

# ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE MISTURA ZEÓLITA-BENTONITA PARA CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO

ANALYSIS OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF ZEOLITE-BENTONITE  
MIXTURES TO BE USED AS LANDFILL LINERS

LIGIA ABREU MARTINS

Mestranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do  
Espírito Santo. E-mail [ligiaabreumartins@gmail.com](mailto:ligiaabreumartins@gmail.com)

YAGO GUIDINI DA CUNHA

Graduando, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal  
do Espírito Santo. E-mail [yagoguidinic@gmail.com](mailto:yagoguidinic@gmail.com)

KARLA MARIA WINGLER REBELO

Professora Dr<sup>a</sup>. Efetivo, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal  
do Espírito Santo. E-mail [kmwingler@gmail.com](mailto:kmwingler@gmail.com)

## RESUMO ABSTRAC

A produção crescente de resíduos sólidos aliada à falta de tratamento ou disposição insatisfatórias desses resíduos vem causando problemas ambientais. A fim de evitar grandes impactos em caso de vazamentos da camada impermeabilizante a zeólita, material adsorptivo muito utilizado em barreiras reativas, seria uma opção para utilização em aterros sanitários devido à sua alta Capacidade de Troca Catiônica, removendo assim, metais pesados do meio. Devido sua característica arenosa, para utilização em camadas impermeabilizantes, a adição de bentonita seria uma alternativa para melhorar seu comportamento hidráulico. Esta pesquisa consiste na caracterização e estudo da condutividade hidráulica (k) de camadas compactadas de misturas Zeólita (Z)-Bentonita (B) (Z/B) nas proporções de 3%, 5% e 7% em peso seco de bentonita. A adição de bentonita reduziu a condutividade hidráulica da zeólita. Os resultados indicam que a adição de 3% de bentonita atinge permeabilidade de  $3.8 \times 10^{-7}$  cm/s, abaixo do prescrito para projeto de aterros sanitários.

**Palavras-chave:** aterro sanitário; camada impermeabilizante; zeólita; bentonita.

The increasing production of solid waste, combined with the lack of treatment or unsatisfactory disposal of these wastes, has caused environmental problems. To avoid major environmental impacts and to minimize the risk of contamination for soil and groundwater under waste containment systems, zeolite, minerals used as adsorptive material in permeable reactive barriers for remediation of groundwater contaminated by heavy metals, can be used as alternative material in constructions of landfill bottom liners. However, granular zeolite doesn't satisfy the required engineering properties, in that sense bentonite addition is a potential alternative to improve the hydraulic performance. The research consisted of the characterization and hydraulic conductivity (k) of Zeolite (Z) - Bentonite (B) (Z/B) prepared in the ratio of 3%, 5% and 7% in terms of dry weight. The bentonite addition considerably reduced k of soil sample. For instance, the addition of 3% resulted of  $3.8 \times 10^{-7}$  cm/s.

**Keywords:** sanitary landfills; impermeable barriers; zeolite; bentonite.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos aliada a falta de tratamento ou disposição final insatisfatórias desses resíduos vem causando problemas de âmbito ambiental, sanitário e social, dentre eles proliferação de doenças, contaminação do solo e lençóis subterrâneos, poluição pelo gás metano e pelo lixiviado e quando os lixões são a céu aberto, favorecem a presença de catadores. Em meio a esse problema, algumas medidas vêm sendo tomadas por órgãos governamentais a fim de mitigar tal situação, abrangendo assim, políticas de planejamento que visam soluções técnicas para tornar a disposição de resíduos segura e adequada. Em âmbito nacional e global a construção de aterros sanitários e industriais corresponde à solução econômica e técnica mais viável.

Uma das grandes preocupações na construção de um aterro sanitário é a contaminação do solo e cursos d'água nas proximidades do aterro pelo lixiviado, para isso tem-se lançado mão de barreiras impermeabilizantes de fundo (base) utilizadas na fundação do aterro. Para tal, a Norma Brasileira (NBR) 13896/97 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação, considera desejável a existência no local de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-7}$  cm/s.

Usualmente, as barreiras impermeabilizantes de fundo são constituídas por solos de baixa condutividade hidráulica e, mais recentemente, de materiais geossintéticos impermeabilizantes. Em geral, correspondem aos solos argilosos, solos altamente plásticos, que possuem características de contração e expansão com mudanças de umidade (HEINECK, 2002). Ainda segundo Heineck (2002), o ressecamento e a tendência ao recalque dos solos argilosos podem gerar trincas e fissuras, aumentando a condutividade hidráulica e tornando o meio propício a vazamentos do lixiviado, podendo assim atingir e contaminar solos e lençóis freáticos dos arredores. Diante desta situação, a utilização da zeólita, material muito frequente em barreiras reativas, pode ser uma alternativa para utilização como camada impermeabilizante.

A zeólita tem como função, segundo Oliveira (2011), propiciar a redução da concentração e/ou remoção dos contaminantes a níveis aceitáveis pela legislação vigente. Conforme Monte & Resende (2015), a elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e o alto poder de adsorção habilitam as zeólitas, dentre outros usos, para recuperação de áreas afetadas por contaminação de metais pesados. Resaltado por Durukan et al (2004), zeólitas podem ser sugeridas como material alternativo para camadas impermeabilizantes devido à capacidade de troca catiônica e pelo fato de poderem ser encontradas em larga escala e a custo moderado em várias partes do mundo.

Apesar dos benefícios químicos da utilização da zeólita, a mesma geralmente apresenta-se com granulometria semelhantes a solos arenosos o que afeta conseqüentemente a permeabilidade do meio. No entanto, em situações em que o solo apresenta condutividade hidráulica inadequada para a construção da camada impermeabilizante, tem-se utilizado aditivos visando à melhoria deste comportamento.

Um aditivo comumente utilizado em obras de impermeabilização é a bentonita, uma argila de granulometria muito fina, composta pelos minerais do grupo das motmorilonitas pertencentes ao grupo das esmectitas. Segundo Morandini & Leite (2015), é conhecido que a bentonita pode reduzir consideravelmente a condutividade hidráulica e melhorar a capacidade de adsorção de solos arenosos.

A bentonita adequada para barreiras impermeáveis é a bentonita sódica, devido à sua maior capacidade de absorção de água e conseqüentemente expansibilidade. Ao se expandir esta tem poder de auto cicatrização reduzindo a probabilidade do lixiviado atravessar a camada de base do aterro pelas possíveis fissuras que podem aparecer com o tempo de funcionamento. Segundo Heineck (2002), devido sua característica expansiva, sob condições confinadas, as partículas expandidas da bentonita são forçadas uma contra as outras preenchendo os vazios entre as partículas de solo, formando uma barreira contra a passagem do fluido.

No contexto explicitado, alguns estudos como Lukiantchuki (2007), Camargo (2012) e Morandini e Leite (2015) analisaram o comportamento de mistura de solos locais com adição de

bentonita. Nesse sentido, faz-se necessária a realização de pesquisas em escala laboratorial a fim de analisar a viabilidade do uso de concentrados zeolíticos misturados com adição de percentuais de bentonita em camadas impermeabilizantes, visto que as zeólitas naturais podem se mostrar altamente eficazes na remediação de vazamentos da camada de base do aterro sanitário.

Diante deste cenário, pretende-se investigar o comportamento hidráulico de misturas zeólita-bentonita, nas proporções de 3%, 5% e 7% em massa de aditivo, por meio de ensaios de caracterização e condutividade hidráulica para utilização como barreiras impermeabilizantes. Cabe ressaltar que esta abordagem é de grande importância dentro de um projeto de aterros, pois compreende aspectos que afetam a eficiência e desempenho do sistema de impermeabilização, comprometendo a integridade da obra como um todo. Neste projeto de pesquisa não será analisada a viabilidade econômica visto que isto dependeria da presença desse solo na área do aterro, o que varia de região para região.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

A zeólita utilizada é do tipo natural clinoptilolita e foi doada pela empresa "Celta Brasil". Por meio da análise de trabalhos anteriores, solicitou-se 25 kg do material com diâmetro igual ou inferior a 0,045 mm e 75 kg com diâmetro de 0,4 a 1 mm. As amostras são provenientes da cidade de Cotia - SP, sendo que foram coletadas pela própria empresa, acondicionadas em sacos e transportadas até o laboratório de mecânica dos solos da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Para o estudo, foi realizada uma mistura prévia de todo material recebido com as duas granulometrias, após a mistura inicial o material foi separado por quarteador mecânico em quatro frações e caracterizado antes da adição dos percentuais de aditivo, a fim de analisar a viabilidade da mesma para estudo.

O aditivo utilizado é comercializado pela Bentonisa - Bentonita do Nordeste S.A. e foi classificado como bentonita sódica apresentando,

desta forma, o sódio como cátion interlamelar, com isso, apresenta como característica o inchamento quando em presença de água, benéfico à estrutura das camadas impermeabilizantes.

Segundo Heineck (2002), uma bentonita sódica de média qualidade tem um Limite de Liquidez entre 300 e 500% e uma de alta qualidade entre 500 a 700%. Com isso a bentonita foi classificada como de qualidade média devido ao Limite de Liquidez apresentado de 378,12%.

Foram utilizadas misturas de zeólita-bentonita com teores previamente estabelecidos, a partir de análises de estudos anteriores de melhoramento de solos locais-bentonita, de 3%, 5% e 7% de aditivo. Para isso o solo foi previamente homogeneizado antes da adição de bentonita.

Os percentuais foram calculados sobre o valor de massa seca dos materiais. Após o cálculo da quantidade em massa de aditivo a ser adicionada para obtenção das proporções desejadas, a bentonita foi adicionada à zeólita e homogeneizada em lona. Para uma melhor homogeneização, devido à finura do aditivo, o procedimento foi repetido durante três dias consecutivos. As misturas já finalizadas foram quarteadas e separadas em sacos plásticos para os ensaios.

### 2.2 Métodos

Para o desenvolvimento desta pesquisa experimental, a realização dos ensaios foram divididas em duas etapas. A primeira englobou os ensaios de caracterização física e química do material e a segunda constituiu-se dos ensaios de condutividade hidráulica.

#### 2.2.1 Caracterização das amostras

A caracterização física da zeólita pura e das misturas zeólita-bentonita, nas proporções de adição de 3%, 5% e 7% de aditivo, foi realizada por meio de ensaios previstos na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), dentre eles, granulometria (NBR 7181/16), massa específica dos grãos pelo método da aplicação de vácuo (NBR 6458/16), Limite de Liquidez (NBR 6459/16), Limite de Plasticidade (NBR 7180/16) e ensaios de compactação com energia do Proctor Normal (NBR 7182/16) com reuso.

A caracterização química das amostras de zeólita pura quanto da bentonita foi realizada pela empresa IBRA, localizada em Jardim Nova Veneza Sumaré - SP. Para a análise foram separadas aproximadamente 200g de cada material, acondicionados em sacos plásticos e enviados ao laboratório da empresa. Foram realizados os seguintes ensaios: pH em  $\text{CaCl}_2$  e pelo método SMP, capacidade de troca catiônica, saturação de bases H+Al, macronutrientes e micronutrientes pelo extrator Mehlich. Os resultados foram recebidos após sete dias do recebimento das amostras.

Para a caracterização física da bentonita, devido sua característica expansiva e seu poder adsorptivo em que foi verificada a não hidratação total em um período de 24 horas, foram realizadas algumas modificações nos procedimentos normativos para a realização dos ensaios de granulometria e massa específica. Para o ensaio de granulometria, a amostra ensaiada foi reduzida de 70g para 25g e o material, para sua completa hidratação, ficou 7 dias em solução de 125 ml de hexametáfostato de sódio e água destilada. Para o ensaio de massa específica, a amostra ensaiada foi reduzida de 50g para 15g e para a completa hidratação, o material foi deixado em repouso por 7 dias em água destilada. Os demais ensaios realizados, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, seguiram as diretrizes das normas NBR 6459/16 e NBR 7180/16, respectivamente.

### 2.2.2 Ensaios de condutividade hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em permeâmetro de parede flexível, e o método de ensaio foi executado conforme a norma americana ASTM D5084 - 10 Método A - Carga constante. Previamente, os corpos de prova foram compactados em cilindros com 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura, com energia do Proctor Normal utilizando compactador mecânico e umidade próxima à umidade ótima obtida nos ensaios de compactação. Foram considerados aceitáveis os corpos de prova com grau de compactação maior que 95% e com variação de

umidade inferior a 1%. Após a compactação, os mesmos foram moldados para atingir dimensões de  $10 \pm 0,1$  cm de diâmetro e  $5 \pm 1$  cm de altura. A redução da altura foi justificada a fim de se reduzir o tempo de ensaio, devido ao tempo de percolação do ensaio estar diretamente relacionado com a espessura da amostra.

A montagem do ensaio foi processada na seguinte sequência: sobre a base do equipamento foram colocados centralizados uma pedra porosa saturada, papel filtro, o corpo de prova a ser ensaiado, outro papel filtro e outra pedra porosa. Por fim, para envolver o corpo de prova e evitar fluxo lateral, foi realizado o revestimento do conjunto com uma membrana flexível de látex. O corpo de prova, após toda essa sequência, está ilustrado na Figura 1.

Para a execução do ensaio, a saturação foi realizada por percolação e a saturação foi considerada completa após a passagem de um volume de água de três a cinco vezes o volume de vazios do corpo de prova, seguindo orientação da própria norma. Esses valores foram adotados, visto que, não foi possível a verificação da saturação pelo parâmetro B de Skempton por limitação da aparelhagem na medida da variação da pressão neutra. Após a finalização do ensaio, a umidade final do material foi medida e a saturação foi confirmada por meio de correlações de índices físicos. Devido às limitações do equipamento e as imprecisões das medidas de saturação, considerou-se satisfatório valores de saturação acima de 95%.

Após o enchimento da câmara do equipamento, foi aplicada uma tensão confinante de 20kPa por um período de 8 horas para a estabilização do corpo de prova. Passando este tempo, a tensão confinante foi aumentada e concomitantemente aplicava-se uma tensão desviadora para a percolação de água. Após a etapa de saturação, as cargas foram mantidas constantes e assim realizaram-se leituras consecutivas do volume de água percolado durante o ensaio. O cálculo da condutividade hidráulica foi realizado por meio da equação de Darcy com um gradiente hidráulico de aproximadamente 20 kPa/cm.



Figura 1. Corpo de prova do ensaio no permeômetro de parede flexível.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma melhor interpretação, foram adotadas as nomenclaturas: Z00; Z03; Z05 e Z07 para designar zeólita pura; mistura com adição de 3% de bentonita; mistura com adição de 5% de bentonita e mistura com adição de 7% de bentonita, respectivamente.

#### 3.1 Caracterização das amostras

Esta etapa inicial tem como objetivo caracterizar a zeólita e suas misturas e prever o comportamento como barreira impermeabilizante. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização.

Tabela 1. Resultado dos ensaios de caracterização.

Síntese dos Resultados	Z00	Z03	Z05	Z07	Bentonita
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,49	-	-	-	3,05
Argila (%)	4,27	4,58	6,86	8,53	77,98
Silte (%)	18,31	19,35	17,60	17,83	20,43
Areia Fina (%)	0,68	1,72	1,96	1,51	1,59
Areia Média (%)	12,35	11,65	12,27	12,97	0,00
Areia Grossa (%)	64,39	62,70	61,31	59,16	0,00
	LL(%)	69	82	95	379
Limite de Consistência	LP(%)	-	20	19	47
	IP(%)	-	51	63	332
Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	SM	SC	SC	SC	CH

Diante de sua caracterização, a zeólita pura foi classificada pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como uma areia siltosa (SM) apresentando um percentual em massa de 77,42% de areia, sendo deste total 64,39% de areia grossa. Analisando o comportamento esperado para um solo com essas características, no que diz respeito à condutividade hidráulica, preve-se que o material puro não é adequado para a construção de barreiras impermeabilizantes.

A bentonita foi classificada como uma argila de alta compressibilidade (CH) com um percentual

em massa de 98,41% de finos, sendo deste 77,98% de argila. Quanto à qualidade, pela análise dos resultados do Limite de Liquidez igual a 379%, o aditivo pode ser considerado como de média qualidade. Pelo SUCS as misturas foram classificadas como areia argilosa (SC), sendo assim, apresentam expectativa de comportamento hidráulico mais adequado para utilização como camada de base de aterro sanitário. As curvas granulométricas comparativas entre os materiais estudados estão apresentadas nas Figuras 2 e 3.

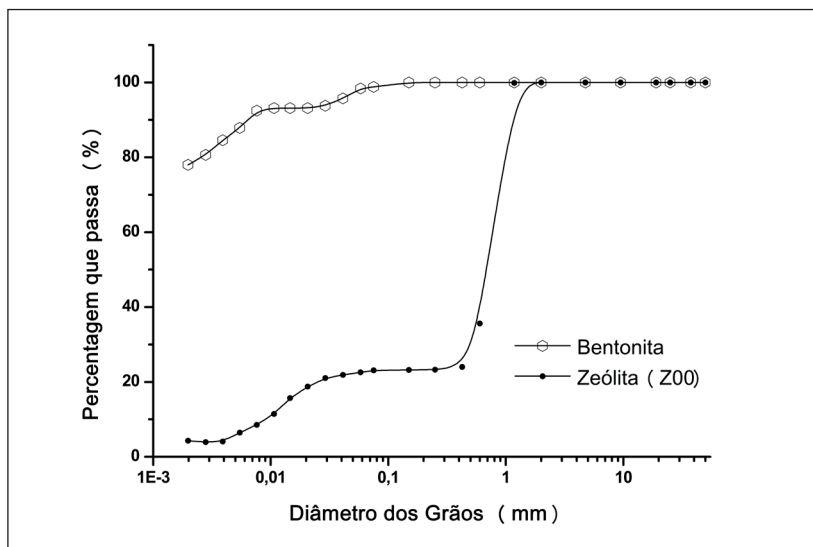


Figura 2. Análise das curvas granulométricas zeólita pura e bentonita.

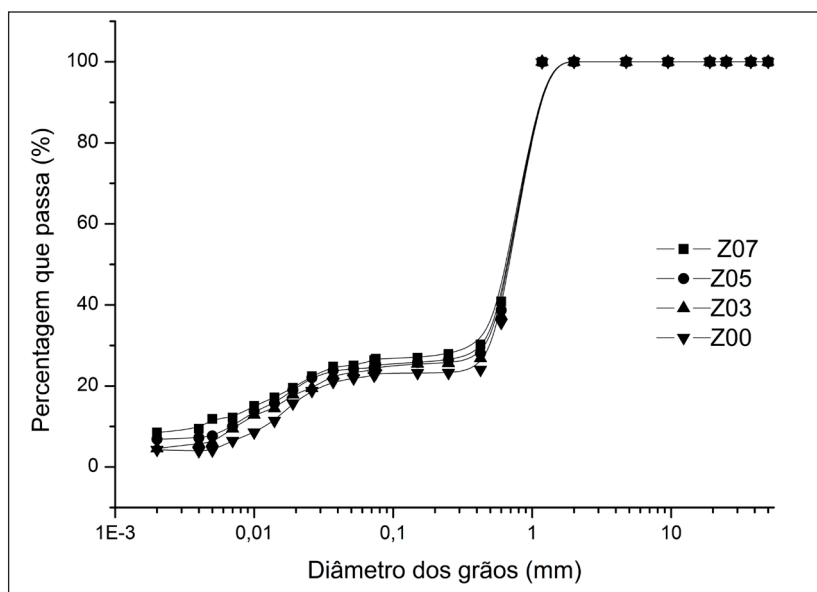


Figura 3. Análise das curvas granulométricas zeólita pura e misturas.

É nítido, na Tabela 1, que o incremento de aditivo nas misturas alterou consideravelmente os limites de Atterberg. No que diz respeito ao Limite de Plasticidade houve um aumento considerável entre a zeólita pura e as misturas; enquanto o material puro apresentou limite de plasticidade nulo, as misturas apresentaram um valor de aproximadamente 18%. No entanto entre as misturas o parâmetro se manteve praticamente constante, o que pode se explicado levando em consideração que a plasticidade do material depende prioritariamente da composição mineralógica a qual independe do percentual do aditivo.

Comparando o Limite de Liquidez, a zeólita pura já apresentava alto valor da propriedade e houve um aumento do fator com a adição de bentonita tanto entre o material puro e as misturas quanto entre as próprias misturas. Quanto ao índice de plasticidade, houve um crescimento linear do parâmetro com o aumento do aditivo, fato esperado pelo aumento de finos ocasionado com a inclusão do aditivo. A Figura 4 apresenta a relação entre o índice de plasticidade e o aumento de bentonita.

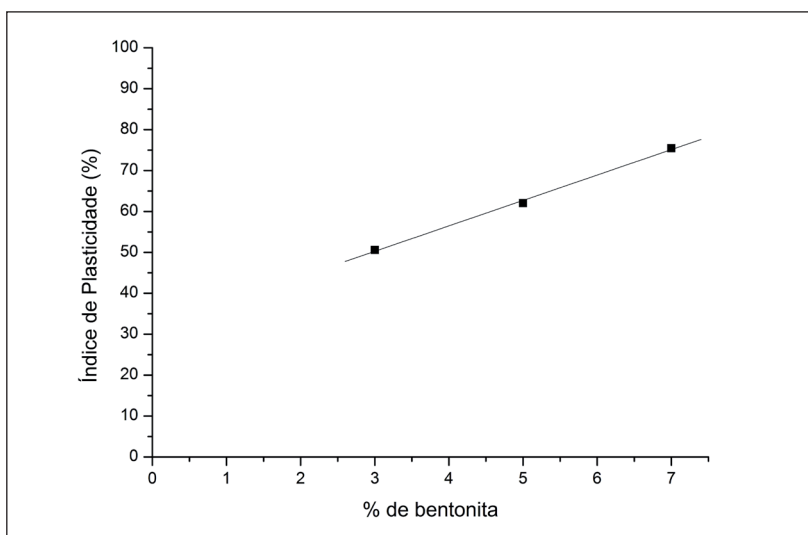


Figura 4. Análise da relação entre o índice de plasticidade e o aumento de bentonita.

O ensaio de compactação foi realizado com reuso do material. As curvas de compactação estão apresentadas na Figura 5.

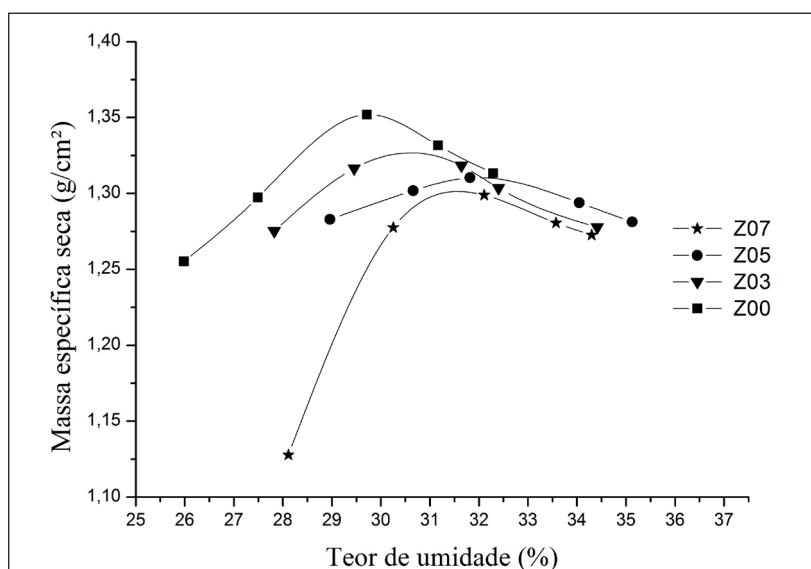


Figura 5. Curva de compactação da zeólita pura e suas misturas.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de compactação da zeólita pura e das misturas-zeólita bentonita que servirão como base para a moldagem dos corpos de prova do ensaio de condutividade hidráulica.

**Tabela 2.** Parâmetros de compactação.

Parâmetros	Z00	Z03	Z05	Z07
Massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) ( $g/cm^3$ )	1,35	1,32	1,31	1,30
Umidade ótima ( $w_{\acute{o}tima}$ ) (%)	29,6	30,7	31,7	31,9

É possível observar por meio dos resultados de ensaio, que tanto a zeólita pura quanto suas misturas apresentaram uma elevada umidade ótima e uma baixa massa específica. Tal fenômeno de adsorção de água do material zeolítico pode ser justificado pela sua elevada porosidade. Ademais é perceptível, apesar de pouco expressiva, a redução da massa específica e o aumento da umidade ótima com a adição de bentonita.

Referente à análise química, a zeólita apresentou uma CTC de 65,17 meq/100g. Comparando com Englert & Rubio (2005) e Oliveira (2011) que encontraram respectivamente valores de 74,00 e 57,8 meq/100g para zeólitas de mesma natureza, os valores estão dentro da margem esperada. Comparando com o valor emitido em laudo pela empresa Celta Brasil de CTC de 200 meq/100g o resultado está inferior ao esperado. Essa divergência pode ser justificada pelo tempo de contato das amostras com o cátion saturado durante o ensaio realizado pela IBRA, segundo Kitsopoulos apud Oliveira (2011), o tempo para que haja uma efetiva saturação é de 12 dias, logo o ensaio não foi realizado com saturação total.

Mesmo com o valor inferior ao esperado, foi comprovado que a zeólita analisada apresenta uma considerável capacidade de troca catiônica, podendo beneficiar assim a redução de impactos ambientais em caso de vazamento do lixiviado pela “filtração” dos metais pesados provenientes

dos materiais lançados nos aterros sanitários. No entanto, faz-se necessário o estudo da redução de metais pesados com o passar do tempo utilizando o lixiviado, visto que devido a agressividade do meio de um aterro sanitário, o material pode reagir de forma diferente a das barreiras reativas, podendo ocorrer colmatação do liner ou reações químicas inesperadas. Assim como em zeólitas brasileiras estudadas pelos pesquisadores citados acima, a amostra apresentou equilíbrio de bases na CTC de 85,2% de Ca, 6,3% de Mg e 1,6% de K. Vale ressaltar que este percentual está diretamente relacionado com o tipo dos principais metais filtrados pela zeólita.

O material apresentou pH de 7,47, atendendo aos critérios estabelecidos para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários de pH maior que 7,00. Este fator também está relacionado com a CTC do material, dado que, conforme Morali (2006), o pH tem um impacto significativo sobre a remoção dos metais pesados pela zeólita, uma vez que influencia a especificação do metal, a integridade da zeólita, além dos íons  $H^+$  serem considerados competitivos na troca iônica.

### 3.2 Análise da condutividade hidráulica

Nesta etapa, foram realizados dois ensaios para cada percentual de aditivo a fim de validar os resultados. Os corpos de prova foram moldados conforme explicado no item 2.2.2. O tempo médio para saturação dos corpos de prova variou de 3 a 7 dias dependendo da permeabilidade do material. Para a análise da influência do percentual de bentonita na condutividade hidráulica, o valor utilizado para cada amostra foi obtido pela média entre os resultados dos dois corpos de prova relacionados a cada percentual. Vale ressaltar que para um mesmo percentual de aditivo os corpos de prova apresentaram resultados de mesma ordem de grandeza. A Tabela 3 apresenta as condições de moldagem e resultados dos ensaios de condutividade hidráulica.



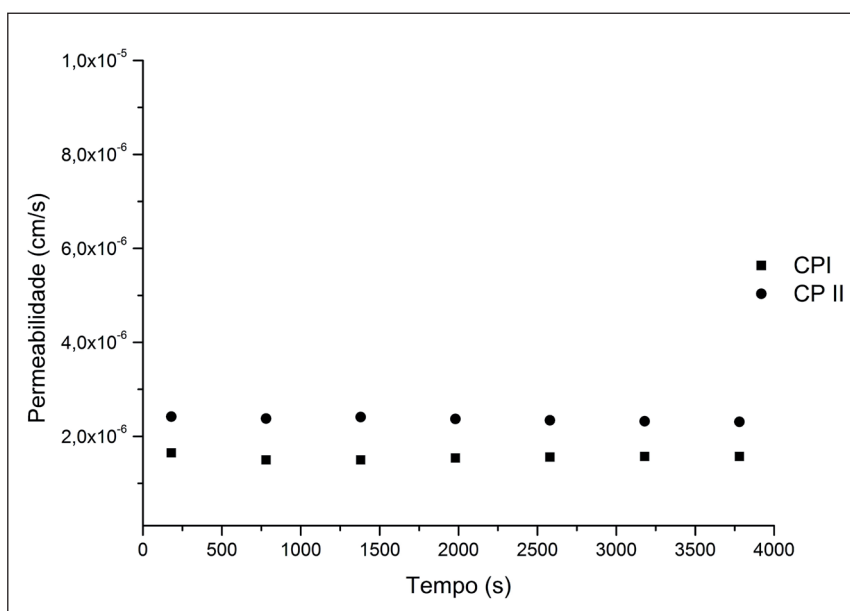
**Tabela 3.** Condições dos ensaios e resultados para a zeólita pura e misturas zeólita-bentonita

Amostra	CP	w <sub>mold</sub> (%)	Δw* (%)	ρd (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	Saturação (%)	k (cm/s)	k <sub>méd</sub> (cm/s)
Z00	CPI	29,86	-0,26	1,3	97	99,12	1,96 E-06	2,16 E-06
	CPII	29,86	-0,26	1,28	95	98,92	2,36 E-06	
Z03	CPI	31,30	-0,60	1,27	96	97,71	3,91 E-07	3,83 E-07
	CPII	31,30	-0,60	1,32	100	98,57	3,74 E-07	
Z05	CPI	31,63	0,07	1,27	97	98,04	1,32 E-07	1,42 E-07
	CPII	31,86	-0,16	1,25	96	97,29	1,53 E-07	
Z07	CPI	31,79	0,11	1,25	96	97,80	8,55 E-08	8,91 E-08
	CPII	31,79	0,11	1,25	96	98,26	9,27 E-08	

Onde w<sub>mold</sub> é a umidade na qual o corpo de prova foi moldado; Δw é desvio entre umidade ótima e umidade moldável; ρd é a massa específica seca; GC é o grau de compactação; k a condutividade hidráulica e k<sub>méd</sub> é a média das condutividades hidráulicas.

Sabe-se que a percolação inicial do solo não saturado apresenta valores inferiores devido a dificuldade do percolado de atravessar os vazios compostos por a. À medida que ocorre a saturação do meio, a condutividade hidráulica vai

aumentando até a saturação total indicada pela estabilização dos valores medidos durante o ensaio. Para analisar a constância do parâmetro com o tempo, assim podendo estimar a saturação, durante o ensaio foram plotados gráficos de condutividade hidráulica em função ao tempo. As curvas condutividade hidráulica versus tempo para cada mistura estão apresentadas nas Figuras 6 e 7 para Z00 e Z03 e Figuras 8 e 9 para Z05 e Z07 respectivamente.



**Figura 6.** Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z00.

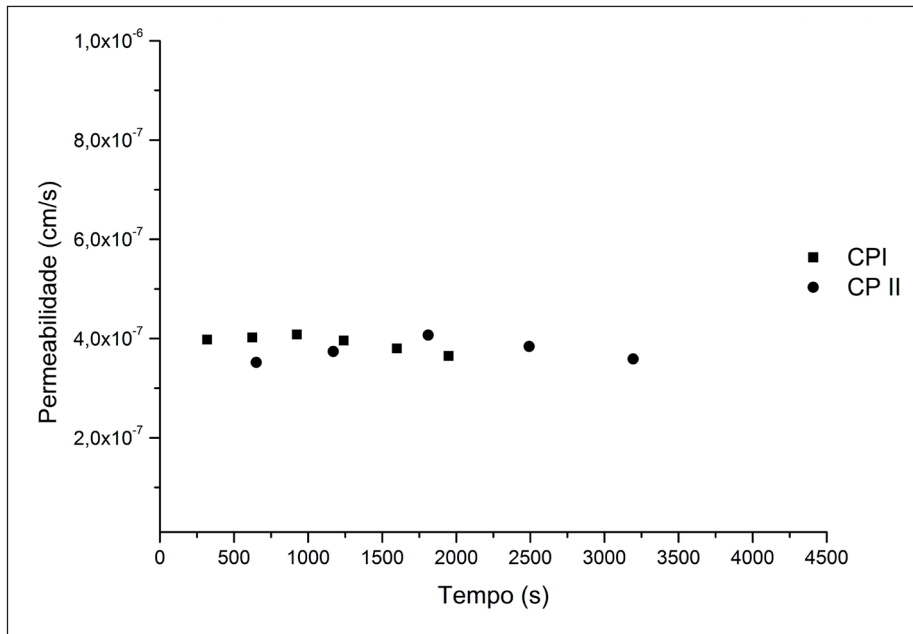


Figura 7. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z03.

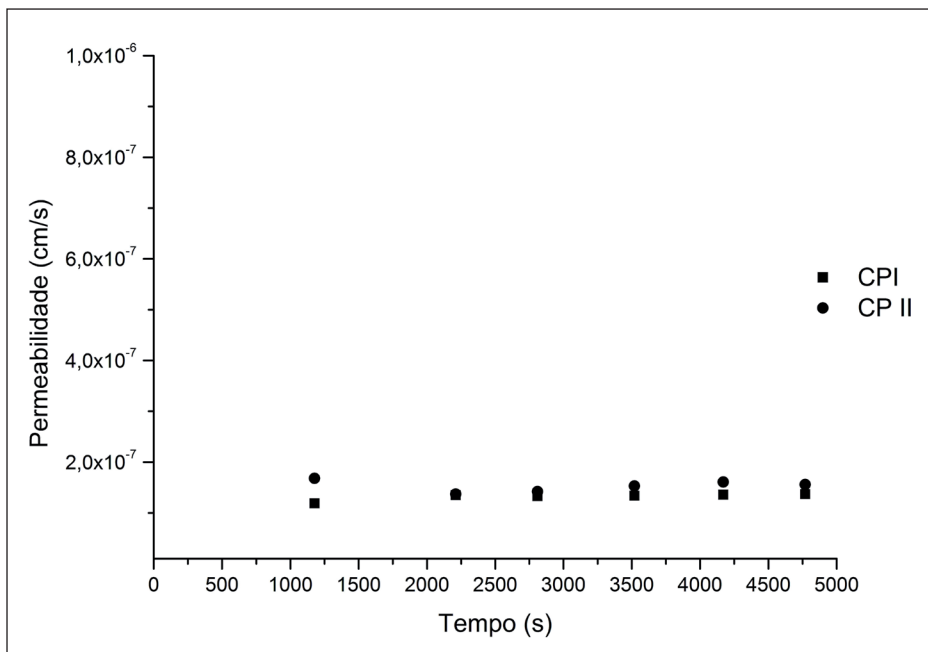


Figura 8. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z05.

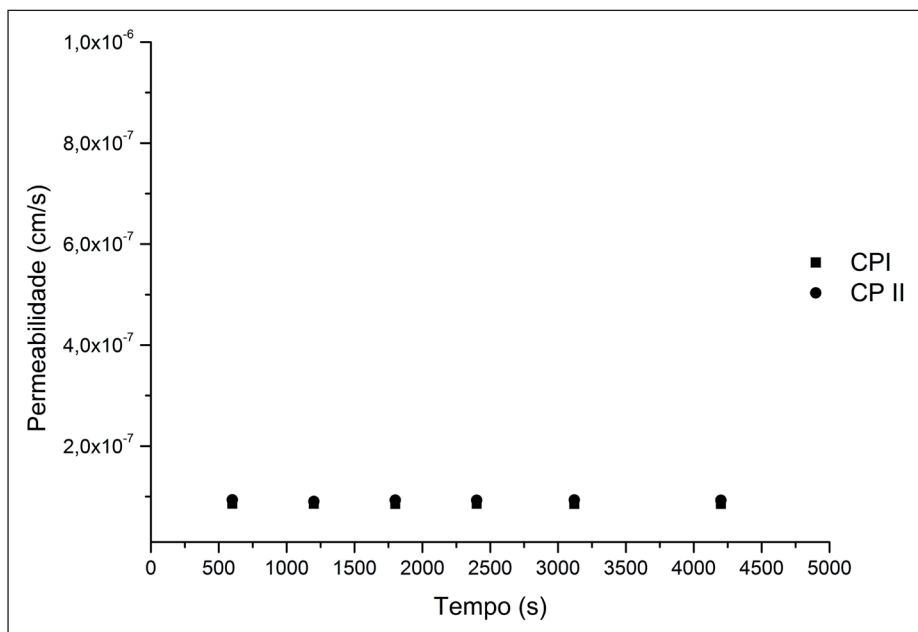


Figura 9. Variação da condutividade hidráulica em relação ao tempo em Z07.

Por intermédio dos valores apresentados na Tabela 3 foi montado um gráfico condutividade hidráulica versus percentual de aditivo a fim de se analisar o comportamento da curva gerada. A análise da condutividade hidráulica pelo percentual de bentonita está apresentada na Figura 10.

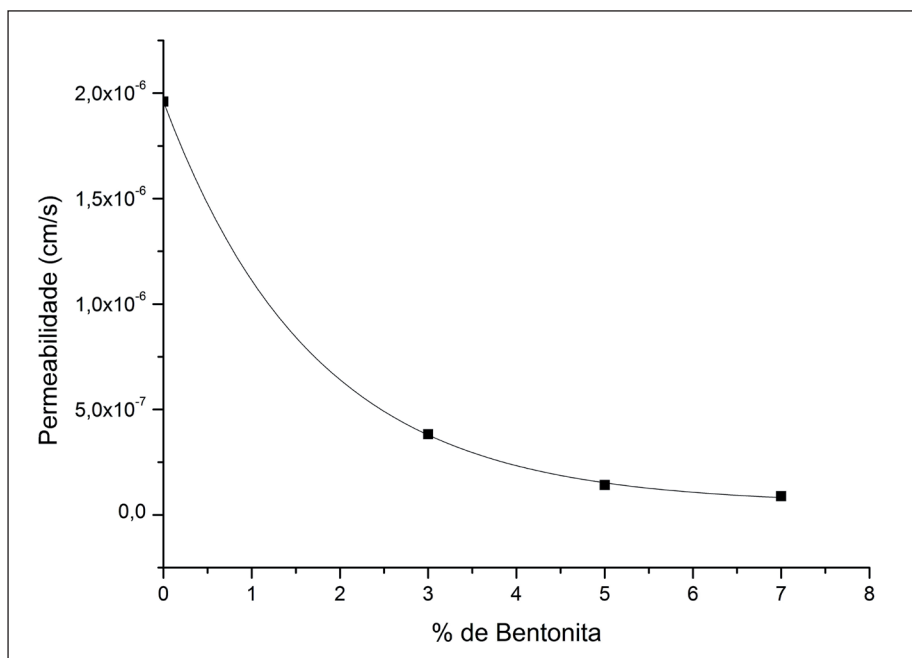


Figura 10. Variação da condutividade hidráulica versus percentual de bentonita.

Analisando a Figura 10 é possível constatar que a curva gerada pela variação de condutividade hidráulica com o aumento de bentonita denotou característica de uma exponencial logarítmica com  $R^2 = 0,98$ . Tal comportamento é convergente com estudos analisando misturas de solos locais-bentonita. É perceptível que para tal material de base a curva apresenta uma tendência a estabilização a partir da adição de 6% de aditivo.

A permeabilidade da zeólita pura encontrada foi da ordem de  $10^{-6}$  cm/s e é compatível com uma areia siltosa, logo, o material em estado puro não ataria aos critérios de norma para camadas impermeabilizantes de aterro sanitário. A adição de um percentual de 3% de bentonita já implementou uma considerável redução do parâmetro resultando em uma condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-7}$  cm/s, valor compatível aos critérios normativos.

Comparando os resultados obtidos com estudos anteriores como Ören & Özdamar (2013), que concluíram que zeólitas com diferentes granulometrias, sem adição de bentonita, não atendiam a condutividade hidráulica para utilização como camadas impermeabilizantes, e Tuncan et. al. (2003) e Kaya & Durukan (2003) que concluíram com estudos de misturas zeólita-bentonita com um percentual de 10% e 20% de aditivo que as amostras apresentavam condutividade hidráulica compatível a utilização como camada de base de aterro sanitário, é possível constatar que a adição de bentonita faz-se necessária para utilização da zeólita como material base para camadas impermeabilizantes.

É relevante analisar que a utilização do aditivo em percentuais inferiores a 10%, valor base de pesquisas anteriores, como analisados neste estudo, já atingem a condutividade hidráulica prescrita em normas de aterros sanitários industriais e que a estabilidade da curva em aproximadamente 6% de aditivo demonstra que o aumento da quantidade de bentonita a partir deste percentual não gerou redução considerável de condutividade hidráulica no material analisado nesta pesquisa. Logo, a análise de percentuais de bentonita inferiores aos utilizados anteriormente faz-se necessária para as diversas granulometrias a fim de evitar desperdício do aditivo.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho experimental indicaram que a condutividade hidráulica da zeólita em estado puro se apresenta na ordem de  $10^{-6}$  cm/s, valor fora da margem de utilização para camada impermeabilizante de base de aterro sanitário, logo se faz necessária a adição de bentonita para a redução deste fator.. A adição de bentonita gerou um decréscimo de condutividade hidráulica nas misturas. Neste estudo, todas as misturas, ou seja, a partir do acréscimo de um percentual de 3% de bentonita, apresentaram resultados de ensaios inferiores ou dentro da ordem de  $10^{-7}$  cm/s, valor pertinente à faixa aceitável para barreiras impermeabilizantes.

A determinação de um valor adequado de aditivo reduz o desperdício do mesmo, evitando assim a utilização de percentuais acima do necessário, permitindo posteriormente analisar a viabilidade econômica da utilização da mistura zeólita-bentonita. Após a adição de aproximadamente 6% de bentonita, percebe-se uma estabilização da condutividade hidráulica, sendo assim, a partir deste valor o aumento de aditivo não ocasiona variações expressivas na permeabilidade do material para este tipo de zeólita nesta faixa granulométrica.

A análise da zeólita para utilização como camada impermeabilizante de aterros sanitários mostrou que todas as misturas estudadas apresentaram comportamento adequado em termo de condutividade hidráulica. Além disto, observou-se um aumento do limite de liquidez, índice de plasticidade e alteração da classificação do material que passou de areia siltosa (SM) da zeólita pura para areias argilosas (SC) em todas as misturas, fatores relevantes para análise do comportamento à camada impermeabilizante. Quanto à capacidade de troca catiônica, fator importante para a escolha do material de estudo na utilização em camadas impermeabilizantes, o material apresentou elevado resultado, podendo gerar benefícios em caso de trincas e vazamentos na base do aterro, adsorvendo metais pesados e conseqüentemente mitigando possíveis problemas ambientais gerados pela contaminação de solos e lençóis freáticos próximos a área pelo lixiviado. No entanto, devido à agressividade da zeólita, se faz necessária

a análise em trabalhos futuros da estabilidade química da interação do lixiviado com a mesma.

## 5 AGRADECIMENTOS

A empresa Celta Brasil pelo fornecimento da zeólita, matéria-prima, para a realização deste projeto de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ASTM D5084-10 (2001) *Standard test method for measurement of hydraulic of saturated porous Materials using a flexible wall permeameter*. ASTM International, West Conshohocken, USA, 23p.
- Camargo, K. R. (2012). *Avaliação da condutividade hidráulica e da resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS)*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 103 p.
- Durukan, S.; Pulat, H. F.; Yukselen-Aksoy, Y. (2004) *Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand-bentonite mixtures*. Waste Management & Research, v. 32[2], p.149-156.
- Englert, A. H.; Rubio, J. (2005) *Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite*. International Journal of Mineral Processing, v.75, p.21-29.
- Heineck, K. S. (2002) *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Master thesis, UFRGS, Porto Alegre, 251 p.
- Kaya, A.; Durukan, S. (2003) *Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner*. Applied Clay Science v.25 p.83-91.
- Lukiantchuki, J.A. (2007). *Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos. 124 p.
- Monte, M. B. M.; Resende, N. G. A. M. (2015), *Zeólitas Naturais*. CETEM, Comunicação técnica elaborada para edição do livro rochas & minerais industriais: usos e especificações, Rio de Janeiro, p. 699-720.
- Morali, N. (2006) *Investigation of zinc and lead removal from aqueous solutions using clinoptilolite*. Master Thesis, Middle East Technical University. Turkey, 93 p.
- Morandini, T.L.C.; Leite, A. L. (2015). *Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes*. Engeneering Geology, v.196, p.251 – 267.
- NBR 6458 (2016) *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 14p.
- NBR 6459 (2016) *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 5p.
- NBR 7180 (2016) *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 3p.
- NBR 7181 (2016) *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 12p.
- NBR 7182 (2016) *Solo – Ensaio normal de compactação de solos*. Rio de Janeiro, 9p.
- NBR 13896 (1997) *Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação – procedimento*. Rio de Janeiro, 12p.
- Oliveira, S. A. (2011) *Estudo de adsorção de metais pesados em zeólitas para fins de uso em barreira reativa*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 220p.
- Ören, A. H.; Özdamar, T. (2013) *Hydraulic conductivity of compacted zeolitas*. Waste Management & Research v.31 [6] p.634-640.
- Tucan, A.; Tucan, M.; Koyuncu, H.; Guney, Y. (2003) *Use of natural zeolites as a landfill liner*. Waste Management & Research v.21 p.54-61.