

**III-261 – ESTUDO EXPERIMENTAL DA MIGRAÇÃO DOS ÍONS CLORETO E SÓDIO NO SOLO DE ATERRO****Adriana de Souza Forster Araujo<sup>(1)</sup>**

Engenheira Química pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena (FAENQUIL/USP). Mestre e Doutora em Engenharia Metalúrgica (Simulação Computacional Aplicada ao meio Ambiente) pela Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR/UFF), Pesquisadora de Pós-Doutorado (PNPD/CAPES) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense (EEIMVR/UFF)

**Maryana Antonia Braga Batalha Souza<sup>(2)</sup>**

Engenheira Ambiental pelo Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA). Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR/UFF).

**Izabella Christynne Ribeiro Pinto Valadão<sup>(3)</sup>**

Engenheira Civil pelo Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA). Mestre e Doutora em Engenharia Metalúrgica (Simulação Computacional Aplicada ao meio Ambiente) pela Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR/UFF), Pesquisadora de Pós-Doutorado (PNPD/CAPES) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense (EEIMVR/UFF)

**José Adilson de Castro<sup>(4)</sup>**

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2. Possui Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal de Ouro Preto, Mestrado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense e Ph. D Em Engenharia com ênfase em Simulação de Processos pela Tohoku University, no Japão.

**Ivaldo Leão Ferreira<sup>(5)</sup>**

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Pará. Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará. Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida dos Trabalhadores, 420 – Vila Santa Cecília – Volta Redonda - RJ - CEP: 27255-125 - Brasil - Tel: (24) 2107-3751 - e-mail: [adriana@metal.eeimvr.uff.br](mailto:adriana@metal.eeimvr.uff.br)

**RESUMO**

A técnica de aterros sanitários para disposição de resíduos sólidos é a mais difundida em todo o mundo. Os mecanismos de decomposição da matéria orgânica, a influência da composição no comportamento da massa de lixo, a eficiência na atenuação de sua carga contaminante, tipos de tratamento e os riscos ambientais são aspectos relevantes que não foram ainda completamente investigados. Este trabalho tem por objetivo analisar comportamento advectivo dos íons cloreto e sódio. Para tanto foram realizados ensaios em colunas de PVC de 80 cm preenchidas com o solo (argiloso) retirado do Aterro Municipal de Volta Redonda e solução contaminante: lixiviado do próprio Aterro. Os resultados obtidos indicaram uma sorção significativa dos íons cloreto e sódio pelo solo em relação ao lixiviado produzido no próprio aterro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sorção, Íons Inorgânicos, Mecanismos de Transporte, Lixiviado.

**INTRODUÇÃO**

A atividade antrópica em sociedade gera os mais variados tipos de rejeitos, denominados lixos, com isso a principal fonte contaminante do solo e das águas subterrâneas são os sistemas de disposição final desses rejeitos, pois estão relacionados com a infiltração de contaminantes e sua migração através do solo, do subsolo e também do lençol freático. O movimento dos contaminantes é influenciado por inúmeros processos que podem ser físicos (advecção e dispersão hidrodinâmica), químicos (sorção, precipitação e complexação) e biológicos (degradação por fatores bióticos ou abióticos).

O processo de transporte de contaminantes no solo em aterro vem sendo descrito através dos mecanismos de sorção e difusão dos íons do lixiviado para o solo (BARBOSA, 1994; RITTER, 1998; RITTER et al, 2003). Nos aterros tem-se o lixiviado gerado pelo processo de degradação do lixo e pela passagem de águas da chuva, através do meio poroso (solo). Ao ser drenado do aterro, o lixiviado resultante da mistura das duas fontes, carrega materiais em suspensão e dissolvidos.

Atualmente, a comunidade científica enfatiza, com uma frequência cada vez maior, o estudo da contaminação dos solos de aterros, sanitários ou controlados, causada pela deposição de resíduos sólidos urbanos. Neste trabalho propõe-se avaliar a contaminação através da migração de íons inorgânicos no solo do Aterro Municipal da cidade de Volta Redonda - RJ.

O município de Volta Redonda, localizado no interior do estado do Rio de Janeiro possui 259.811 habitantes, de acordo com o censo IBGE 2008, sendo a maior cidade da região Sul Fluminense e a terceira maior do interior do estado. O que representa cerca de 200 t/dia de resíduos sólidos, os quais são dispostos no aterro municipal.

O trabalho consiste no estudo do transporte de contaminantes em meio poroso, considerando os fenômenos de transporte e interação solo-chorume. Este estudo compreende o aprofundamento do conhecimento dos ensaios de equilíbrio em lote ("batch tests") e difusão molecular a fim de se determinar parâmetros de transferência de massa.

Dos estudos realizados em análises em laboratórios, ensaio de equilíbrio em lote e ensaios em colunas de PVC com amostras de solo, conclui-se que o lixiviado como solução contaminante influencia no comportamento dos íons cloreto e sódio no solo, sendo que ocorre um aumento de suas concentrações em relação à inicial encontrada no mesmo solo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de se analisar a mobilidade dos íons em estudo no solo Aterro Municipal de Volta Redonda, foi necessário um estudo experimental onde foram realizadas análises em laboratórios sob condições controladas de temperatura e de tempo, ensaio de equilíbrio em lote e ensaios em colunas de PVC com amostras de solo deformadas e compactadas naturalmente. Nos ensaios de laboratório foram feitas as caracterizações do solo e do lixiviado do Aterro, os ensaios de equilíbrio em lote qualificaram e quantificaram a sorção dos íons pelo solo e os ensaios em colunas de PVC forneceram dados sobre o comportamento destes íons.

## PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório envolveram ensaios de caracterização do solo, que incluem a determinação da umidade natural, ensaios de granulometria, e densidade real dos grãos. Estes ensaios, bem como a caracterização do solo, do lixiviado bruto gerado pelo Aterro e do líquido lixiviado nos ensaios de coluna foram realizados em laboratórios particulares, Amprolab, localizado na cidade de Lorena – SP e Operator com sede em São Paulo e filial em Volta Redonda.

## RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

O solo e o lixiviado do Aterro Municipal de Volta Redonda foram caracterizados. O solo possui capacidade de troca catiônica igual a 423,20 mg/dm<sup>3</sup> e pH igual a 5,11 e é caracterizado como argiloso profundo, ácido e com baixa porosidade.

Os resultados analíticos obtidos na caracterização da massa bruta do solo estão apresentados na tabela 1 e do lixiviado na tabela 2.

**Tabela 1 - Caracterização do solo**

Parâmetros	Resultados
Aspecto	Sólido Granulado
Matéria Orgânica	1,455 %
Umidade à 105 °C	9,667 %
Cloreto Total	13,11 mg/Kg
Sódio Total	942,6 mg/Kg

Tabela 2 – Composição química do lixiviado

Parâmetros	Resultados
pH	8,11
Cloreto	1029,5 mg/L
Sódio	397,2 mg/L

## SEGUNDA ETAPA: ENSAIO DE EQUILÍBRIO EM LOTE

A medida de sorção foi efetuada através do ensaio de equilíbrio em lote (batch equilibrium test) com o solo e o lixiviado do Aterro.

Cerca de 25g de solo seco em estufa por 24 horas foram misturados com 250 mL de lixiviado a várias concentrações, em uma razão solo: solução de 1:10. O lixiviado foi diluído em soluções de 0%, 15%, 35%, 50%, 75% e 100%. Este composto ficou em uma mesa agitadora a 250 rpm por aproximadamente 48 horas.

A filtração ocorreu para separar a porção líquida de lixiviado e a porção sólida do solo, e foi realizada através de uma bomba a vácuo. Somente na porção líquida foi realizada a análise química, a qual forneceu a concentração dos íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ , presentes em cada uma das fatias de solo.

## RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Os valores de concentração de equilíbrio de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  versus quantidade de soluto sorvido, obtidos do ensaio de equilíbrio em lote estão apresentados nas figura 1 e 2. Verifica-se que pode ser traçada uma isoterma tipo linear, visto que há uma tendência de definição de um patamar.

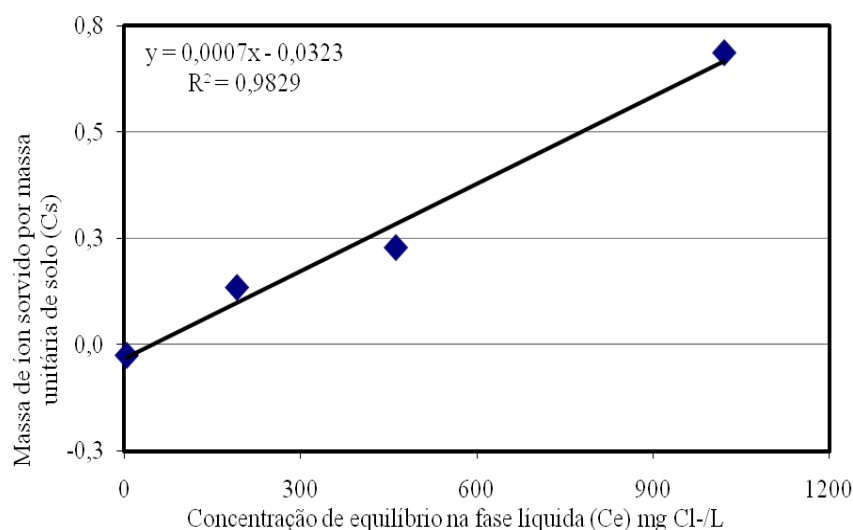
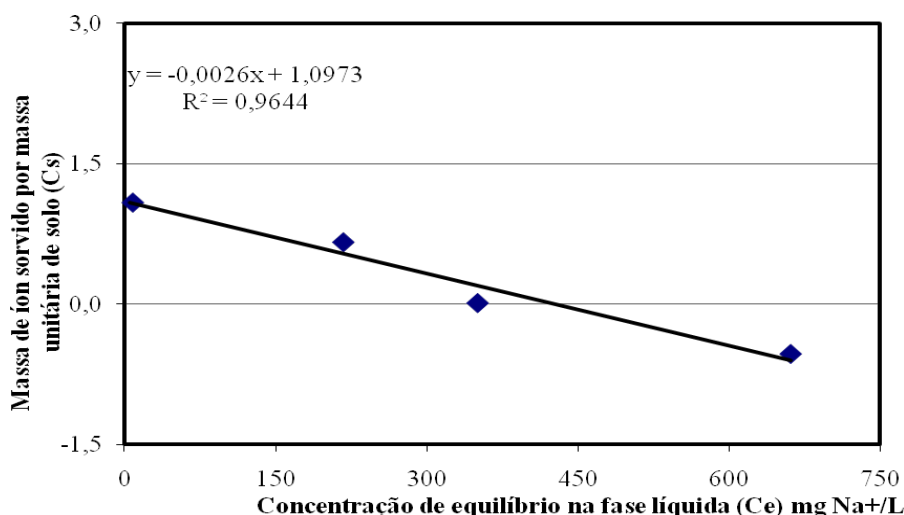


Figura 1 - Gráfico da concentração de equilíbrio versus quantidade de massa sorvida do íon  $\text{Cl}^-$ .



**Figura 2 - Gráfico da concentração de equilíbrio versus quantidade de massa sorvida do íon Na<sup>+</sup>.**

No ensaio de equilíbrio em lote as curvas para os íons cloreto e sódio foram obtidas através dos resultados da análise química das soluções em diferentes proporções. Como mostrado, ao dispô-los graficamente, obteve-se uma relação linear crescente entre a massa dos íons sorvida e a concentração do íon na solução. Isso demonstra um caráter sorcivo e verifica-se que quando maior a concentração dos íons na fase líquida, mais sorvidos estes íons é pelo solo.

### TERCEIRA ETAPA: ENSAIO EM COLUNAS DE PVC

#### PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Foram realizados ensaios em coluna de PVC com a utilização do solo do Aterro Municipal de Volta Redonda e lixiviado do Aterro, devido à necessidade de avaliação do comportamento dos íons frente a distintas concentrações. As amostras de solo utilizadas no experimento são provenientes da jazida que fornece material para cobertura do Aterro Municipal da cidade de Volta Redonda, e foram coletadas em 20 pontos distintos do terreno a uma profundidade de 0,10 a 0,20 m.

O experimento foi realizado em colunas de PVC com diâmetro de 10 cm e uma altura de 100 cm, dos quais 60 cm foram preenchidos com solo do Aterro Municipal de Volta Redonda. Os tubos de PVC foram dispostos na vertical e apoiados em um tampo de madeira de uma mesa de ferro construída especialmente para realização deste ensaio.

Na parte inferior das colunas de PVC foram colocadas telas de nylon com o objetivo de sustentar o solo e mantê-lo na mesma altura do início ao fim do experimento.

Na extremidade inferior do tubo de PVC foram colocados uma luva e dois redutores de PVC que reduzem o diâmetro de 100 mm para 50 mm e posteriormente de 50 mm para 25 mm, para que o lixiviado produzido fosse coletado mais facilmente. Dentro dos redutores de PVC, foram colocadas bolinhas de gude para a simulação de uma maior porosidade do que a encontrada dentro do tubo contendo o solo, facilitando assim o movimento do lixiviado. Imediatamente abaixo das bolinhas de gude foi colocado um papel filtro, para reter o material particulado que eventualmente tenha desprendido da amostra de solo.

Após a montagem de toda estrutura de PVC na mesa auxiliar foi adicionado o solo do Aterro Municipal de Volta Redonda em cada um dos tubos, o qual sofreu apenas uma compactação natural devido à ação da força gravimétrica sobre a massa de solo. A massa de solo presente em cada tubo foi saturada com água destilada e deionizada a 70% da capacidade de campo, sendo esta, a quantidade de água restante no solo após o excesso ter sido drenado. O índice de capacidade de campo foi calculado da seguinte maneira:

CC = média (md – mc - ms)

equação (1)

Onde md é a massa de solo após drenagem, mc é a massa do recipiente descartável utilizado para pesar o solo e ms é a massa de solo seco.

De posse do valor do índice de capacidade de campo, foi possível determinar o volume máximo de água para saturar a massa de solo colocada em cada coluna de PVC.

A quantidade da massa de solo para preencher cada uma das colunas foi determinada a partir do volume da coluna de PVC considerando a altura de 60cm, e a densidade do solo.

A densidade do solo do Aterro municipal foi determinada através de uma média de três amostragens. Em bechers de 100ml de volume, pesou-se o solo seco em estufa por 24 horas até que este atingisse o volume total do becher. De posse do valor da massa de solo e do volume de 100ml (de cada becher) encontrou-se o valor médio da densidade do solo.

Conhecendo-se o valor da densidade (d) e do volume (v) do solo, foi possível encontrar a massa (m) de solo a ser adicionada em cada coluna.

Entretanto para o cálculo da densidade foi utilizada amostra de solo seco e nas colunas foi colocado o solo com umidade natural. Por esse motivo foi necessário determinar o valor da umidade do solo para que fosse possível calcular o valor real (considerando a umidade) da massa de solo a ser colocada nas colunas. A umidade (h) do solo foi determinada a partir da equação 2:

$$h = \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}}$$

equação (2)

Onde Msh é a massa do solo úmido e Mss é a massa do solo seco.

## EXECUÇÃO DO ENSAIO

Na parte superior das colunas de PVC foi adicionado o lixiviado do Aterro Municipal de Volta Redonda. A existência de um gradiente hidráulico nos ensaios favoreceu a percolação do líquido lixiviado. A adição dos líquidos foi realizada por meio da parte superior de garrafas pets.

Os ensaios foram realizados num período de quatro semanas. Nas duas primeiras semanas foi adicionado sobre o solo um volume de 200ml de solução (lixiviado). Entretanto, para que fosse possível obter uma quantidade maior do líquido percolado para análise dos íons, na terceira e quarta semana o volume do líquido adicionado em cada coluna de solo foi dobrado, passando para 400ml.

A escolha da utilização do lixiviado do Aterro foi para que fosse possível representar a situação real que ocorre no aterro. Comparando assim, a concentração inicial dos íons Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> contidos no lixiviado gerado pela decomposição dos resíduos e a concentração final destes íons no líquido percolado. A escolha destes íons se deve a uma crescente preocupação devido á concentração significativa dos mesmos em lixiviado de aterros (Christensen et. al, 2001).

Para todos os líquidos utilizados foi realizada uma comparação da concentração dos íons (Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>) contidos nas soluções adicionadas sobre o solo e nos líquidos percolados.

O líquido percolado foi depositado em recipientes de garrafas pets. Posteriormente, foi coletado e armazenado em garrafas de plástico de 300 ml com tampa, identificados, mantido sob ambiente refrigerado e enviados para análise química. A coleta de líquido ocorreu a cada 7 dias durante 28 dias. Ao término deste período o solo contido dentro das colunas de PVC foi retirado sem deformação e fatiado em quatro partes. O solo de cada fatia foi homogeneizado e então foi retirada uma amostra para análise química.

## DESMONTAGEM DO ENSAIO

As amostras de solo contidas em cada coluna foram fatiadas em quatro partes: a primeira fatia (topo) com 10 cm de altura, a segunda e terceira fatia (meio) com 20 cm de altura e quarta fatia (base) com 10 cm de altura. Cada fatia de solo foi homogeneizada e identificada e enviadas para análises.

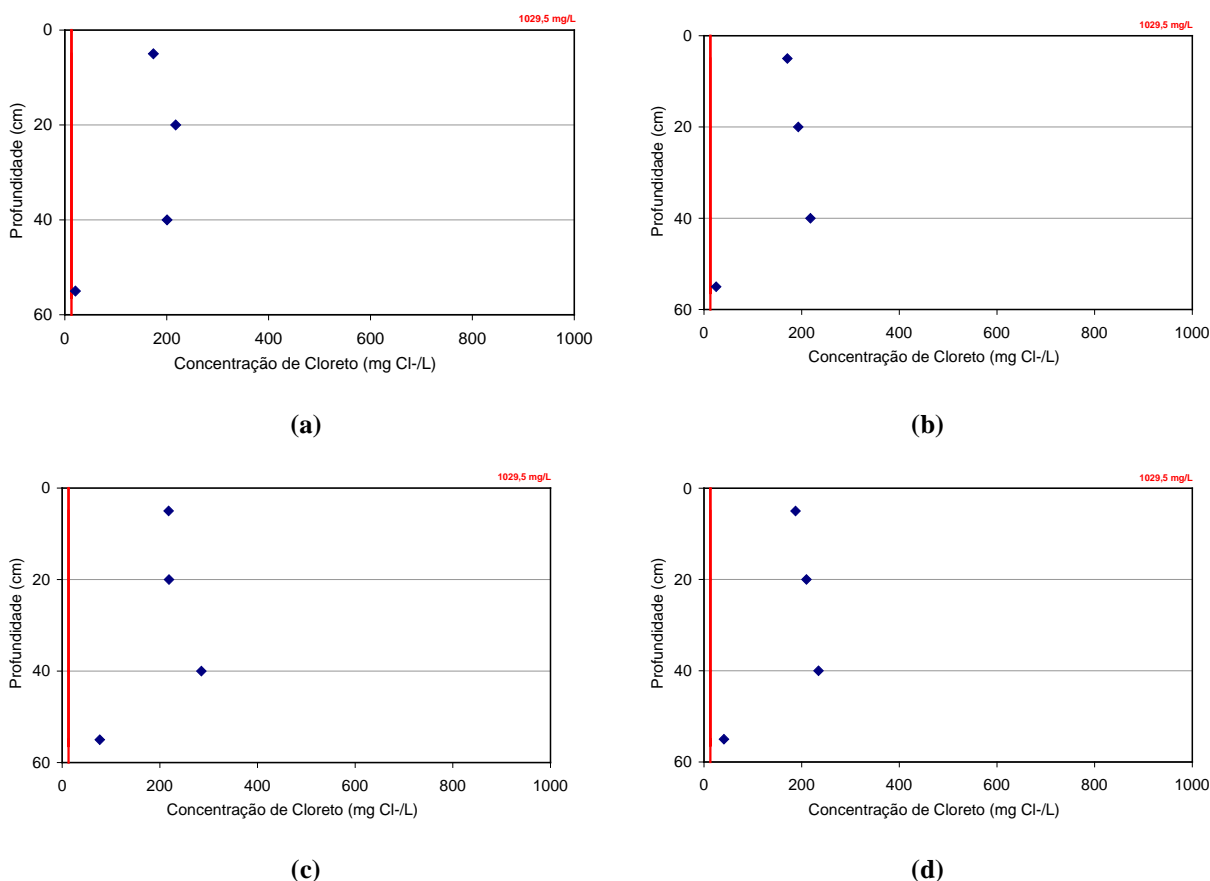
As análises realizadas nas amostras de solo de cada fatia foram: Umidade a 105 °C, cloreto e sódio total.

Procedimentos de lixiviação foram realizados para obter as concentrações de cada íon em cada uma das quatro fatias da amostra de solo. Os ensaios de lixiviação das amostras de solo foram realizados pelo laboratório, sendo analisados: cloreto, sódio total, pH (solução a 5%), pH final do extrato do lixiviado.

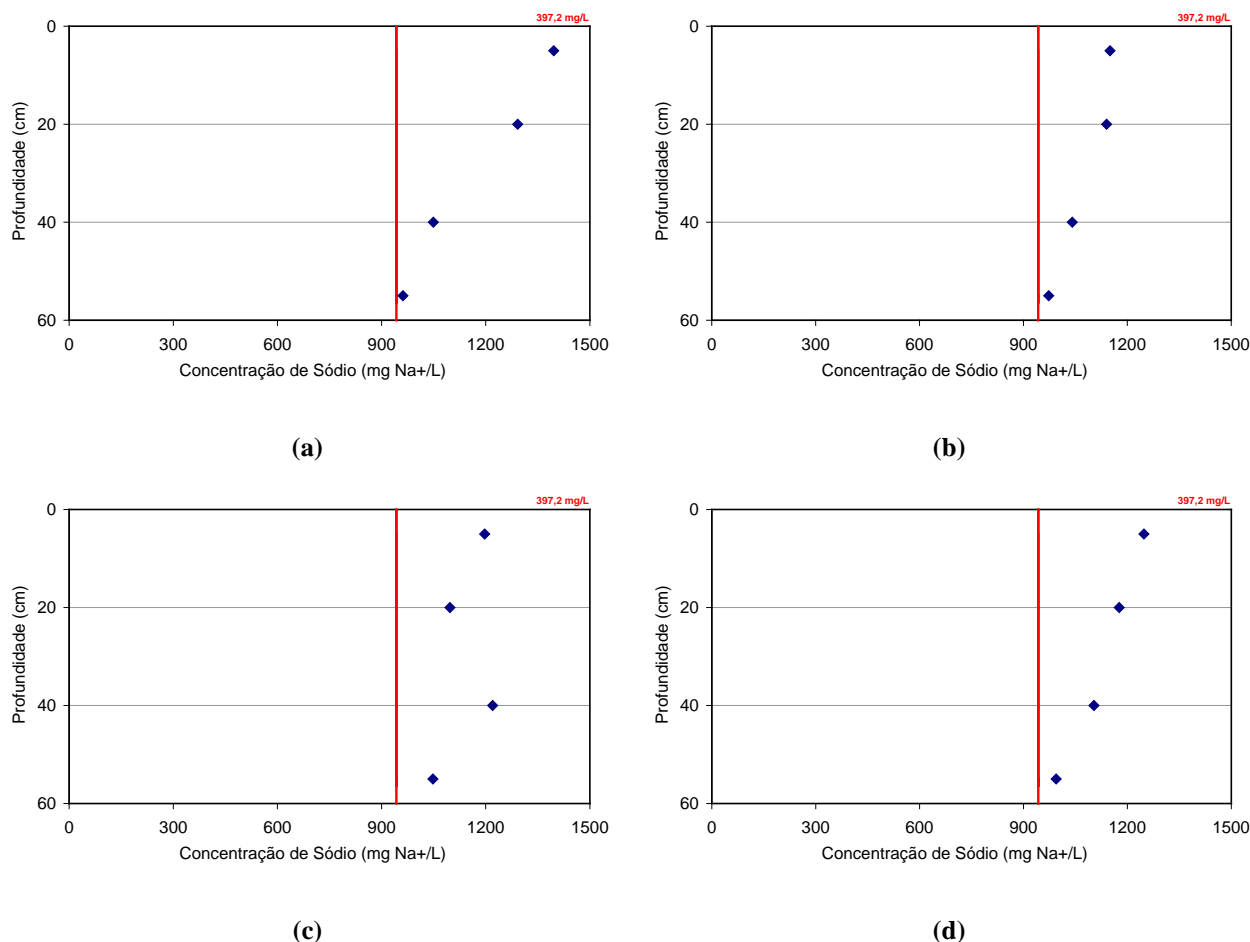
## RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

As medidas de concentração no solo do ensaio com fluxo de líquido em colunas de PVC estão apresentados nas figuras 3 e 4 (pontos assinalados azuis), respectivamente para cloreto e sódio. O valor da concentração inicial, ou concentração de referência, de cada íon na massa bruta do solo é representado nos diagramas através de uma linha vertical e contínua. O valor em vermelho representa a concentração de cada um dos íons na solução contaminante, conforme aplicação.

As figuras 3 a 4 apresentam os perfis de contaminação para os íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ , respectivamente, em cada coluna juntamente com a média das três colunas, contendo lixiviado do Aterro como solução contaminante.



**Figura 3 - Perfil de contaminação, na presença de lixiviado, do íon  $\text{Cl}^-$  nas colunas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e média (d).**



**Figura 4 - Perfil de contaminação, na presença de lixiviado, do íon Na<sup>+</sup> nas colunas 1 (a), 2 (b), 3 (c) e média (d).**

Nota-se que nos ensaios com fluxo de líquido observa-se o perfil advectivo, sendo vista uma maior concentração nos primeiros centímetros e menor nos últimos centímetros da coluna, a qual se aproxima à inicial do solo, sugerindo que a saturação do solo não foi suficiente para a lixiviação da solução contaminante através de toda massa de solo e demonstrando que a saturação do solo influencia na sua resistência ao escoamento do fluido.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Em relação aos ensaios de equilíbrio em lote, que quantificam a capacidade de sorção do solo para os contaminantes presentes no lixiviado do Aterro, os resultados indicaram uma sorção significativa dos íons cloreto e sódio deste solo em relação ao lixiviado produzido no próprio aterro.

Quando se trata dos ensaios realizados em colunas de PVC contendo solo e lixiviado do Aterro Municipal de Volta Redonda, os resultados apresentaram variação na concentração dos íons contida na massa bruta de solo. Verificando assim, que o lixiviado como solução contaminante influencia no comportamento destes íons no solo, fazendo com que a concentração destes sofram um ligeiro aumento em relação ao valor da massa bruta sem contaminação. Demonstrando desta maneira que o solo adsorve íon da solução contaminante, fazendo com que sua concentração sofre um aumento em relação a sua concentração inicial.

Tendo em vista a crescente preocupação com os resíduos de materiais nanoparticulados, ensaios semelhantes aos realizados neste trabalho estão sendo realizados. O objetivo é analisar a contaminação de diferentes tipos de solo (arenoso, argiloso e orgânico) com nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (Óxido de titânio). As nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  são comumente utilizadas em produtos cosméticos, protetores solares, tintas, revestimentos, etc. Ainda não é conhecida completamente o comportamento deste tipo de resíduo na matriz porosa do solo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BARBOSA, M.C. Investigação Geoambiental do depósito de argila sob o aterro de resíduos sólidos de Gramacho-RJ. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil. COPPE/ UFRJ. 1994.
2. CHRISTENSEN, T.H.; KJELSEN, P.; BJERG, P.L.; JENSEN, D.L.; CHRISTENSEN, J. B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H-J. & HEROM, G. Biochemistry of Landfill Leachate Plumes. Applied Geochemistry, Vol. 16, p. 659- 718. 2001.
3. RITTER, E. et al..Effect of soil salinity upon diffusion and sorption of inorganic ions. Third International Congress on Environmental Geotechnics. Lisboa, Portugal. pp.461 - 466. 1998.
4. RITTER, E. et al. Contamination process through an organic soil of Gramacho MSW landfill. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia, Italy. 2003.