabela 4.24 - Concentração na base e no topo de etanol e benzeno da coluna de solo.	96
Tabela 4.25 - Concentração inicial e final dos substratos e das populações bacterianas no topo da coluna do solo, antes e depois do aumento bacteriano	98
Tabela 4.26 - Concentração na base e no topo da coluna, e a degradação do etanol	98
Tabela 4.27 - Concentração na base e no topo da coluna, e a degradação do benzeno	100

Lista de Símbolos

- n = Porosidade efetiva [-].
- v_i = Velocidade média linear na direção i , [$L T^{-1}$].
- D_L = Coeficiente de dispersão hidrodinâmica longitudinal [$L^2 T^{-1}$].
- D_T = Coeficiente de dispersão hidrodinâmica transversal [$L^2 T^{-1}$].
- α_L = Dispersividade longitudinal [L].
- α_T = Dispersividade transversal [L].
- D_d = Coeficiente de difusão, [$L^2 T^{-1}$].
- K_d = Coeficiente de partição [$L^3 M^{-1}$].
- S = Concentração da solução [-].
- ρ = Peso específico [$M L^{-3}$].
- R_L = Fator de retardamento linear [-].
- v_c = Velocidade do contaminante [$L T^{-1}$].
- λ = Constante de decaimento de primeira ordem [T^{-1}].
- C = Concentração do contaminante [$M L^{-3}$].
- u_{max} = Taxa de reação máxima de Michaelis-Menten, [$M L^{-3} T^{-1}$]
- K_s = Concentração de meia saturação [$M L^{-3}$].
- X_I = Concentrações biomassa bacteriana [$M L^{-3}$].
- C_I = Concentração do doador de elétrons [$M L^{-3}$].
- C_2 = Concentração acceptor de elétrons [$M L^{-3}$].
- r_s = Taxa de degradação do doador de elétrons [$M L^{-3} T^{-1}$].
- r_x = é a taxa de crescimento da biomassa [$M L^{-3} T^{-1}$]
- b_I = Coeficiente de decaimento de biomassa [T^{-1}].
- Y = Coeficiente de produção de biomassa [-]
- h = Carga hidráulica [L].
- K_{ij} = Condutividade hidráulica em direção i, j , [$L T^{-1}$].
- S_s = Armazenamento específico em meios porosos [$M L^{-2} T^{-2}$]
- α = Compressibilidade do meio poroso [-]
- β = Compressibilidade do fluido [-].
- C_k = Concentração dissolvida da espécie k [$M L^{-3}$].
- D_{ij} = é o coeficiente de dispersão hidrodinâmico em direção i, j , [$L^2 T^{-1}$].
- q_s = Taxa volumétrica de fluido do aquífero na fonte/sumidouro,
- C_{Sk} = Concentração do fluido da fonte/sumidouro [$M L^{-3}$].
- r_c = Taxa de todas as reações que ocorrem na fase aquosa [$M L^{-3} T^{-1}$].
- $\tilde{C}_{im}$ = Concentração da fase sólida [$M L^{-3}$].
- $\tilde{r}_c$ = Taxa de todas as reações que ocorrem na fase sólida [$M L^{-3} T^{-1}$].
- P_e = Número de Péclet [-].

C_o = Número de Courant [-].

B = Concentração do benzeno [ML^{-3}].

E = Concentração do etanol [ML^{-3}].

O = Concentração do oxigênio [ML^{-3}].

r_B = Taxa de biodegradação aeróbica do benzeno [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$].

r_E = Taxa de biodegradação aeróbica do etanol [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$].

$u_{B,Aer}$ = Taxa de crescimento específico de biomassa aeróbia do benzeno [T^{-1}].

$u_{E,Aer}$ = Taxa de crescimento específico de biomassa aeróbia do etanol [T^{-1}].

$u_{B,An}$ = Taxa de crescimento específico de biomassa anaeróbia do benzeno [T^{-1}].

$u_{E,An}$ = Taxa de crescimento específico de biomassa anaeróbia do etanol [T^{-1}].

$Y_{B,Aer}$ = Coeficiente de rendimento de biomassa aeróbia para o benzeno (massa da biomassa/massa do benzeno) [-].

$Y_{B,An}$ = Coeficiente de rendimento de biomassa anaeróbia para o benzeno (massa da biomassa/massa do benzeno) [-].

$Y_{E,Aer}$ = Coeficiente de rendimento de biomassa aeróbia para o etanol (massa da biomassa/massa do etanol) [-].

$Y_{E,An}$ = Coeficiente de rendimento de biomassa anaeróbia para o etanol (massa da biomassa/massa do etanol) [-].

$K_{B,Aer}$ = Coeficiente de saturação meia do benzeno no metabolismo aeróbio [ML^{-3}].

$K_{B,An}$ = Coeficiente de saturação meia do benzeno no metabolismo anaeróbio [ML^{-3}].

$K_{E,Aer}$ = Coeficiente de saturação meia do etanol no metabolismo aeróbio [ML^{-3}].

$K_{E,An}$ = Coeficiente de saturação meia do etanol no metabolismo anaeróbio [ML^{-3}].

K_O = Coeficiente de saturação meia do oxigênio [ML^{-3}].

$F_{B,Aer}$ = Necessidade estequiométrica de utilização de oxigênio para a mineralização de benzeno em condições aeróbias [-].

$F_{E,Aer}$ = Necessidade estequiométrica de utilização de oxigênio para a mineralização de etanol em condições aeróbias [-].

b_{Aer} = Coeficiente de decaimento endógeno de biomassa aeróbia [T^{-1}].

b_{An} = Coeficiente de decaimento endógeno de biomassa anaeróbia [T^{-1}].

R_B = Coeficiente de retardamento do benzeno [-].

R_E = Coeficiente de retardamento do etanol [-].

R_O = Coeficiente de retardamento do oxigênio [-].

X_1 = População de bactérias degradadores aeróbias do etanol [ML^{-3}].

X_2 = População de bactérias degradadores aeróbio de benzeno [ML^{-3}].

X_3 = População de bactérias degradadores anaeróbios de etanol [ML^{-3}].

X_4 = População de bactérias degradadores anaeróbios de benzeno [ML^{-3}].