

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Comportamento mecânico de misturas compactadas de solo/bentonita e zeólita / bentonita por meio de ensaios CBR

Yago Guidini da Cunha

Engenheiro Civil, Mestrando, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, yagoguidinic@gmail.com

Ligia Abreu Martins

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil - Faculdade Brasileira, UNIVIX, Vitória, Brasil, ligiaabreumartins@gmail.com

Karla Maria Wingler Rebelo

Professora Adjunta II, Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, kmwingler@gmail.com

RESUMO: Esta pesquisa consiste na caracterização e estudo das propriedades mecânicas e de expansão de misturas de solos compactados convencionais e alternativos. Foram avaliadas misturas de Solo (S) – Bentonita (B) e Zeólita (Z)–Bentonita (B), nas proporções de 3%, 5% e 7% em peso seco de bentonita. Os resultados dos ensaios CBR mostraram que, em geral, a introdução da bentonita aumenta a característica de expansibilidade da mistura e, concomitantemente, diminui a capacidade de suporte do solo (CBR). Tal resultado sugere que o valor de expansão pode ser um limitante na porcentagem de aditivo incorporado às misturas de solo compactado para liners.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Compactados, Resistência Mecânica, Ensaios CBR.

ABSTRACT: This research consists of the characterization and study of the mechanical and expansion properties for compacted soils mixtures. It were evaluated Soil (S) - Bentonite (B) and Zeolite (Z) - Bentonite (B) mixtures prepared in the ratio of 3%, 5% and 7% in terms of bentonite dry weight. The results of the CBR tests showed that, in general, the bentonite addition increases the sample expandability, at the same time, reduces the soil bearing capacity (CBR). This result suggests that the expansion value may be a limiting factor in the percentage of additive incorporated into compacted soil mixtures for liners.

KEYWORDS: Compacted Soils, Mechanical Shear, CBR tests.

1 Introdução

O ensaio California Bearing Ratio (CBR), conhecido no Brasil como Índice de Suporte Califórnia (ISC), surgiu da necessidade de se encontrar um método rápido e eficiente para comparação dos materiais de base e sub-base que pudessem ser utilizados como reforço para o subleito de obras viárias (PORTER, 1950).

Durante a 2ª Guerra Mundial, o método do ensaio foi modificado e utilizado pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) para uso de pavimentos de aeroportos militares. Segundo Carvalho (2005), isso ocorreu devido à praticidade na execução do ensaio.

O ensaio que até então era baseado em formas empíricas, passou por uma série de pesquisas e adaptações na década de 50, como aborda Medina (1988). Com esses estudos e adaptações, o ISC passou a ser o primeiro método nacional determinante desse tipo de capacidade de suporte do subleito e das camadas do pavimento, oficializado e adotado por órgão rodoviário.

No Brasil, os resultados desse ensaio são adotados quase que com exclusividade para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, determinando-se a capacidade de suporte do subleito e das camadas do pavimento rodoviário. Exemplos nesse sentido são os métodos de dimensionamentos de



pavimentos flexíveis do DNIT, antigo DNER, na versão mais atual do seu Manual de Pavimentação (DNIT, 1996).

Aqui, no Brasil, existem duas normas que regem os ensaios de CBR: a NBR 9895/87 e a DNER – ME 049/94 – Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia elaborada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Essas normas são prescritas com a mesma metodologia, diferenciando-se apenas na quantidade de leituras de penetração, o que não altera no resultado final, a saber, que o CBR, basicamente é a relação necessária entre a pressão para que se possa penetrar um pistão em um corpo de prova e a pressão para que se consiga produzir a mesma penetração numa mistura de brita estabilizada, sendo utilizadas para a determinação do CBR somente as leituras respectivas às penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm.

Além da obtenção de um índice de capacidade de suporte de amostras deformadas, é possível obter o valor da expansão que, segundo Nogami e Villibor (1995), tem sido um parâmetro de grande importância em obras viárias.

Diante deste contexto, o ensaio CBR pode se tornar uma alternativa interessante para determinação da capacidade de suporte de barreiras impermeabilizantes de fundo de aterros sanitários, os quais são constituídos por misturas de solos deformados compactados.

As barreiras impermeabilizantes de fundo são constituídas por solos de baixa condutividade hidráulica (argilas compactadas ou misturas de solos – aditivos) e/ou por materiais geossintéticos impermeabilizantes.

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

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.

Outra mistura mais recente utilizada em bases impermeabilizantes corresponde à mistura zeólita – bentonita (Tuncan et. al., 2003); Kaya & Durukan, 2003; Durukan et al, 2004, Ören & Özdamar, 2013, Martins, 2017). O mineral zeólita é um material muito frequente na construção de barreiras reativas, solução para contenção de contaminantes em água subterrânea.

Segundo Oliveira (2011), a zeólita tem como função 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.

Neste contexto, a maior parte dos estudos é voltado para a determinação da permeabilidade das misturas compactadas e, quando são conduzidos estudos para avaliação da resistência mecânica, esta é normalmente avaliada por meio de ensaios de compressão simples. No caso de solos mais arenosos, não é possível realizar tais ensaios em condições saturadas. Além disto, o ensaio é realizado em condições não confinadas.

Assim, este trabalho pretende avaliar a resistência mecânica e a expansão de misturas de solo compactadas por meio de ensaios CBR. Como objetivos específicos citam-se: (i) avaliação da resistência de amostras de misturas compactadas; (ii) análise da influência da porcentagem de aditivos na resistência mecânica.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Foram estudadas duas misturas diferentes para a realização deste trabalho: a mistura de solo – bentonita (S/B) e a mistura de zeólita – bentonita (Z/B). A pesquisa subdividiu-se em duas partes para cada amostra estudada. Na primeira, se realizaram os ensaios para a caracterização de cada material. Na segunda

parte realizaram-se os ensaios para determinação do potencial (grau) de expansão em conjunto ao CBR.

O solo utilizado nesta pesquisa é um solo tropical, geralmente utilizado como aterro para base de rodovias, proveniente da região de Santa Maria de Jetibá (ES). Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo é classificado como uma areia siltosa (SM).

A amostra de bentonita utilizada é comercializado pela Bentonisa – Bentonita do Nordeste S.A. e foi classificado como bentonita sódica. A zeólita utilizada é do tipo natural clinoptilolita e foi doada pela empresa “Celta Brasil”. Para este trabalho foram utilizadas misturas de zeólita-bentonita de 3%, 5% e 7% de aditivo, e de misturas solo – bentonita com as mesmas porcentagens de aditivo.

2.2 Ensaios Realizados

2.1.1 Caracterização Física e Química das Amostras

A caracterização física do solo puro, da bentonita, da zeólita e das misturas nas proporções 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 e da bentonita foi realizada pela empresa IBRA, localizada em Jardim Nova Veneza Sumaré – SP. Foram realizados os seguintes ensaios: pH em CaCl₂ e pelo método SMP, capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases H+Al, macronutrientes e micronutrientes pelo extrator Mehlich.

Para a caracterização física da bentonita, devido sua característica expansiva e seu poder adsorativo 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.

2.1.2 Ensaio CBR

O ensaio foi realizado conforme a NBR 9895/87, os corpos de prova foram moldados próximos a umidade ótima, sob energia do Proctor Normal com auxílio do compactador mecânico.

Após a compactação, os corpos de prova foram imersos em água com a sobrecarga durante 96 horas, de tal forma que a água banhasse o material tanto pelo topo quanto pela base. Durante este período foram realizadas leituras de deformação (expansão ou recalque) com aproximação de 0,01 mm a cada 24 horas.

A medição da expansão é relevante no contexto deste trabalho, visto que, a bentonita sódica apresenta elevada expansibilidade quando em contato com água. Segundo Souza Santos apud Cutrim et al. (2015), pelo fato de serem altamente hidrofílicas, as bentonita sódicas costumam apresentar altos inchamentos em água, ao ponto de 1,0 g de argila poder ocupar volumes maiores a 10 ml. Tal expansão poderia ocasionar o aumento da espessura da camada de base e a redução de vazios do aterro, aumentando a dificuldade da passagem do lixiviado pelo meio.

Após o tempo de submersão e a última medição da expansibilidade, o conjunto foi retirado do tanque e instalado na prensa e o corpo de prova foi rompido aplicando-se carregamento com velocidade de 1,27 mm/min.. As leituras foram feitas por meio computacional. Com os valores obtidos ao longo do ensaio, traçou-se o gráfico pressão versus penetração, quando necessário o gráfico foi corrigido. A partir do gráfico obtém-se as cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0 mm.

O resultado adotado para o ISC foi o maior dos dois valores encontrados correspondentes às penetrações de 2,5 e 5,0 mm. A Figura 1 apresenta a leitura do extensômetro e o ensaio de ruptura do corpo de prova de ISC.



Figura 1- Leitura do extensômetro e ensaio de ruptura do corpo de prova de ISC.

3 Resultados e Discussões

Para uma melhor interpretação, foram adotadas as nomenclaturas: S00; S03; S05 e S07 para designar solo puro; mistura com adição de 3% de bentonita; mistura com adição de 5% de bentonita e mistura com adição de 7% de bentonita, respectivamente; 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 Mistura Solo - Bentonita

3.1.1 Caracterização da Amostra

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física do solo puro, da bentonita e das misturas.

Tabela 1- Resultado dos ensaios de caracterização S/B

Síntese dos Resultados		S00	S03	S05	S07	S09	Bentonita
ps (g/cm ³)		2,75	-	-	-	-	3,1
Argila (%)		6,5	13,0	14,2	14,6	16,9	77,9
Silte (%)		13,4	22,6	23,4	21,6	22,8	20,4
Areia Fina (%)		9,1	12,2	11,6	13,9	14,2	1,6
Areia Média (%)		13,1	14,2	13,4	14,2	14,1	0,0
Areia Grossa (%)		33,1	16,7	18,3	18,9	14,9	0,0
Limites de Consistência	LL	-	41	57	70	82	378
(%)	LP	NP	21	22	21	21	46
	IP	-	21	36	49	69	332
Classificação Unificada		SM	SC	SC	SC	SC	CH
Índice de Atividade		-	1,58	2,50	3,37	3,57	4,24

O solo puro foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS) como uma areia siltosa (SM) apresentando um percentual em massa de 80,2% de areia. Comparando os resultados com as características adotadas pela CETESB este solo não seria adequado para construção de camadas impermeabilizantes. A bentonita foi classificada como uma argila de alta compressibilidade (CH) com um percentual em massa de 77,9% de argila.

Todas as misturas foram classificadas como areia argilosa (SC), com um percentual de finos e limite de liquidez maior do que 30%, além do limite de plasticidade maior do que 15%. Logo, as misturas solo –

bentonita atendem a todos os critérios propostos pela CETESB para utilização como barreira impermeabilizante. A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros de compactação.

Tabela 2 - Parâmetros de compactação. - Energia de Proctor Normal

Parâmetros	S00	S03	S05	S07	S09
$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,99	1,94	1,92	1,90	1,89
$W_{\text{ót}}$ (%)	10,75	11,70	11,80	12,15	12,50

É evidente o aumento da umidade ótima, enquanto, por outro lado, na massa específica seca máxima houve uma queda com o aumento da bentonita, o que já era esperado. Geralmente, como observado por Morandini (2015), em solos argilosos, essa massa é menor do que em solos arenosos, o oposto do que ocorre com a umidade ótima.

3.1.2 Ensaios CBR

Os resultados dos valores do CBR e da expansão estão expressos na Tabela 3. Por meio dos resultados obtidos, foi possível constatar a influência do percentual de finos, bentonita, na resistência do solo, visto que, ao acrescentar o aditivo, houve uma redução da resistência, sendo maior entre as amostras S05 e S07. Verificou-se também a atuação da propriedade expansiva da bentonita nas amostras. Apesar do solo puro já possuir uma expansão, o valor dessa propriedade aumentou com o acréscimo da bentonita.

Os resultados também permitem observar a relação inversa entre os valores de CBR e a expansão das amostras.

Tabela 3 - Resultados do CBR e da Expansão do solo puro e das misturas S/B.

Amostra	CBR (%)	Expansão
S00	14	1,31
S03	13	2,40
S05	11	4,20
S07	7	7,56
S09	6	13,17

3.2 Misturas Zeólita - Bentonita

3.2.1 Caracterização da Amostra

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização; enquanto a Tabela 5 apresenta os resultados dos parâmetros de compactação.

A zeólita pura foi classificada pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como uma areia sitosa (SM) apresentando um percentual em massa de 77,42% de areia, sendo deste total 64,39% de areia grossa. Por outro lado, as misturas foram classificadas como areia argilosa (SC).

Similar à mistura solo – bentonita, é nítido que o incremento de aditivo nas misturas alterou consideravelmente os limites de Atterberg. Verificou-se um aumento nos valores de Limite de Plasticidade e de Índice de Plasticidade com a introdução e aumento da porcentagem de bentonita.

Segundo as características estabelecidas pela CETESB, nenhuma das misturas atendeu ao critério de percentual de finos (superior a 30%). Entretanto, estudos conduzidos por Martins (2017) mostraram valores de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} cm/s em misturas de zeólita – bentonita com porcentagem de bentonita de 3%, atingindo os valores de condutividade prescritos em normas de aterros sanitários.

Também é possível observar por meio dos resultados de ensaio de compactação 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.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios de caracterização

Síntese dos Resultados	Z00	Z03	Z05	Z07	Bentonita
Massa específica (g/cm ³)	2,49	-	-	-	3,05
Argila (%)	4,3	4,6	6,9	8,5	78
Silte (%)	18,3	19,3	17,6	17,8	20,4
Areia Fina (%)	0,7	1,7	1,9	1,5	1,6
Areia Média (%)	12,3	11,6	12,3	12,9	0
Areia Grossa (%)	64,4	62,7	61,3	59,2	0
Limite de Consistência	LL(%)	51	69	82	95
	LP(%)	-	19	20	19
	IP(%)	-	51	63	76
Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	SM	SC	SC	SC	CH

Tabela 5 - 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

3.2.2 Ensaios CBR

Os resultados dos valores do CBR e de expansão estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do CBR e da Expansão do solo puro e das misturas Z/B.

Amostra	CBR (%)	Expansão (%)
Z00	34	-0,87
Z03	45	3,86
Z05	18	7,27
Z07	14	12,18

3.2 Comparação das misturas Solo – Bentonita e Zeólita - Bentonita

A Figura 5 apresenta um gráfico comparativo do comportamento das misturas em termos de CBR e de expansão.

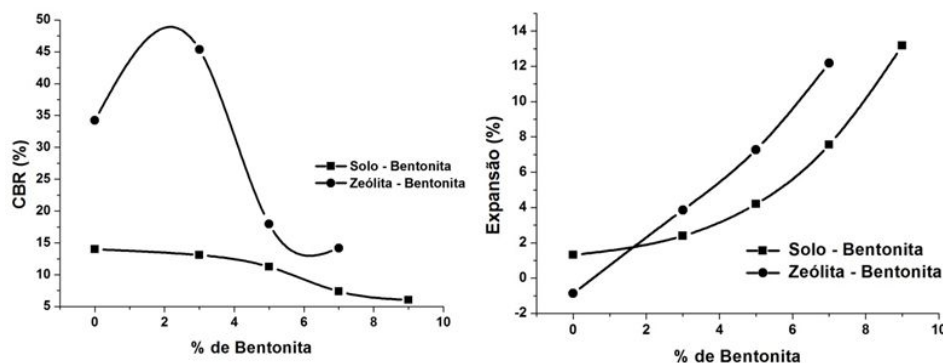


Figura 2 - Comparação das misturas: (a) Variação do CBR com adição de bentonita b) Variação da expansão com adição de bentonita

Ao se comparar os resultados obtidos entre as diferentes amostras estudadas é possível perceber que em ambas as misturas, S/B e Z/B, a resistência do CBR final foi menor que a resistência inicial. Observa-se que o valor de CBR foi maior nas misturas zeólita – bentonita, ainda que esta apresente maiores valores de expansão. Tal comportamento pode ser explicado pela granulometria dos materiais estudados em relação ao parâmetro CBR.

Para a mistura solo / bentonita verificou-se uma diminuição do valor de CBR com a introdução e aumento do teor de bentonita. A curva da mistura zeólita / bentonita apresentou um pequeno aumento na resistência com o teor de 3% de bentonita, possivelmente devido a adição de coesão a um material de comportamento granular, seguido de um declínio para maiores percentagens de aditivo.

Analisando-se a expansão, observou-se que os dois materiais de estudo apresentaram um aumento do fator com o acréscimo do aditivo, devido a característica de expansibilidade da bentonita sódica. Associado a expansão verificou-se uma diminuição do valor do CBR.

Além disto, os resultados mostram que, para um mesmo teor de bentonita, a expansão é maior nas misturas zeólita – bentonita, provavelmente devido a estrutura da zeólita, formada por cavidades adsorptivas.

3 Considerações Finais

Tanto o solo puro quanto a zeólita pura foram classificados pelo Sistema Unificado de Classificação (SUCS) como uma areia siltosa (SM), com características não adequadas para utilização como camadas impermeabilizantes. As misturas solo – bentonita e zeólita – bentonita foram classificadas como areia argilosa (SC).

Com relação aos ensaios CBR, os resultados dos ensaios mostraram que, em geral, a adição da bentonita proporcionou a diminuição da capacidade de suporte do solo. Nas misturas solo – bentonita, verificou-se uma diminuição na resistência concomitante com o aumento da expansão dos solos. Por outro lado, nas misturas zeólita – bentonita verificou-se um aumento inicial da resistência, seguido de sua diminuição com a porcentagem de aditivo acrescentado.

Apesar de alguns estudos retratarem o efeito benéfico da diminuição da condutividade hidráulica de misturas de solos compactados com a adição da bentonita, os resultados deste trabalho mostraram a necessidade de investigação das propriedades mecânica e expansiva. Tal resultado sugere que o valor de expansão pode ser um limitante na porcentagem de aditivo incorporado às misturas de solo compactado para liners.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 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 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 14p. 1987.
- Camargo, K. R. (2012). Evaluation of hydraulic conductivity and shear strength of soil-bentonite mixtures: a case study of a landfill located in Rio Grande (RS). Master thesis, School of Engineering at São Carlos, University of São Paulo, São Carlos. 103 p.
- Carvalho, m. F. (1999). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Tese de doutorado. EESC/USP. 278p.
- Cutrim, a. A.; MARTIN-CORTÈS, G. R.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. (2015). Bentonitas da Paraíba. 1ª ed. Rio de Janeiro, Interciências, p.200.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. Manual de pavimentação. 2. ed. Rio de Janeiro, 1996. 320 p. (Antigo DNER).
- 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.
- 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). Influence of the bentonite content on the hydraulic conductivity and shear strength of sandy-soil used for liner. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 124 p.
- Martins, L.A. (2017). Influência da adição de bentonite em misturas alternativas para a utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória 108 p.
- Medina, J. (1988) Notas Históricas acerca da Mecânica dos Pavimentos. In: 23ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis, RS. V. 01.
- 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.
- Morandini, T.L.C.; Leite, A. L. (2015). Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. Engineering Geology, v.196, p.251 – 267.
- Nogami, j.s.; Villibor, D.F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor, 1995. 240 p.
- Oliveira, S. A. (2011) Adsorption study of heavy metals on zeolites for purposes of use in reactive barrier. Master thesis. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 220p.
- Ören, A. H.; Özdamar, T. (2013) Hydraulic conductivity of compacted zeolites. Waste Management & Research v.31 [6] p.634-640.
- Porter, o. J. (1950). Development of the Original Method for highway Design. Transactions, ASCE, Vol. 115.
- Tuncan, a.; Tuncan, M.; Koyuncu, H.; Guney, Y. (2003). Use of natural zeolites as landfill liner. Waste Management & Research, v.21 p.54-61