

# AVALIAÇÃO DO TEOR DE BENTONITA EM AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Schirlene Chegatti <sup>1</sup>  
Sebastião Roberto Soares <sup>2</sup>  
Mailyn Kafer Gonçalves <sup>3</sup>  
Marcelo Buras <sup>4</sup>  
Rodrigo Moraes da Silveira <sup>5</sup>

## Resumo

Este trabalho objetiva avaliar a relação do teor de bentonita com o coeficiente de condutividade hidráulica (k) de areias descartadas de fundição em ensaios de condutividade hidráulica em um permeâmetro de parede flexível. As amostras ensaiadas possuíam teores de bentonita sódica, natural e ativada, variando entre 4% e 15%. Foi também analisado quimicamente o líquido percolado (alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, fenóis, ferro, fluoreto e manganês, seguindo as normas de ensaios da *Standard Methods 3111 B e D* para a determinação desses componentes em amostras líquidas). A campanha experimental foi complementada com a análise da capacidade de troca catiônica. Os resultados obtidos indicam que os valores de k estão relacionados ao teor de bentonita das areias descartadas de fundição e a percolação decorrente da disposição desses resíduos.

**Palavras-chave:** Areia de fundição; Bentonita; Condutividade hidráulica; Resíduos.

## EVALUATION OF THE BENTONITE CONTENT IN SPENT FOUNDRY SANDS AS A FUNCTION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY COEFFICIENT

### Abstract

This study evaluates the relationship of the bentonite content and hydraulic conductivity coefficient (k) of waste foundry sands in tests of hydraulic conductivity in a flexible wall permeameter. The test samples had concentrations of activated sodium bentonite and natural sodium bentonite between 4% and 15%. It was also analyzed chemically the liquid leachate (aluminum, barium, chromium, cadmium, lead, phenols, iron, fluoride, and manganese, following de standard tests of *Standard Methods 3111 B e D* for the determination of this components in liquid samples). The experiments were supplemented with cation exchange capacity analysis. The results indicate that the values of are is related to the content of bentonite in waste foundry sand and the percolation from this waste disposal.

**Key words:** Foundry sand; Bentonite; Hydraulic conductivity; Wastes.

<sup>1</sup>Química Industrial, Doutoranda em Engenharia Ambiental, Especialista de Gestão Ambiental. Departamento de Gestão do Meio Ambiente, Schulz S.A., Rua Dona Francisca, 6901, Cep 89219-600, Joinville, SC, Brasil. E-mail: schirlene.chegatti@schulz.com.br

<sup>2</sup>Engenheiro Sanitarista, Diretor, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus Universitário, CP 476, Cep 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: soares@ens.com.br

<sup>3</sup>Engenheira Sanitarista e Ambiental, Bolsista de Mestrado, Departamento de Estruturas Civas, Centro Politécnico, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Universidade Federal do Paraná – UFPR, CP 19067, Cep 81531-980, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: mailyngoncalves@lactec.org.br

<sup>4</sup>Engenheiro Civil – Geotécnico, Pesquisador, Departamento de Estruturas Civas, Centro Politécnico, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Universidade Federal do Paraná – UFPR, CP 19067, Cep 81531-980, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: marcelo.buras@lactec.org.br

<sup>5</sup>Engenheiro Civil – Geotécnico, Pesquisador, Departamento de Estruturas Civas, Centro Politécnico, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Universidade Federal do Paraná – UFPR, CP 19067, Cep 81531-980, Curitiba, PR. E-mail: rodrigo.silveira@lactec.org.br

## I INTRODUÇÃO

No Brasil são geradas aproximadamente dois milhões de toneladas por ano de areias descartadas de fundição (ADF), concentradas nas regiões Sul e Sudeste do país.<sup>(1)</sup> A maior parte das ADF, classificada como resíduo classe II-A,<sup>(2)</sup> é disposta em aterros de resíduos industriais.<sup>(3)</sup>

As indústrias de fundição têm buscado diferentes alternativas para a geração e destinação adequada de ADFs, já que a disposição diretamente sobre o solo foi uma prática comum neste segmento durante muito tempo. Dentre as possíveis alternativas encontra-se a reciclagem interna, como acontece, por exemplo, nos processos de regeneração e recuperação das areias utilizadas, reduzindo por consequência o consumo de insumos. Outra forma é a valorização dos resíduos como matéria prima de outros processos ou atividades. Em países como Estados Unidos, Bélgica, Suécia e Itália já é possível encontrar aplicações do resíduo de areia de fundição como insumo em atividades na área de construção civil, pavimentação, compostagem e aterros sanitários. Nos EUA, os esforços para reaproveitar as areias descartadas de fundição e incentivar o seu uso em solos manufaturados e aplicações geotécnicas têm sido apoiado pela agência de proteção ambiental americana.<sup>(4)</sup> Ao mesmo tempo em que crescem os interesses acerca de novos processos de valorização das ADFs, os quais incentivam pesquisas de caracterização e do comportamento geotécnico desse material, aumentam também as necessidades de compreender o seu real impacto ambiental quando disposto diretamente sobre o solo.

As ADFs constituem-se basicamente de uma mistura contendo areia base (em geral sílica), argila e pó de carvão ativado. A bentonita (argila) é um silicato de alumina hidratado (sua composição contém silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, potássio e sódio), formada por lamelas, sendo classificada pelas espessuras das mesmas. O pó de carvão é um aditivo formado por matéria volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre.<sup>(5)</sup>

As areias descartadas de fundição, quando dispostas em um aterro não controlado, estão sujeitas à percolação inadequada, lixiviando ou dissolvendo os constituintes solúveis e possibilitando a contaminação do lençol freático.<sup>(6)</sup> Fatores como a forma e a velocidade com que o poluente se integra ao meio físico também são determinantes na concentração final de elementos químicos em solos naturais.<sup>(7)</sup> Misturas de ADFs, que contêm bentonita em sua composição, podem ser utilizadas como barreira hidráulica de cobertura de aterros sanitários.<sup>(8)</sup> Foram realizados alguns testes na comparação das propriedades de condutividade hidráulica e compacidade da areia de fundição perante uma mistura de argila e areia comumente utilizada em aplicações geotécnicas.<sup>(9)</sup> Os resultados evidenciam que as coberturas executadas com areia de fundição apresentam melhor desempenho do que as coberturas convencionais utilizadas. A percolação dos resíduos também é significativamente mais baixa, considerando sua avaliação durante todas as estações do ano.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como finalidade avaliar o teor de bentonita presente em areias descartadas de fundição em função do coeficiente de condutividade hidráulica. Para isto, o programa experimental consistiu na realização de ensaio de condutividade hidráulica. Após a realização dos ensaios procederam-se coletas de amostras de líquido percolado pelos corpos de prova ensaiados para a realização de ensaios de análise de elementos químicos presentes. Os elementos químicos analisados foram: alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, fenóis, ferro, fluoreto e manganês. O estudo foi complementado com a análise da capacidade de troca catiônica (CTC) da ADF, realizada por meio de cálculos envolvendo a soma dos cátions trocáveis (Ca, Mg, K, Al) mais a acidez da ADF (H+Al).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição das areias descartadas de fundição é determinada pela mistura dos componentes: areia base (contendo sílica), pó de carvão e bentonita. Os insumos de ADF do estudo mantiveram fixas as quantidades de areia base e pó de carvão, no qual o único elemento com variação na composição da mistura foi a bentonita. As amostras de ADFs foram geradas com base nos percentuais mínimo e máximo de bentonita, 4% e 15%, respectivamente, encontrados usualmente em indústrias de fundição.<sup>(10)</sup> A bentonita utilizada foi a do tipo sódica, contemplada nas formas natural e ativada, nos percentuais já citados. O Quadro I apresenta a nomenclatura com o tipo de ADF de cada amostra, identificadas como R1 a R10. As ADFs R1 a R9 constituíam amostras que passaram uma única vez pelo processo de queima da areia na fundição de peças metálicas. A amostra R10 constituía uma amostra de um sistema real de indústrias de fundição, ou seja, que já passou pelo processo de queima inúmeras vezes antes de ser descartada. No processo real, a mistura que volta ao sistema é incorporada a uma nova mistura de areia com bentonita; assim, a ADF possui diferentes teores de queima em sua mistura.

### 2.1 Ensaios de Condutividade Hidráulica (k)

Os ensaios de laboratório para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica das amostras R1 a R10 foram realizados em permeâmetros de parede flexível. Os ensaios foram realizados com corpos de prova moldados a partir de amostras compactadas, com energia normal, visto que as ADF apresentavam bentonita em sua composição. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 7182.<sup>(11)</sup> Quando o fluido analisado em ensaios de permeabilidade é a água, a permeabilidade do material pode ter a denominação de coeficiente de condutividade hidráulica. Assim, neste artigo, os parâmetros permeabilidade e condutividade hidráulica têm a mesma conotação.

**Quadro I.** Nomenclaturas das amostras ensaiadas

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
8% Bentonita Natural (BN)	15% Bentonita Natural (BN)	4% Bentonita Natural (BN)	4% Bentonita Ativada (BA)	8% Bentonita Ativada (BA)	15% Bentonita Ativada (BA)	4% Bentonita Ativada (BA) + 4% Natural (BN)	4% Bentonita Ativada (BA) + 8% Natural (BN)	8% Bentonita Ativada (BA) + 4% Natural (BN)	3,25% Bentonita Ativada (BA) + 3,25% Natural (BN)

Os ensaios foram realizados em dois laboratórios distintos. O primeiro ensaio foi executado no Laboratório de Solos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e o segundo, no Laboratório de Solos do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec). Para a realização dos ensaios mencionados foram seguidos os procedimentos e recomendações da Norma ASTM D5084:2003.<sup>(12)</sup>

Os procedimentos dos ensaios realizados nos diferentes laboratórios citados foram os mesmos embora as dimensões dos corpos de prova ensaiados tenham sido diferentes. Ambos os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico; contudo, na EPUSP, as suas dimensões eram de 3 cm de diâmetro e 9 cm de altura. No Lactec, o diâmetro e a altura dos corpos de prova eram de 5 cm. Para os ensaios de condutividade hidráulica realizados após a saturação por contrapressão, foi utilizado o procedimento onde, após a saturação por contrapressão, era aplicado o gradiente hidráulico necessário para as medições do coeficiente de condutividade hidráulica (contrapressão de 10 kPa de diferença entre a base e o topo do corpo de prova). Era verificada a condição de fluxo permanente pela medição nas buretas graduadas do equipamento com precisão 2 mL do volume de água que entrava no corpo de prova e do volume de água que saía do mesmo. Quando esses volumes se equiparavam, a condição de fluxo era considerada permanente. Após essas verificações, eram realizadas as medições da vazão nas buretas conectadas na base e no topo do corpo de prova. As medidas consistiam na tomada de tempo a cada 2 cm<sup>3</sup> de água infiltrada, até fossem percolados que cerca de 32 cm<sup>3</sup>. Os ensaios de condutividade hidráulica realizados foram tratados como ensaios de modalidade carga constante. A variação no nível de água do reservatório foi desprezada, devido à necessidade de um grande volume infiltrado para haver variação significativa em seu nível. O coeficiente de condutividade hidráulica foi calculado utilizando a lei de Darcy para o fluxo de água em solos (Equação 1):

$$k = \frac{Q}{A \cdot i} = \frac{Q}{A \cdot \frac{\Delta H}{L}} \text{ (cm/s)} \quad (1)$$

onde:  $k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica;  $Q$  é a vazão;  $A$  é a área média da seção transversal do corpo de prova e  $i$  é o gradiente hidráulico.  $\Delta H$  é a carga hidráulica e  $L$  é a altura do corpo de prova.

Os coeficientes de condutividade hidráulica, calculados a partir da Equação 1, foram corrigidos em função da condutividade hidráulica do sistema no qual o ensaio foi realizado. As correções foram feitas a partir da Equação 2.<sup>(12)</sup> Também foi realizada a correção dos valores do coeficiente de condutividade hidráulica em função da temperatura da água percolada durante a realização dos ensaios, que eram de 23°C e 24°C (Equação 2):

$$k_w = \frac{H_s}{\frac{H}{k} - \left( \frac{H_t}{k_t} + \frac{H_b}{k_b} \right)} \text{ (cm/s)} \quad (2)$$

onde:  $k_w$  é o coeficiente de condutividade hidráulica corrigido;  $H_s$  é a altura da amostra;  $H$  é a altura total da amostra mais discos porosos e papel filtro;  $k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica medido (sem correção);  $H_t$  e  $H_b$  são as espessuras das pedras porosas do topo e da base, respectivamente;  $k_t$  e  $k_b$  são os coeficientes de condutividade hidráulica das pedras porosas do topo e da base, respectivamente.

Os valores dos coeficientes de condutividade hidráulica dos sistemas (equipamento triaxial e permeâmetro de parede flexível com coluna de mercúrio) foram calculados considerando a soma das alturas das duas pedras porosas mais os papéis filtro (0,84 cm) e a soma das duas telas do ensaio com coluna de mercúrio (0,21 cm) com resultados de  $3,71 \times 10^{-4}$  cm/s e  $3,17 \times 10^{-3}$  cm/s, respectivamente.

## 2.2 Análise Química dos Percolados das Amostras de ADF

Os ensaios de laboratório referentes à análise química dos percolados foram realizados no Laboratório Acquaplant Soluções Ambientais. Ao chegarem ao laboratório, as amostras de percolado tiveram o pH medido com um pHmetro digital.<sup>(13)</sup> Os parâmetros químicos alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, ferro, fluoreto, manganês e fenóis foram selecionados para análise com base em estudos efetuados anteriormente<sup>(14)</sup> que contemplam o ciclo de vida da areia descartada de fundição como relevantes para caracterização. Os metais alumínio, bário, cromo, cádmio, chumbo, ferro, manganês foram medidos pelo método de absorção atômica. Para os metais alumínio e bário utilizou-se o método: *Standard Methods 3111 D* (Método Direto – Chama – Óxido Nitroso – Acetileno). Para o restante dos metais - cromo, cádmio, chumbo, ferro e manganês - foram medidos pelo método: *Standard Methods 3111 B* (Método Direto Chama – Ar – Acetileno). A análise de concentração de fluoretos foi realizada com cromatógrafo de íons, que apresenta os valores com base na leitura da altura de pico do analito fluoreto. Os fenóis foram determinados pelo método da colorimetria, com detecção de 0,025 a 5 mg/L. Antes de iniciar a análise colorimétrica, a amostra passou por procedimentos de destilação, a fim de que não houvesse interferência nos resultados.<sup>(15)</sup>

## 2.3 Análise da Capacidade de Troca de Cátions em ADF

A análise da capacidade de troca de cátions em amostras de ADF foi realizada segundo os métodos anteriormente estudados.<sup>(16)</sup> A determinação de cálcio, magnésio, potássio trocáveis do solo foi realizada através extração dos elementos trocáveis com solução normal de acetato de amônio em pH 7,0 e determinação dos seus teores no extrato em espectrofotômetro de absorção atômica, fotômetro de chama e agitador mecânico. O pH foi determinado pelo método de CaCl em potenciômetro. A acidez trocável compreende aquela causada pela hidrólise do alumínio em solução e pelo íon hidrogênio trocável. Nesse ensaio o  $Al^{3+}$  foi determinado por meio de uma solução de sal neutro (KCl 1N), baseado no princípio que, em concentrações relativamente altas, o potássio desloca principalmente íons alumínio do solo para a solução, os quais se hidrolisam liberando íons hidrogênio que podem ser titulados com uma base. A acidez potencial (representada por  $H + Al$ ) revela a acidez total presente entre os níveis inicial e final do pH da amostra. Foi empregado o método de extração com acetato de cálcio que tem como princípio a extração da acidez com solução tamponada e titulação alcalina do extrato. A soma de bases (SB) foi obtida pela soma dos valores dos cátions trocáveis Ca, Mg e K. A capacidade de troca de cátions

foi obtida pela soma das bases com a acidez potencial. A saturação das bases, V (%), foi calculada pela relação entre a soma de bases e a capacidade de troca de cátions, sendo  $V (\%) = (100 \times SB) / CTC$ . A determinação dos sólidos (%p/p) foi realizada por gravimetria segundo o método SMWW 2540B.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito no item Material e Métodos, foram utilizadas neste estudo dez amostras de ADF, entre as quais apenas uma amostra se referia a um sistema convencional de indústria de fundição. Os resultados são apresentados e discutidos nos itens 3.1 a 3.3.

### 3.1 Coeficiente de Condutividade Hidráulica

Conforme já mencionado, nos ensaios realizados foram utilizados corpos de prova moldados no teor umidade ótima a partir de ensaios de compactação – energia normal. A umidade ótima representa o teor de umidade em que se conduz o corpo de prova a uma massa específica seca máxima, ou uma densidade seca máxima.

Os corpos de prova moldados apresentam os índices de vazios apresentados na Tabela 1.

O coeficiente de condutividade hidráulica (k) das amostras de ADF apresenta grandezas da ordem de  $10^{-4}$  cm/s a  $10^{-9}$  cm/s, relacionados na Tabela 2. As amostras com teor de bentonita acima de 6,5%, por possuírem um coeficiente de condutividade hidráulica menor, com o  $k_{médio}$  igual ou abaixo de  $10^{-6}$  cm/s, podem ser enquadradas nos padrões de utilização para coberturas de aterros industriais classe II. Os aterros industriais não possuem obrigatoriedade de utilização da camada de impermeabilização para cobertura de aterros; contudo, caso exista essa camada, ela deverá ser constituída de manta plástica ou argila de boa qualidade, com um valor de k igual ou menor que  $10^{-6}$  cm/s e espessura maior que 50 cm.<sup>(17)</sup> A amostra de ADF com 4% de teor de bentonita ativada pode ser enquadrada nos mesmos padrões.

**Tabela 1.** Índice de vazios das amostras

Amostra	% de Bentonita	Índice de vazios e (%)
R3	4% BN	0,57
R4	4% BA	0,63
R10	3,25 % BA + 3,25% BN	0,44
R1	8% BN	0,53
R5	8% BA	0,57
R7	4% BA + 4% BN	0,49
R8	4% BA + 8% BN	0,53
R9	8% BA + 4% BN	0,49
R2	15% BN	0,54
R6	15% BA	0,61

A Tabela 2 apresenta os resultados de condutividade hidráulica obtidos nos ensaios realizados nos laboratórios da EPUSP e LACTEC.

A partir dos dados da Tabela 2 verifica-se que o teor de bentonita influencia a condutividade hidráulica do material. Conforme esperado, nota-se que há uma tendência, com os dados apresentados, de valores de condutividade hidráulica menores para teores de bentonita mais elevados.

### 3.2 Percolado

O percolado coletado para análises químicas foi obtido após os ensaios de condutividade hidráulica. O volume de percolado coletado equivalia a 500 mL. Nessas condições, foi possível coletar o percolado e avaliar apenas seis amostras das dez disponíveis. O tempo necessário para a percolação das demais amostras foi muito elevado, não sendo possível obter a quantidade mínima necessária, tendo em vista o alto teor de bentonita das amostras R2, R6, R8 e R9. Pode-se afirmar que o aumento do teor de bentonita nas diferentes amostras de ADF influencia a impermeabilização das amostras. A Tabela 3 apresenta as médias da concentração dos elementos químicos presentes no percolado analisado em laboratório. Deve-se levar em consideração que a comparação entre as amostras não é

linear ao relacionar a amostra R10, visto que esta possui uma maior quantidade de passagens pelo processo de fundição, apresentando maior interferência.

### 3.3 Capacidade de Troca de Cátions (CTC)

Quanto maior a CTC de um solo mais nutrientes recebidos de adubações ele consegue reter contra a lixiviação imposta pelo clima tropical.<sup>(18)</sup> A CTC pode ser expressa como “CTC total” quando considerar todos os cátions permutáveis do solo ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ). O  $\text{H}^+$  só é retirado da superfície de adsorção por reação direta com hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) originando água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). A soma de bases trocáveis (SB) de uma argila representa a soma dos teores de cátions permutáveis, exceto  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  ( $\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ ). Denomina-se saturação por bases – V % - a soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions:  $V(\%) = (100 \times \text{SB}) / \text{CTC}$ . Apesar dos baixos valores de CTC encontrados nas amostras relativos aos valores de literatura<sup>(19,20)</sup> é possível verificar a influência do aumento da concentração de bentonita nas amostras apontados na Tabela 4. A análise de CTC mostra que o mesmo aumenta proporcionalmente com o aumento dos cátions de K, Ca e Mg. Os valores apresentados, segundo a soma das bases e saturação das bases, também confirma essa proporção visto que esta influência não foi verificada para Al e H+Al.

Quando o cálcio ou magnésio for o cátion trocável a película adsorvida na superfície da argila é de água muito rígida, com elevado grau de orientação ou cristalinidade; portanto a água pode exercer uma forte ligação em pequenas quantidades de água.<sup>(19)</sup> Nas montmorilonitas (bentonitas) o efeito do cálcio ou magnésio em comparação com o sódio para formar a películas de água rígida é o mesmo aumentando o limite de plasticidade. Contudo, este efeito pode ser compensado pelo cátion cálcio hidratado podendo causar uma redução deste limite e diminuição da área específica para a água livre agir como lubrificante, considerando a característica de inchamento existente das bentonitas, impossibilitando a passagem de água e influenciando a condutividade hidráulica.

**Tabela 2.** Resultados dos coeficientes de condutividade hidráulica

Amostra	% Bentonita	k (cm/s) EPUSP	k (cm/s) LACTEC
R3	4	-	1,31E-04
R4	4	7,31E-06	1,32E-07
R10	6,5	1,40E-05	2,30E-07
R1	8	4,26E-07	3,25E-07
R5	8	6,40E-08	1,01E-07
R7	8	2,54E-07	1,56E-07
R8	12	1,24E-08	1,88E-07
R9	12	1,19E-08	4,99E-08
R2	15	6,72E-09	1,52E-08
R6	15	>1,00E-09	1,15E-08

**Tabela 3.** Concentração dos elementos químicos presentes nos percolados.

Parâmetros (mg/L)	R3	R4	R1	R5	R7	R10
% Bentonita	4,0	4,0	8,0	8,0	8,0	6,5
Alumínio	18,88	14,30	18,81	9,03	3,37	15,20
Bário	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,957
Cádmio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Chumbo	<0,01	<0,01	0,15	0,31	<0,01	0,26
Cromo total	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030	<0,030
Fenóis totais	0,11	0,054	0,06	0,26	0,147	0,150
Ferro total	15,152	15,179	26,318	7,015	3,81	31,47
Fluoretos	0,061	<0,100	0,095	0,029	0,123	<1,000
Manganês	0,610	0,068	0,430	0,600	<0,005	0,492

**Tabela 4.** CTC – Capacidade de Troca Catiônica de ADFs

Parâmetros (Unidade)	Resultados analíticos por amostra									
	R3	R4	R1	R5	R7	R8	R9	R2	R6	R10
(% p/p)	99	98,8	98,5	98,7	98,4	97,6	97,8	97,8	97,3	98,7
pH em CaCl <sub>2</sub>	5,7	7,1	6,3	7,8	7,8	7,6	8,1	6,2	8,4	7,5
K (mmol/dm <sup>3</sup> )	0,5	0,6	0,8	0,6	0,8	1	1	10	0,8	2,5
Ca (mmol/dm <sup>3</sup> )	20	18	34	18	28	45	31	46	25	30
Mg (mmol/dm <sup>3</sup> )	7	8	9	8	11	15	11	13	12	7
H+Al (mmol/dm <sup>3</sup> )	10	8	10	8	8	9	8	11	8	8
Al (mmol/dm <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SB (mmol/dm <sup>3</sup> )	28	27	44	27	40	61	43	60	38	40
CTC (mmol/dm <sup>3</sup> )	38	35	54	35	48	70	51	71	46	48
(V %)	73	77	81	77	83	87	84	85	83	83

Os íons bivalentes (cátions Ca e Mg) correlacionam-se com a condutividade hidráulica, enquanto que a disponibilidade de sódio é associada a fenômenos de dispersão ou expansão das amostras estudadas.<sup>(21)</sup>

O aumento da CTC também cresce com o aumento do pH resultante do aumento de superfície específica causada pelo aumento da concentração de bentonita na amostra. Esse aumento torna-se interessante neste caso onde o aumento do pH com a CTC indicam alta capacidade de retenção de metais.<sup>(22)</sup>

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho permitem analisar a influência do teor de bentonita como agente de impermeabilização e limitação da geração de percolados de ADFs em função do coeficiente de condutividade hidráulica. Os resultados da quantidade e qualidade do percolado, capacidade de troca catiônica mostram que existe relação entre a permeabilidade e a formação de percolado visto que, à medida que há aumento da bentonita nas ADFs, há uma redução na sua condutividade hidráulica.

Menores valores de condutividade hidráulica em ADF são benéficos face a sua disposição em solo poder gerar menor quantidade de percolado e reduzir o carreamento de metais ou outros elementos presentes nos resíduos.

Assim, o monitoramento de águas subterrâneas em áreas de disposição de ADF pode servir como meio de controle do risco juntamente com a condutividade hidráulica do material disposto. O mesmo pode ser dito quanto há intenção de uso da ADF em aplicações geotécnicas, monitorando o comportamento e conhecendo sua composição para o controle das propriedades mecânicas do resíduo para favorecer seu uso. Complementando, os dados obtidos neste estudo permitem também definir parâmetros e métodos aplicáveis para execução de centrais de processamento, armazenamento e destinação final de ADF<sup>(23)</sup>.

#### Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem o apoio financeiro da empresa Schulz e do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Agradecem ainda à EPUSP pela disponibilidade de sua infraestrutura laboratorial para o desenvolvimento de parte do programa experimental.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Fundição. Guia Abifa de fundição: anuário 2010. 21. ed. São Paulo; 2010.
- 2 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: Classificação dos resíduos sólidos. Rio de Janeiro; 2004.
- 3 Silva TC. Comparativo entre os regulamentos existentes para reutilização de resíduos de fundição [conclusão de curso]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; is, 2007.
- 4 Dungan RS, Huwe J, Chaney R L. Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in spent foundry sands. *Chemosphere*, 2009; 1232-1235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.080>
- 5 Costa O, Gião D. Tecnologia de fundição em areia verde [conclusão de curso]. Porto: Universidade do Porto; 2001.
- 6 Boyle W; Ham R. Research reveals characteristics of ferrous foundry wastes. *Modern Casting*. 1990: 37-41.
- 7 Chegatti S. Análise do processo produtivo de uma fundição visando detectar diferentes pontos geradores de resíduos para reciclagem [conclusão de curso]. 1999. Joinville: Universidade da Região de Joinville; 1999.
- 8 Walden WC. Alternate use of sand. TECHNICON LLC McClellan: 2003, p.6. 2003. (Technical report)

- 9 Abichou T, Benson CH, Edil TB, Freber BW. Using waste foundry sand for hydraulic barriers: recycled materials in geotechnical applications. In: Proceedings of GeoCongress; Boston; 1998. Wisconsin: University of Wisconsin; 1998; 86-98.
- 10 American Foundrymen Society. Foundry sand beneficial reuse manual. Atlanta: Department of Commerce and Community Affairs; 1996. (Special report).
- 11 Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7.182: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro; 1986.
- 12 American Society For Tests And Materials. ASTM D5084: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. Philadelphia, 2003.
- 13 Samingan AS, Leong EC, Rahardjo H. A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils. Canadian Geotechnical J. 2003; n° 40:559-574. <http://dx.doi.org/10.1139/t03-015>
- 14 Gonçalves MK. Estudo da relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e a percolação de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita em sua composição [conclusão de curso]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2011.
- 15 Florido C. Estudo das características da areia descartada de fundição da matéria prima ao produto final [conclusão de curso]. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2007.
- 16 Camargo AO, Moniz AC, Jorge JA, Valadares JMAS. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: Instituto Agrônomo; 2009. (Boletim técnico 106).
- 17 Instituto Brasileiro De Administração Municipal. Gestão integrada de resíduos sólidos: manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. 15. ed. Rio de Janeiro; 2001.
- 18 Ronquim CC. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: Embrapa; 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).
- 19 Santos PS. Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher; 1975.
- 20 Grim RE. Applied clay mineralogy. New York: McGraw-Hill; 1962.
- 21 Gloaguen RABG. Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado nas propriedades físico-hídricas de um latossolo [tese de doutorado]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2005.
- 22 Young RN, Mohamed AMO; Warkenting BP. Principles of contaminant transport in soils. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- 23 Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15.984: Areias descartadas de fundição: central de processamento, armazenamento e destinação. Rio de Janeiro; 2011.

Recebido em: 03/10/12

Aceito em: 21/04/2013