

Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação

Rodrigo Eduardo Córdoba¹, Valdir Schalch^{2, †}

*Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Hidráulica e Saneamento
Av. Trabalhador São-carlense, 400 CP 359 CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil*

RESUMO

O artigo apresenta resultados de estudo que verificou o potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil Classe A (aterros que são dispostos somente resíduos da construção civil como solo, componentes cerâmicos, argamassa e concreto). A metodologia adotada consistiu em simulações em colunas de lixiviação e ensaios de bancada representados pelo SPLP - *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* e o compêndio de normas para classificação de resíduos sólidos brasileiros. Resultados dos ensaios de bancada classificaram as amostras de resíduos como não perigosos e não inertes. Os lixiviados obtidos nas simulações em colunas de lixiviação apresentaram concentrações de metais pesados acima dos valores máximos permitidos para consumo humano brasileiro das águas subterrâneas, cujas concentrações máximas obtidas foram: Pb (0,26 mg/L), Cd (0,075 mg/L), Fe (0,658 mg/l), Ni (0,088 mg/L), e Cr (0,125 mg/L). A hipótese tema do estudo foi verificada, a qual apontou que existe potencial de contaminação dos lixiviados gerados nesses aterros, os quais podem vir a poluir ou contaminar o solo e as águas subterrâneas inviabilizando o uso dessas águas para consumo humano.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) apresentou classificação segundo a tipologia dos resíduos encontrados no setor da construção civil, a fim de facilitar procedimentos de gestão e manejo dos resíduos dessa natureza. Os resíduos da construção civil (RCC) são classificados de acordo com a referida resolução em:

- RCC Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, representados por resíduos cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento), argamassa e concreto;
- RCC Classe B – resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- RCC Classe C – resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações

¹ Doutor

¹ Professor Associado

[†] Av. Trabalhador São-carlense, 400 CP 359 CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil (cordoba@usp.br)

- economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; e
- RCC Classe D – resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e amianto.

A referida resolução nº 307/2002 e a resolução CONAMA nº 448/2012 instituíram que os municípios devem proibir a destinação de resíduos da construção civil (RCC) em aterros de resíduos sólidos urbanos, áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei.

Com isso, os municípios ficaram incumbidos de estabelecer procedimentos para o manejo e destinação ambientalmente adequada desses resíduos. Nesse contexto, os RCC Classe A, após triagem, devem ser prioritariamente destinados à reutilização ou reciclagem na forma de agregados. Na impossibilidade de reutilização ou reciclagem desses resíduos, as resoluções estabelecem a possibilidade de destinação dessa classe de RCC para aterros de resíduos Classe A de reservação de material para usos futuros e resíduos inertes.

Entretanto, esses aterros RCC e resíduos inertes não possuem impermeabilização de base e sistemas de drenagem de lixiviados, o que pode favorecer a migração desses lixiviados de RCC para reservas de água e colocar em risco à saúde da população e o meio ambiente. Em concordância com essa hipótese, alguns autores apontam que nesses aterros ocorre à disposição de pequenas quantidades de resíduos de outras classes de RCC – Classe B, Classe C e Classe D – e de resíduos de outras origens, os quais tornariam possível a contaminação do solo e dos recursos hídricos (Ferguson & Male, 1980; Townsend *et al.*, 1999; Angulo & John, 2006).

Neste contexto, ensaios que simulem a interação desses resíduos quando dispostos em aterros de RCC são necessários. Existem vários modelos de simulação que permitem modelar um cenário teórico dos processos físico-químicos que ocorrem no interior desses aterros, como ensaios de solubilização, lixiviação, e simulações em colunas de lixiviação (lisímetros) em escala bancada ou piloto.

O presente artigo tem como objetivo principal apresentar estudo que investigou o potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação, classificando as amostras de RCC Classe A e avaliando os cenários de disposição final de RCC mediante simulações.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do estudo foi dividida em quatro fases, as quais serão descritas a seguir:

2.1 Primeira fase: amostragem

Os RCC Classe A obtidos na usina de reciclagem do município de São Carlos, SP podem ser definidos para critérios de amostragem em agregado de resíduo de concreto (ARC), composto na sua fração gráuda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas – concreto, argamassa e artefatos de cimento – e agregado de resíduo mistos (ARM), composto na sua fração gráuda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas – predominam materiais cerâmicos e solo, com a presença de pequenas quantidades argamassa, concreto e pedras. O material amostrado consistiu em agregados RCC Classe A processado, ou seja, material que passou pelo processo de britagem e peneiramento.

O procedimento de amostragem consistiu na coleta de lotes contendo 120 kg de agregados de resíduo de concreto (ARC) e 60 kg de agregados de resíduo misto (ARM). Em

cada lote os agregados tipo ARC foram compostos em porcentagem de massa de 25% de areia grossa, 25% de brita nº1, 25% de pedrisco, e 25% de pedregulho (rachão). Já para os agregados tipo ARM foram coletadas apenas duas frações – 50% menor (granulometria menor ou igual a 25 mm), e 50% maior (granulometria maior que 25 mm).

Para esse experimento foram coletados ao todo 3 lotes de cada tipo de material – ARC e ARM, totalizando 540 kg. Para coleta de amostras representativas os lotes foram coletados a cada 2 meses durante o período de um semestre. A média obtida com relação da massa específica dos ARC representou 1,21 t/m³ e a massa específica 1,11 t/m³.

Cabe informar que essa mistura de lotes dos ARC – Agregado de Resíduo de Concreto, foi efetuada somente para componentes semelhantes, por exemplo, mistura das amostras de pedrisco dos 3 lotes. Depois de misturados e homogeneizados, as amostras dos 3 lotes foram quarteadas e recolhidas alíquotas 1,9 kg por coluna. Por fim, as alíquotas de 1,9 kg de cada componente areia grossa, pedrisco, pedra e rachão foram homogeneizadas e inseridas nas colunas.

A composição dos ARM consistiu na mistura dos 3 lotes para ARM Menor e ARM Maior. Depois de quarteados, 3,8 kg de ARM Menor e 3,8 kg ARM Maior foram misturados, homogeneizados e inseridos nas colunas.

Para o enriquecimento da qualidade da simulação, os ARM com granulometria maior que 3 cm e os ARC - rachão foram reduzidos a dimensões aproximadas de 3 cm por 3 cm (Figura 1).



Figura 1 – a) Redução das dimensões do ARM Maior. b) Redução das dimensões do ARC – Rachão.

2.1 Segunda fase: simulação de lixiviação

Um dos métodos propostos no estudo consiste na simulação da percolação de chuva em aterros de resíduos da construção civil. Neste contexto, foram realizados experimentos nos moldes das simulações realizadas por Townsend *et al.* (1999) e Roussat *et al.* (2008). Contudo foram feitas algumas adaptações para que esses experimentos simulassem de maneira efetiva os efeitos dos lixiviados de resíduos da construção civil existentes no Brasil.

Para avaliar o efeito do RCC classe A foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização de cada um dos componentes dos RCC de acordo com a NBR 10.005 (ABNT, 2004) e a NBR 10.006 (ABNT, 2004) respectivamente, bem como o ensaio SW-846 Método 1312, denominado SPLP – *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (USEPA, 1994).

Na parte experimental foram utilizadas quatro colunas de lixiviação (lisímetros), sendo duas em regime saturado e duas em regime não saturado. Essas colunas consistem em tubos de acrílico reforçado com dimensões de 9 cm de diâmetro, 100 cm de altura e volume útil de 6,3 litros.

No interior de cada coluna 6,3 litros (7,6 kg) de amostras de RCC foram armazenadas para posteriormente serem ensaiadas. Essas colunas possuíam as seguintes estruturas de

apoio: reservatório-fonte para solução lixiviante, reservatório de armazenamento de líquidos percolados com capacidade de 1,6 litros e bomba para o recalque de solução lixiviante (Figuras 2).

Para composição dos agregados nas colunas de lixiviação foram misturadas e homogeneizadas as amostras dos 3 lotes coletados.

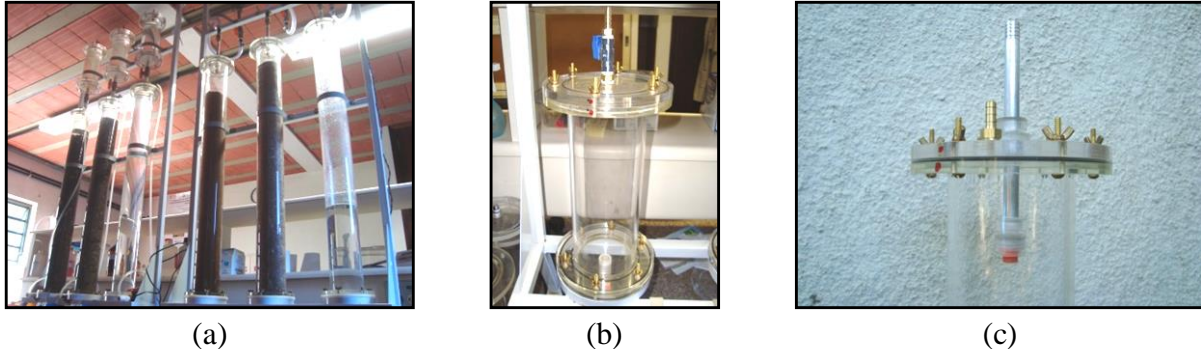


Figura 2 – a) Colunas de lixiviação. b) Reservatório de líquidos percolados. c) Detalhe do micro aspersor regulável

Para a determinação da quantidade de solução lixiviante utilizada em cada coluna foi realizado um balanço hídrico para aterro de RCC do município de São Carlos-SP. Com base no balanço hídrico foi possível estimar a quantidade de chuva que infiltra no aterro (mm/ano), que representa 1.317,0 mm/ano.

Diante desses dados, foi possível concluir que cada coluna saturada e não saturada deveria receber aproximadamente 23,9 litros de solução lixiviante, o que representa um período de chuvas de aproximadamente 3 anos de vida do aterro.

Para o bombeamento da solução lixiviante nas colunas saturadas, foram utilizadas bombas peristálticas com fluxo diário de 230 mL. Essas bombas peristálticas fazem o recalque de líquido lixiviante de maneira alternada, ou seja, recalcam aproximadamente 19 mL a cada meia hora, cuja velocidade de percolação foi aproximadamente $4,98 \cdot 10^{-3}$ cm/s. Cabe ressaltar que nas simulações em condições saturadas foram adotados fluxos ascendentes com pressão contínua, a fim de evitar a formação de caminhos preferenciais, e assim garantir maior interação dos RCC com a solução lixiviante.

Para o funcionamento do sistema em condições não saturadas, o fluxo adotado da solução lixiviante foi descendente. Para tanto, foram aspergidos 400 mL de solução lixiviante em dias alternados – segunda, quarta, sexta e domingo, mediante o uso de bomba elétrica de alta pressão e microaspersores, cuja velocidade de percolação foi aproximadamente $1,05 \cdot 10^{-2}$ cm/s.

Nesse experimento foram coletadas amostras semanais de lixiviados, as quais foram preservadas em laboratório, conforme critérios APHA *et al.* (2005). Cabe informar que o período total desse experimento foi de 112 dias sem interrupções.

2.2 Terceira fase: chuva sintética, ensaios de lixiviação e solubilização

Para ensaios de resíduos sólidos em que o contato com resíduos domiciliares seja pouco provável, como é o caso dos RCC, a USEPA recomenda o uso do ensaio SW-846 Método 1312, denominado *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (SPLP). De acordo com a (USEPA, 1994) o Método 1312 é indicado para determinar o potencial de lixiviação de materiais devido a precipitações levemente ácidas. A solução extratora desse ensaio utiliza

ácido sulfúrico e ácido nítrico para melhor representar a chuva ácida resultante de óxidos de nitrogênio e enxofre.

Diante do exposto, é recomendável que os resíduos da construção civil devam ser ensaiados de acordo com recomendações do SW-846 Método 1312 (USEPA, 1994), devido esses resíduos não interagirem com matéria orgânica facilmente degradável. Neste contexto, é valioso informar que trabalhos de pesquisadores dos EUA adotaram as soluções lixiviantes do SW-846 Método 1312 para realizar simulações de RCC em colunas de lixiviação (Townsend *et al.*, 1999; Townsend *et al.*, 2000; Jang & Townsend, 2003).

Neste estudo as amostras de RCC foram submetidas a ensaios de lixiviação conforme procedimentos recomendados pela NBR 10.005 (ABNT, 2004), o ensaio SW-846 Método 1312, denominado *Synthetic Precipitate Leaching Procedure* (SPLP).

Para obtenção do extrato lixiviado segundo o ensaio SW-846 Método 1312 foi utilizado como líquido lixiviante o fluido de extração nº 2 do Método 1312 (USEPA, 1994), cujo pH é $5,00 \pm 0,05$. Esta pesquisa optou pelo uso da referida solução de extração, pois ela é a que melhor representa o pH da chuva ácida em regiões urbanizadas do Brasil, semelhante a área do aterro. Para preparação do fluido de extração foi realizado uma adição de 60/40 por cento em massa de uma mistura de ácido sulfúrico 50% e ácido nítrico 50%.

Para obtenção do extrato lixiviado das amostras de RCC conforme recomenda a NBR 10.005 (ABNT, 2004), foi utilizado como líquido extrator uma solução composta por ácido acético glacial. Para obtenção do extrato solubilizado das amostras de RCC foram seguidos os procedimentos para obtenção do extrato solubilizado da NBR 10.006 (ABNT, 2004). Para esse ensaio foi utilizada água deionizada isenta de orgânicos, conforme recomenda a NBR 10.006 (ABNT, 2004).

2.3 Quarta fase: análise dos parâmetros físicos- químicos

Os métodos utilizados para análise dos extratos solubilizados, lixiviados, e lixiviados das colunas, equipamentos, bem como suas referências estão apresentadas no Quadro 1.

Cabe informar que os lixiviados analisados para as colunas de lixiviação foram relativos à coleta da 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª, 6ª, 7ª, 8ª, 10ª, 12ª, e 16ª semana.

Quadro 1 - Metodologia analítica usada para análise dos extratos lixiviados e solubilizados.

Parâmetro	Método	Equipamento	Referência
Temperatura (° C)	Termometria - 2550 B	Termômetro de mercúrio -10e +60 - Incoterm	APHA et al. (2005)
pH	Potenciométrico - 4500-H+ B	pHmetro Bancada. Digimed Modelo: DM-22	
Metais em solução (zinco, chumbo, cádmio, níquel, ferro solúvel, manganês solúvel, cobre, cromo total) (mg/L)	Espectrometria de absorção atômica - 3111 B	Varian AA240 FS espectrofotômetro de absorção atômica	

3. RESULTADOS

A partir da secagem das amostras de agregados de RCC classe A em estufa, foi possível determinar a média de teor de umidade e de material seco, em porcentagem. A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, pode-se observar que agregados de resíduo de

concreto (ARC) possuem teor de umidade variando de 3,52% a 12,27%, enquanto os agregados de resíduo misto (ARM) apresentam teor de umidade de 7,14% a 10,24%.

Tabela 1 – Teor de umidade e material seco

Amostra	Nº da amostra	Teor de umidade (%)	Material seco (%)
Areia Fina (Granulometria até 2,4mm)	ARC1	12,27	87,73
Pedrisco (Granulometria até 9,5 mm)	ARC2	6,17	93,83
Brita nº1 (Granulometria até 19 mm)	ARC3	4,89	95,11
Rachão (Granulometria acima de 25mm)	ARC4	3,52	96,48
ARM menor (bica corrida) (granulometria menor ou igual a 25 mm)	ARM5	10,24	89,76
ARM maior (granulometria maior que 25 mm)	ARM6	7,14	92,86

A seguir são apresentados os resultados analíticos dos lixiviados obtidos nas simulações, os quais foram comparados com os valores máximo permitido (VMP) para consumo humano, segundo a Resolução CONAMA nº 396 - Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas (BRASIL, 2008), e da Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde - Padrão de potabilidade da água para consumo humano (BRASIL, 2011). O Quadro 2 apresenta a relação de colunas, seu regime e o tipo de resíduo ensaiado.

Quadro 2 – Relação de colunas, seu regime e o tipo de resíduo ensaiado

Coluna	Regime	Tipo de Resíduo
A	Saturado	ARM
B	Saturado	ARC
C	Saturado	Branco de laboratório
D	Não saturado	ARM
E	Não saturado	ARC
F	Não saturado	Branco de laboratório

Para maior clareza o eixo “x” dos gráficos representa uma relação da quantidade de líquido inserido no sistema pela massa de resíduos ensaiada. A massa ensaiada nas colunas corresponde a 7,6 kg, já o líquido corresponde à quantidade de chuva sintética que infiltrou através dos resíduos. Para ter uma noção à relação L/S equivalente a 2,84 L/kg corresponde a uma precipitação de 2.750 mm de chuva.

Resultados apontaram que os valores medidos de temperatura das amostras de lixiviados coletadas nas colunas variaram de 22,2 a 28,2 °C, valores semelhantes à temperatura ambiente do laboratório onde foram instalados os experimentos.

No início das simulações pode-se observar que valores obtidos de pH para as colunas branco de laboratório (C e F) foram superior a 5,00, valor esse correspondente ao pH da solução lixiviante. Cabe ressaltar que devido à solução lixiviante não ser tamponada ou ainda a pequenas interferências do sistema possa ter ocorrido esse aumento de pH.

As colunas A e D inicialmente apresentaram valores de pH de 6,51 e 6,38, respectivamente, e ao longo do experimento apresentaram crescimento chegando a valores de pH de 8,26 e 9,16 na relação L/S igual a 3,87 L/kg. As colunas B e E apresentaram valores iniciais de pH de 10,60 e 10,56, respectivamente com pequeno crescimento ao longo do

experimento chegando ambos a valores de pH de 11,28 na relação L/S igual a 3,87 L/kg (Figura 3).

Quanto ao tipo de regime pode-se verificar que não houve diferenças significativas do pH entre as simulações em regime saturado e não saturado. As colunas que continham ARC apresentaram valores de pH elevados quando comparados com as amostras de ARM devido serem compostas por argamassas de revestimento de paredes, as quais apresentam em suas composição cal hidratada. A dissolução do concreto ou a presença de cimento que não reagiu totalmente durante a execução dos elementos cimentícios, também pode ser um dos motivos para elevados valores de pH, quando o cimento reagiu com a solução levemente ácida pode ter liberado o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o qual conferiu a solução um pH elevado. Estudos realizados por Townsend *et al.* (1999), em colunas de lixiviação em regime não saturado contendo 100% de concreto, apontaram valores de pH semelhantes, os quais variavam de 11 a 12.

Neste estudo foi possível observar que as colunas A e D (ARM) apresentaram maiores concentrações de Pb, Cd, Ni, Mn e Cu quando comparadas com as colunas B e E (ARC).

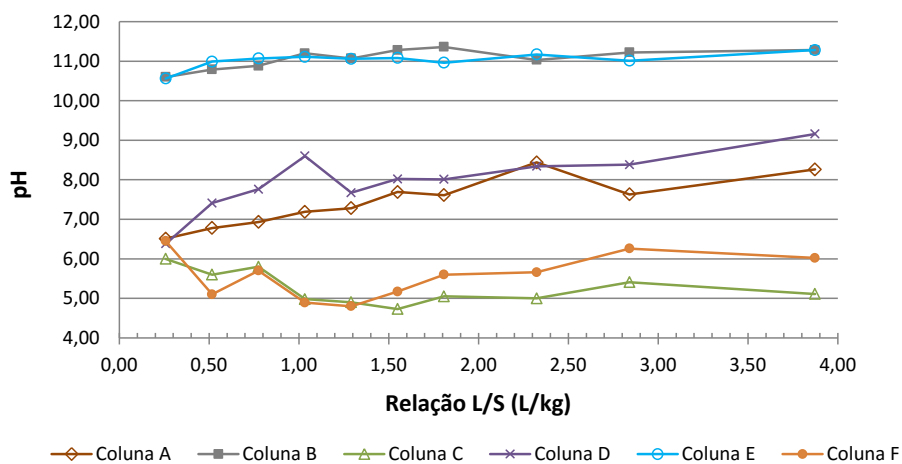


Figura 3 – Valores obtidos de pH dos lixiviados

Nas Figuras 4, 5 e 6 podemos observar a importância de ser realizado um experimento em paralelo com uma coluna branco de laboratório, os valores de zinco, chumbo e cobre para as colunas branco foram superiores aos das colunas amostrais. Mecanismos de sorção ou precipitação do zinco, chumbo e cobre contido na água no interior das colunas podem ter contribuído para diferença apresentada. Estudos realizados por Coleman *et al.* (2005) sobre interação aquosa dos íons Cu^{+2} , Pb^{+2} e Zn^{+2} com frações finas de resíduos de concreto, os quais apontaram que esse tipo de material pode ser um sorvente eficaz espécies metálicas aquosas em virtude de suas fases de íons trocáveis e pH alto.

Na Figura 4 pode se observar que os valores de chumbo excedem o valor máximo permitido para consumo humano, obtendo concentração máxima de 0,26 mg/L nas amostras saturadas de ARM, e 0,13 mg/L nas amostras saturadas de ARC.

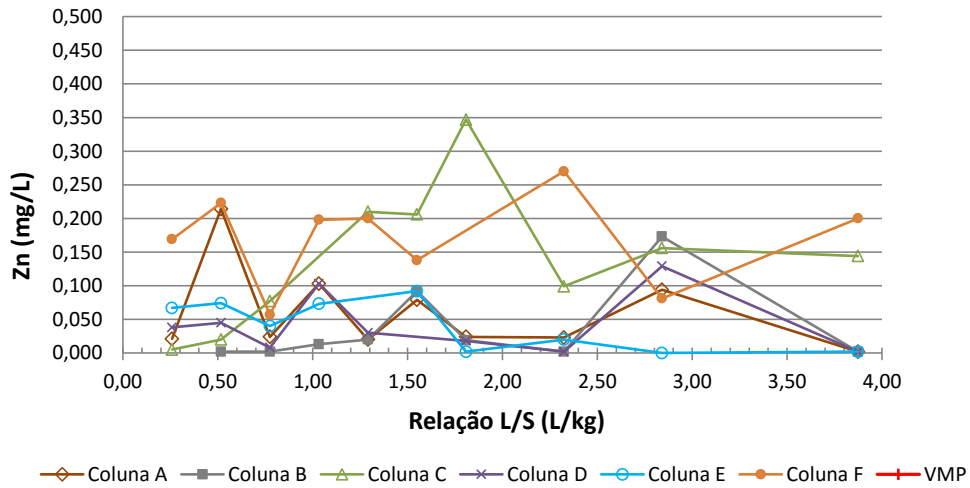


Figura 4 – Valores obtidos de zinco (Zn) dos lixiviados

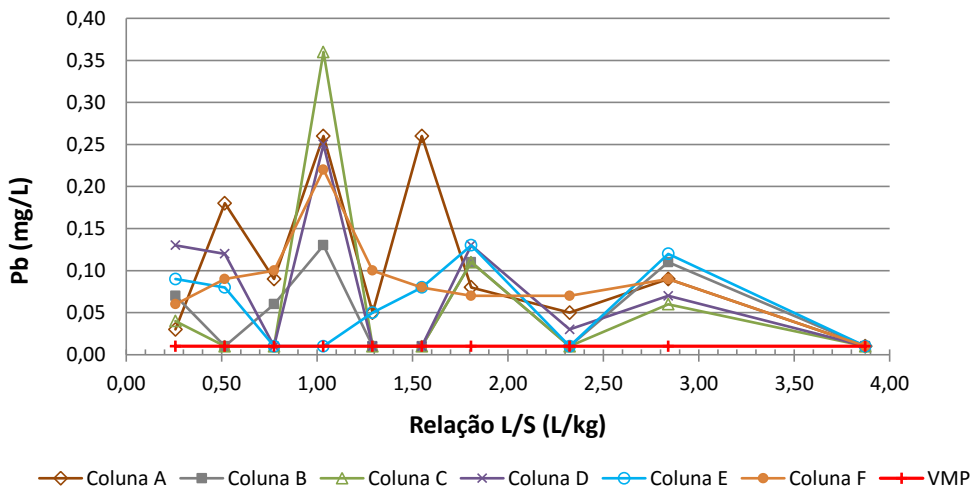


Figura 5 – Valores obtidos de chumbo (Pb) dos lixiviados

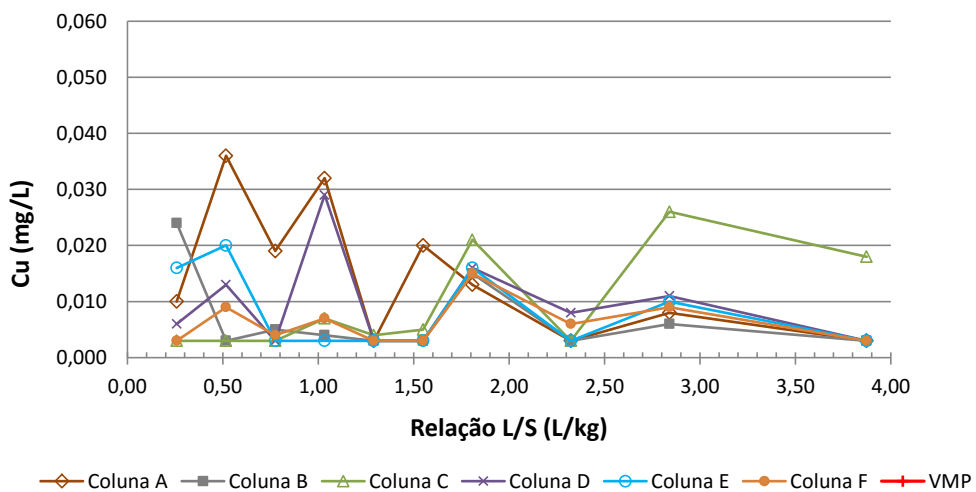


Figura 6 – Valores obtidos de cobre (Cu) dos lixiviados

Na Figura 7 pode-se observar fato semelhante ao ocorrido com o cobre, chumbo e

zinco, porém somente para o regime não saturado. Mecanismos de sorção ou precipitação do cádmio podem ter contribuído para essa diferença. Na Figura 7 pode se observar que os valores de cádmio excedem o valor máximo permitido para consumo humano, obtendo concentração máxima de 0,075 mg/L nas amostras saturadas de ARM, e 0,065 mg/L nas amostras saturadas de ARC.

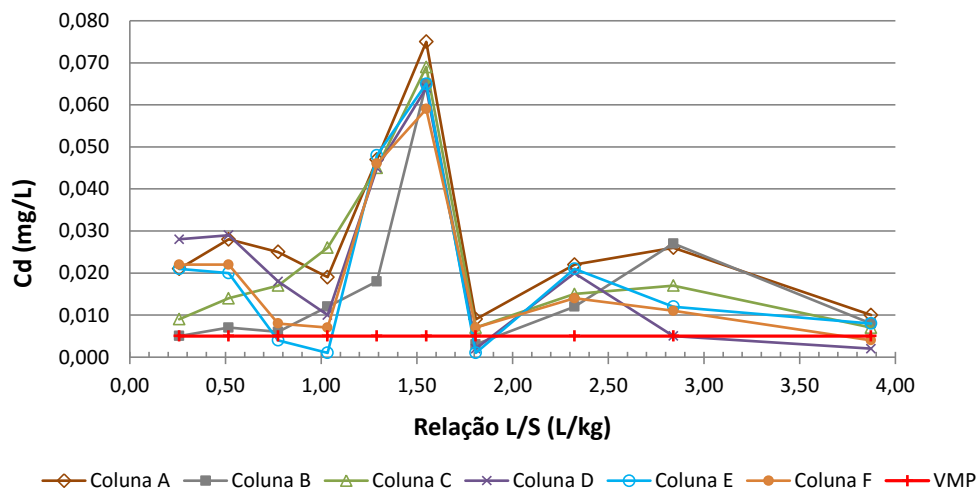


Figura 7 – Valores obtidos de cádmio (Cd) dos lixiviados

Na Figura 8 pode-se observar que a coluna B ficou abaixo do seu branco de laboratório, o que pode indicar que em regime saturado metais como níquel podem sofrer sorção ou precipitação.

Resultados observados quanto aos metais Fe e Cr indicaram que nas colunas em regime não saturado o VMP para consumo humano foi excedido, no entanto as colunas em regime saturado não ultrapassaram o VMP em momento algum do experimento, conforme Figuras 9 e 10. Interferência do experimento podem ter ocorrido, pois no regime saturado o fluxo do líquido lixiviante é ascendente e o reservatório de coleta de percolados fica na parte superior das colunas, já o regime não saturado ocorre o inverso, ou seja, o fluxo é descendente e o reservatório inferior, o que poderia favorecer esse último na coleta dessas formações de precipitados.

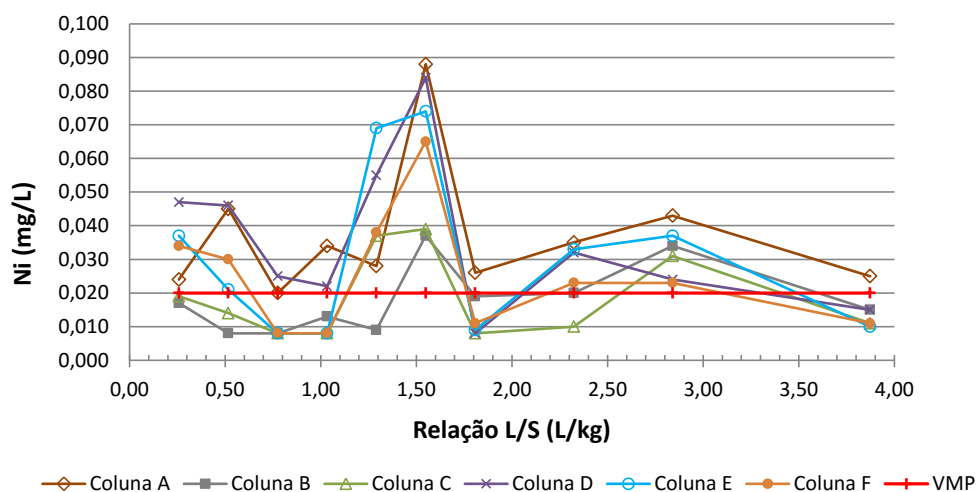


Figura 8 – Valores obtidos de níquel (Ni) dos lixiviados

Concentrações máximas para amostras de ARM quanto ao Ni, Fe e Cr representaram 0,088 mg/L, 0,658 mg/L e 0,017 mg/L, respectivamente. Já amostra de ARC apresentaram concentrações para o Ni, o Fe e o Cr de 0,074 mg/L, 0,300 mg/L, e 0,125 mg/L, respectivamente. Pode-se deduzir que as concentrações de Fe nas amostras de ARM são superiores a obtidas nas amostras de ARC devido ARM conter a presença de Latossolo Vermelho rico em ferro e manganês.

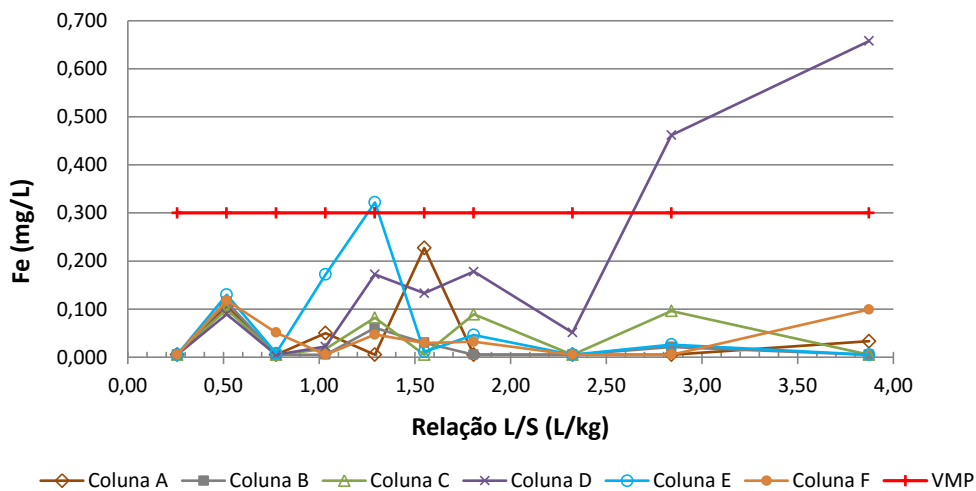


Figura 9 – Valores obtidos de ferro (Fe) dos lixiviados

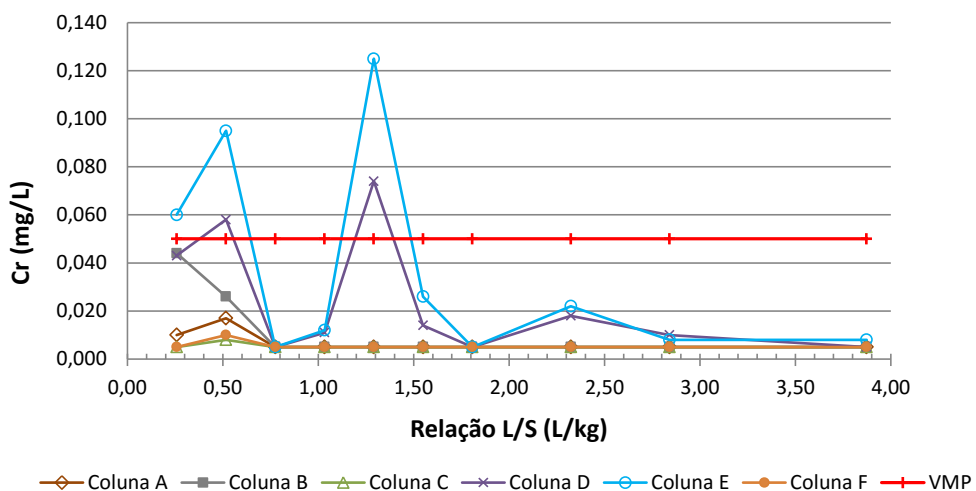


Figura 10 – Valores obtidos de cromo (Cr) dos lixiviados

Para classificação das amostras de agregados de RCC classe A foram seguidos os passos que constam no fluxograma de classificação dos resíduos sólidos existente na NBR 10.004 (ABNT, 2004). As amostras identificadas por números de 1 a 6 correspondem a: 1 (areia fina – ARC), 2 (brita nº1 – ARC), 3 (pedrisco – ARC), 4 (Rachão – ARC), 5 (Bica corrida com menor granulometria – ARM), e 6 (Bica corrida com maior granulometria – ARM).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, pode-se afirmar que essas amostras podem ser classificadas como Classe II – Resíduos Não Perigosos, pois não excederam o limite máximo no extrato lixiviado. De acordo com a Tabela 3 elementos como cádmio, ferro e cromo excederam os valores do limite máximo para extrato solubilizado, o qual consta no

anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Diante disso, é possível classificar as amostras como sendo amostras de resíduo não inerte.

De acordo com as informações apresentadas é possível deduzir que as amostras de agregados de RCC classe A coletadas nesse estudo podem ser classificadas de acordo como a NBR 10.004 (ABNT, 2004) como sendo resíduo não perigoso e não inerte – Classe II A.

Conforme apresentado na Tabela 4, os resultados do ensaio do Método 1312 (USEPA, 1994), que simula a lixiviação causada por águas de chuva levemente ácidas no aterro, apontaram os extratos de lixiviado das amostras de agregados de RCC classe A não excedem aos valores máximos permitidos para consumo humano brasileiro.

Tabela 2 – Resultados analíticos dos extratos lixiviados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a NBR 10.005/2004

Parâmetros	Unidade	Limite de detecção	LME ⁽²⁾	Extratos lixiviados (NBR 10.005/2004)					
				ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARM5	ARM6
pH	-	0-14	-	6,12	7,32	6,00	7,04	7,69	6,49
Temperatura	°C	0,1	-	26	27	26,5	27	25	27
Zinco	mg/L	0,002	-	0,025	0,245	0,265	3,485	nd	0,248
Chumbo	mg/L	0,010	1,000	0,230	0,070	0,006	0,010	0,150	nd
Cádmio	mg/L	0,006	0,500	0,063	0,074	0,048	0,074	0,050	0,062
Níquel	mg/L	0,008	-	0,155	0,199	0,172	0,179	0,059	0,141
Ferro	mg/L	0,005	-	0,068	0,080	1,596	0,286	nd	0,165
Manganês	mg/L	0,003	-	2,293	1,052	1,953	1,747	0,207	0,431
Cobre	mg/L	0,003	-	0,010	0,131	0,077	0,013	0,018	nd
Cromo	mg/L	0,005	5,000	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Prata	mg/L	0,001	5,000	0,032	nd	nd	0,025	0,024	0,022

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ LME -Limite máximo no extrato definido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) “Resíduos Sólidos – Classificação” baseado no Anexo F

Tabela 3 – Resultados analíticos dos extratos solubilizados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a NBR 10.006/2004

Parâmetros	Unidade	Limite de detecção	LME ⁽²⁾	Extratos solubilizados (NBR 10.006/2004)					
				ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARM5	ARM6
pH	-	0-14	-	9,67	10,63	10,94	11,11	10,56	10,77
Temperatura	°C	0,1	-	25	25	25	25	25	25
Zinco	mg/L	0,002	5,000	nd ⁽¹⁾	0,360	2,170	0,087	nd	nd
Chumbo	mg/L	0,010	0,010	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cádmio	mg/L	0,006	0,005	nd	0,009	0,029	nd	0,017	nd
Níquel	mg/L	0,008	-	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ferro	mg/L	0,005	0,300	1,235	0,574	2,027	0,320	0,206	1,084
Manganês	mg/L	0,003	0,100	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cobre	mg/L	0,003	2,000	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cromo	mg/L	0,005	0,050	0,077	nd	nd	0,034	nd	0,012
Prata	mg/L	0,001	0,050	nd	nd	nd	nd	nd	nd

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ LME -Limite máximo no extrato definido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) “Resíduos Sólidos – Classificação” baseado no Anexo G

Tabela 4 – Resultados analíticos dos extratos lixiviados das amostras de agregados de RCC classe A, de acordo com a SW-846 Método 1312 - SPLP

Parâmetros	Unidade	Limite de detecção	VMP ⁽²⁾	Extratos lixiviados (SW-846 Método 1312 - SPLP)					
				ARC1	ARC2	ARC3	ARC4	ARM5	ARM6
pH	-	0-14	-	10,32	10,66	10,98	10,63	11,53	11,43
Temperatura	°C	0,1	-	25	25	24,5	25	23,5	23,5
Zinco	mg/L	0,002	5,000	1,339	nd	0,030	0,003	0,048	0,022
Chumbo	mg/L	0,010	0,010	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Cádmio	mg/L	0,006	0,005	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Níquel	mg/L	0,008	0,020	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ferro	mg/L	0,005	0,300	0,200	0,194	0,103	0,061	0,149	0,085
Manganês	mg/L	0,003	0,100	0,002	nd	nd	0,000	0,000	0,000
Cobre	mg/L	0,003	2,000	0,010	0,003	0,003	0,003	0,010	nd
Cromo	mg/L	0,005	0,050	0,018	0,006	0,014	0,008	0,022	nd
Prata	mg/L	0,001	0,100	0,001	nd	0,000	nd	0,003	0,000

⁽¹⁾ nd – elemento não detectado

⁽²⁾ VMP – Valor máximo permitido para consumo humano pelo Anexo I da Resolução CONAMA nº 396/2008, a qual dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas.

Pode-se observar que tanto para amostras de ARC quanto para amostras de ARM, o ensaio de lixiviação NBR 10.005 (ABNT, 2004) apresentou concentração absoluta superior quando comparado com os demais ensaios, exceto para o cromo e o ferro. Ao compararmos valores absolutos, ou seja, potenciais máximos de liberação desses metais, os ensaios de lixiviação brasileiro demonstrou ser mais restritivo.

Por fim, cabe informar que as concentrações do ensaio de lixiviação da NBR 10.005/2004 superaram os valores de concentração obtidos nas simulações com colunas, exceto para o cromo. Esse ensaio, apesar de não simular as condições reais do aterro, poderia melhor representar as concentrações máximas liberadas por esses resíduos, devido à natureza agressiva do ácido acético.

As concentrações de metais no ensaio de lixiviação da NBR 10.005/2004 para areia quanto ao Zn (0,025 mg/L), Cd (0,063 mg/L), Ni (0,155 mg/L) e Cu (0,010 mg/L) foram inferiores as encontradas para o rachão Zn (3,485 mg/L), Cd (0,074 mg/L), Ni (0,179 mg/L) e Cu (0,013 mg/L). A partir desse estudo pode-se verificar que amostras de ARC possuem tendência a apresentarem maior teor de cimento incorporado quanto maior sua granulometria, favorecendo a liberação de elementos como Zn, Cd, Ni e Cu.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados do estudo realizado, pode-se concluir que:

- No ensaio de solubilização foi possível observar que as amostras de RCC classe A ultrapassaram os valores máximos permitidos para os elementos como, cádmio (0,029 mg/L), ferro (1,235 mg/L), e cromo (0,077 mg/L). Entretanto, os ensaios de lixiviação da NBR 10.005/2004, e do método 1312- SPLP não excederam aos padrões normativos vigentes. Portanto, as amostras de agregados de RCC classe A foram classificadas, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), como sendo resíduos não perigosos e não inertes – Classe II A. Diante dessa constatação, recomenda-se que seja repensada a ideia dos RCC Classe A sejam resíduos inertes, a fim de prevenir possíveis danos ambientais.

- Entretanto, os ensaios de simulação demonstraram que os RCC Classe A sofrem processo de lixiviação quando dispostos em aterros submetidos a condições de chuva levemente ácida. Os lixiviados resultantes desses resíduos apresentaram concentrações de metais pesados como Pb (0,26 mg/L), Cd (0,075 mg/L), Fe (0,658 mg/l), Ni (0,088 mg/L), e Cr (0,125 mg/L) acima do padrão de potabilidade brasileiro, o que poderia apresentar riscos a qualidade das águas subterrâneas quando dispostos esses resíduos em solo;
- Ao compararmos os resultados dos ensaios de lote dos RCC Classe A (solubilização e lixiviação) com os experimentos realizados nas colunas de lixiviação, podemos observar que as concentrações obtidas por meio de ensaios de coluna foram superiores as obtidas nos ensaios de solubilização e lixiviação SPLP. As concentrações do ensaio de lixiviação da NBR 10.005/2004 superaram os valores de concentração obtidos nas simulações com colunas, exceto para o cromo. Esse ensaio, apesar de não simular as condições reais do aterro, poderia melhor representar as concentrações máximas liberadas por esses resíduos, devido à natureza agressiva do ácido acético. No entanto, estudos pormenorizados dessa hipótese são necessários.
- Portanto, recomenda-se a realização de estudos complementares para contribuir para o aprimoramento de procedimentos de projeto, execução, operação e monitoramento ambiental de aterros de RCC, a fim de criar estruturas ou procedimentos de prevenção à poluição por metais pesados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores prestam seus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo financiamento deste projeto, por meio dos processos 2011/50744-0 e 2011/50539-8. Ao Programa de Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento (PPGSHS) pelo apoio institucional. Ao pessoal do NEPER (Núcleo de Estudo e Pesquisa em Resíduos Sólidos) pelo apoio, dicas e incentivo para realização desse estudo.

6. REFERENCIAS

Angulo, S.C., John, V.M. Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/436. São Paulo: EPUSP (2006).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro (2004).

_____. NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).

_____. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).

_____. NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 – Dispõe sobre gestão dos resíduos de construção civil. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF (2002).

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 396 – Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF (2008).

_____. Portaria nº 2914. Padrões de Potabilidade. Ministério da Saúde (2011).

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 448 – Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF (2012).

Ferguson, D. W.; Male, J. W. .The water pollution potential from demolition waste disposal, *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering*, 15:6, 545-559 (1980).

Jang, Y.; Townsend, T.G.. Effect of waste depth on leachate quality from laboratory construction and demolition debris landfill. *Environmental Engineering Science*, nº 20, 183-196 (2003).

Townsend, T.G.; Jang, Y.; Thurn, L.G. Simulation of construction and demolition waste leachate. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 125, nº 11, novembro, 1999.

USEPA. Test Methods for Evaluating Solid Waste. U.S.EPA SW-846, Office of Solid Waste 3rd. Edition, Washington D.C (1994).