

CAPÍTULO 7

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE MISTURAS SOLO-RESÍDUO VISANDO A UTILIZAÇÃO COMO BARREIRAS IMPERMEÁVEIS EM ATERROS SANITÁRIOS

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108117

BRESSAN JUNIOR; JOSÉ C.[1]; ZAMPIERI; LUCAS Q.[2]; NIENOV, FABIANO A.[3]; LUVIZÃO, GISLAINE[4]
[1,2,3,4] UNIVERSIDADE DO OESTE DE SANTA CATARINA
JOSE.CJ@UNOESC.EDU.BR

RESUMO: Desenvolveram-se misturas de solo com dois resíduos (lama de cal e gesso agrícola), objetivando emprega-las em camadas impermeáveis de aterros sanitários. As misturas foram formuladas variando-se o teor de adição e energia de compactação. São elas: 0RNOR, 10LC-NOR, 10GA-NOR, 0R-MOD, 10LC-MOD e 10GA-MOD (10LC: adição em 10% de lama de cal; 10GA: adição em 10% de gesso agrícola). Realizaram-se ensaios de permeabilidade de carga variável, visando determinar o coeficiente "k" e verificá-los aos padrões requeridos. Tanto a energia quanto a adição do resíduo foram capazes de reduzir as permeabilidades, entretanto, não foram suficientes para atingir valores inferiores a E-07 cm/s.

PALAVRAS-CHAVES: Solo-resíduo, permeabilidade, aterros sanitários, sustentabilidade.

ABSTRACT: Soil mixtures with two residues (lime sludge and agricultural gypsum) were developed, aiming to use them in impermeable layers of landfills. The mixtures were formulated by varying the addition content and compaction energy. They are: 0RNOR, 10LC-NOR, 10GA-NOR, 0R-MOD, 10LC-MOD and 10GA-MOD (10LC: 10% addition of lime slurry; 10GA: 10% addition of agricultural gypsum). Variable load permeability tests were carried out in order to determine the "k" coefficient and verify them to the required standards. Both the energy and the addition of the residue were able to reduce permeabilities, however, they were not enough to reach values lower than E-07 cm/s.

KEYWORDS: Soil-waste, permeability, landfills, sustainability.

1 | INTRODUÇÃO

Em um sistema de proteção em aterro sanitário, a camada de argila natural compactada é um dos artifícios essenciais para a manutenção do sistema de proteção, uma vez que esse artifício evita a percolação do contaminante para o lençol freático. Contudo, em função da formação e da composição mineralógica dos solos, em alguns casos o material natural não é suficiente para sanar os parâmetros de permeabilidade, resistência e plasticidade os quais é solicitado. Para tal, é possível empregar ao solo técnicas de melhoramento ou estabilização, a fim de adequar seu uso a barreiras impermeáveis.

Os solos utilizados em camadas impermeáveis, de acordo com Boscov (2008)[9], são de baixa permeabilidade e devem ser compatíveis quimicamente com o poluente a ser tratado ao longo do tempo. Conforme citam a CETESB (1993 apud BOSCOV, 2008)[9],

Heineck (2002)[11], Macambira (2002)[12], Omafra (2003, apud BOSCOV, 2008)[9] e Boscov (2008)[9] o valor do coeficiente de permeabilidade requerido para liners deve ser menor ou igual a 10^{-7} cm/s.

Boscov (2008)[9] afirma que outros materiais podem ser empregados como revestimentos de fundo ou de cobertura. A tendência é procurar resíduos reciclados em substituição aos solos, visando assim, preservar os recursos naturais e reduzir a disposição de resíduos no meio ambiente.

A pesquisa visou incorporar a uma massa de solo natural de formação residual, dois resíduos provenientes de atividades industriais: a Lama de Cal (Carbonato de Cálcio) e o Gesso Agrícola (Sulfato de Cálcio). Por meio da formulação de misturas de solo-resíduo, objetivou-se empregar esses materiais geotécnicos a uma barreira impermeável, assim como obter melhor compreensão do comportamento do material quanto suas propriedades de permeabilidade.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa utilizou um solo de origem residual basáltica do município de Joaçaba-SC. O material recebeu os ensaios de caracterização conforme Tabela 1. A análise granulométrica, realizada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016)[2], observa-se na Figura 1.



Figura 1 - Curva granulométrica do solo.

Umidade Natural (%) - NBR 6457 (ABNT, 2016)[1]	57,25	Índice de plasticidade (%)	13
Massa específica real dos grãos (g/cm³) - DNER-ME 093 (1994)[10]	2,91	Classificação textural	Silte argiloso
Limite de Liquidez (%) - NBR 6459 (ABNT, 2016)[3]	48	Classificação pela Highway Research Board (H.R.B)	A7-5
Limite de Plasticidade (%) - NBR 7180 (ABNT, 2016)[4]	35	Classificação pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)	CL – Argila pouco plástica

Tabela 1 - Características do solo.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois resíduos provenientes

de processos industriais diferentes, os quais foram classificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004)[6] como Classe II A – não inertes. Esses materiais também receberam os procedimentos de caracterização indicados na Tabela 2. As curvas granulométricas, conforme NBR 7181 (ABNT, 2016)[2] estão representadas na Figura 2.

Resíduo	Principal Componente	Umidade natural (%) - NBR 6457 (ABNT, 2016)[1]	Massa específica (g/cm³) - NBR 16605 (ABNT, 2017)[5]
Lama de Cal (LC)	Carbonato de Cálcio	31,30	2,77
Gesso Agrícola (GA)	Sulfato de Cálcio	46,39	2,60

Tabela 2 - Resíduos utilizados na pesquisa.

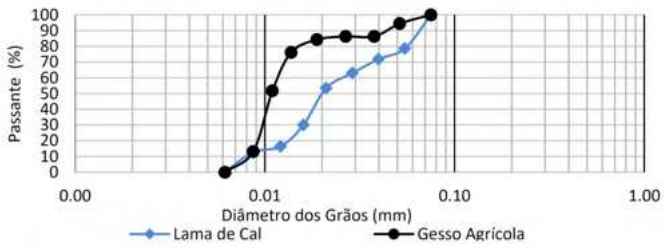


Figura 2. Curvas granulométricas dos resíduos.

Foram definidas seis misturas de solo-resíduo, onde a adição de resíduo ocorreu a partir da massa seca de solo. Para as misturas também se variou a energia de compactação em normal e modificada. A identificação e formulação das misturas podem ser observadas na Tabela 3. As misturas foram submetidas ao ensaio de compactação (Proctor normal e modificado, conforme a Tabela 3) de acordo com as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016)[7].

Mistura	Resíduo	Teor de resíduo	Energia de compactação
0R - NOR	-	0%	Normal
0R - MOD	-	0%	Modificada
10LC - NOR	LC*	10%	Normal
10LC - MOD	LC*	10%	Modificada
10GA - NOR	GA*	10%	Normal
10GA - MOD	GA*	10%	Modificada

*LC – Lama de Cal; *GA – Gesso Agrícola.

Tabela 3. Formulação das misturas solo-resíduo.

Os ensaios de permeabilidade de carga variável seguiram as prescrições da NBR 14545 (ABNT, 2000)[8], conforme as indicações do método B. Foram ensaiadas duas

amostras para cada mistura formulada. O cálculo do coeficiente de permeabilidade do solo ocorreu de acordo com o método proposto pela NBR 14545 (ABNT, 2000)[8], conforme a Equação (1).

$$k = \frac{\mathrm{aH}}{A\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

Onde: *a* é a área interna da bureta de vidro; *H* é a altura inicial do corpo de prova; *A* é a área inicial da amostra a ser ensaiada ; *Δt* é a diferença entre os intervalos de tempo t_1 e t_2; h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 e h_2 é a carga hidráulica no instante t_2. Os valores obtidos através da equação (1) foram ajustados através de um coeficiente *Rt*, o qual relaciona a viscosidade da água do ensaio com a viscosidade da água à temperatura de 20ºC, portanto, os valores utilizados neste trabalho referem-se ao coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20ºC (k20).

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 3 encontram-se as curvas de compactação das misturas e parâmetros para cada traço. Quando verificada a adição de resíduo aos traços, nota-se que tanto na energia normal quanto na energia modificada, que a adição de 10% de lama de cal (10LC) em relação à mistura sem resíduo (0R) provocou um aumento, embora pequeno, no γd max da mistura. Em termos de umidade ótima, analisou-se que não houve mudanças significativas, tanto na energia normal, quanto na modificada (Sd=0,35% para ambas).

No entanto, com a adição de 10% do resíduo gesso agrícola (10GA), notou-se que em ambas as energias de compactação houve redução no γd max da mistura em relação aos traços 0R e 10LC. Esse comportamento pode ser entendido em função do peso específico do resíduo (2,60 g/cm³), que é menor que o peso específico do solo (2,91 g/cm³) e da lama de cal (2,77 g/cm³). Ao que diz respeito a umidade ótima desse traço, avalia-se que o valor aumentou em relação às misturas 0R e 10LC, em ambas as energias. Este fato pode ser interpretado em relação à granulometria do gesso agrícola, que possuí partículas menores em relação à lama de cal, proporcionando assim uma maior superfície específica para a mistura.

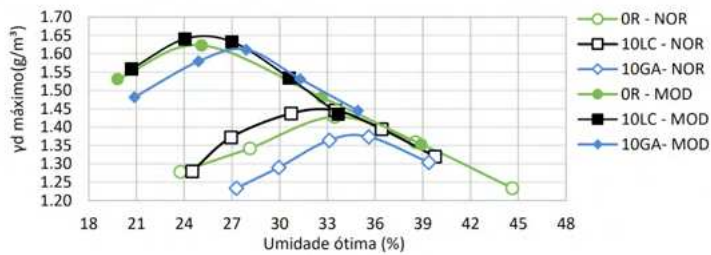


Figura 3. Curvas de compactação das misturas e parâmetros obtidos no ensaio de compactação.

Na Figura 4 podem ser verificados os resutados obtidos para cada ensaio realizado com as misturas de energia normal.

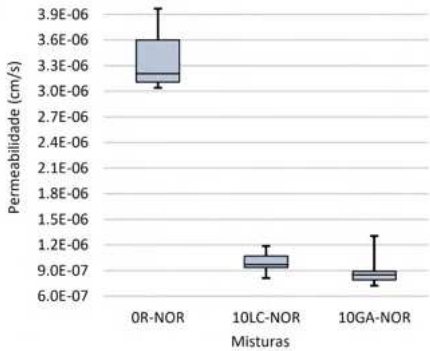


Figura 4. Análise dos dados do ensaio para as misturas compactadas à energia normal.

As misturas foram avaliadas pelo valor da mediana dos dados encontrados no ensaio. Optou-se por utilizar esse recurso em função da grande variação de valores para cada amostra, já que esta ferramenta fornece um valor mais representativo, uma vez que ela não é afetada pelos valores máximos e mínimos.

A mistura 0R-NOR, a qual foi compactada com energia normal e não possui adição de resíduo, apresentou ao longo do ensaio valores de k20 que variaram de 3,967E-06 a 3,040E-06 cm/s com coeficiente de permeabilidade (k20) de 3,222E-06 cm/s. Em relação a este dado, de acordo com Terzaghi, Peck e Mesri (1995)[13] o solo pode ser considerado com permeabilidade pobre ou baixa, característica de siltes orgânicos e inorgânicos, misturas de areia, silte e argila ou de argilas estratificadas.

Tratando-se das misturas com adição de resíduo, verifica-se que a mistura 10LC-NOR apresentou um coeficiente de permeabilidade de 9,915E-07 cm/s, apresentando durante o ensaio variações de 1,187E-06 a 8,118E-07 cm/s. Observa-se que a incorporação do resíduo, em relação à mistura sem adição e com a mesma energia de compactação (0R-NOR), proporcionou a redução do k20 em 69,23%.

Quanto a mistura com incorporação do resíduo gesso agrícola (GA), observa-se que o traço 10GA-NOR apresentou um coeficiente de permeabilidade (k20) de 8,503E-07 cm/s, com variações na faixa de 1,306E-06 a 7,225E-07 cm/s. Essa mistura, quando comparada a mistura sem resíduo e compactada com a mesma energia (0R-NOR), apresentou uma redução de 73,61% no valor do coeficiente de permeabilidade.

Notou-se que os menores valores de permeabilidade alcançadas estão marcados para a mistura 10GA-NOR, onde o resíduo utilizado é o gesso agrícola. A partir desse resultado, presume-se que o comportamento plástico do material teve maior influência na redução da permeabilidade, já que a porosidade e o peso específico aparente seco máximo (γd max) da amostra apresentaram valores maiores em relação as outras duas misturas.

Após essa interpretação de dados, é possível visualizar que comparando as

misturas compactadas com energia normal, inserção do resíduo foi benéfica, uma vez que teve a capacidade de reduzir o coeficiente de permeabilidade da mistura 0R-NOR (solo natural sem adição) de E-06 para a casa de E-07. Entretanto, nenhum dos coeficientes de permeabilidade alcançados para as misturas compactadas com energia normal atingiram valores menores que E-07, conforme solicitado por Boscov (2008)[9], CETESB (1993, apud BOSCOV, 2008)[9], Heineck (2002)[11], Macambira (2002)[12] e Omafra (2003, apud BOSCOV, 2008)[9].

Na Figura 5 pode ser verificado o intervalo de valores obtido para cada ensaio realizado com as misturas de energia modificada, assim como a mediana dos valores.

Ao analisar a mistura 0R-MOD, compactada com energia modificada e sem adição de resíduo, o coeficiente de permeabilidade (k20) passou para o valor de 2,779E-07 cm/s, apontando variações na faixa de 4,082E-07 a 2,406E-07 cm/s. Nota-se que alteração da energia normal para modificada proporcionou a redução da permeabilidade em 91,37%.

A mistura 10LC-MOD apresentou valor de coeficiente de permeabilidade (k20) de 1,116E-07 cm/s. Esse ensaio apresentou variações no valor de k20 que compreendem a faixa de 1,512E-07 a 8,911E-08 cm/s. A mistura quando comparada a 10LC-NOR, apresentou uma redução de 88,74% no valor da permeabilidade quando alterada a energia de normal para modificada.

No que diz respeito a mistura 10GA-MOD, seu coeficiente de permeabilidade ficou na faixa de 6,469E-07 cm/s, com variações que compreendem o intervalo de 7,040E-07 a 5,523E-07 cm/s. Nessa mistura, repara-se que a energia de compactação pouco fez efeito no que tange a redução da permeabilidade, uma vez que a troca de energia provocou uma redução de apenas 23,92% no valor.

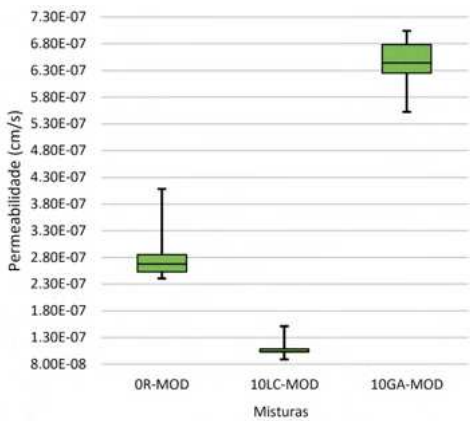


Figura 5. Análise dos dados do ensaio para as misturas compactadas à energia modificada.

Dentre as misturas compactadas com energia modificada, constatou-se que os menores valores de permeabilidade se verificam no traço 10LC-MOD, onde o resíduo utilizado é a lama de cal. Dessa forma, é perceptível que o bom desempenho dessa

mistura quanto a redução da permeabilidade justifica-se pela redução da porosidade do material, através do aumento do peso específico aparente seco máximo (γd max) da amostra compactada.

4 | CONCLUSÃO

Ao fim desse trabalho, verificou-se que embora as misturas não tenham atingido valores de coeficiente de permeabilidade iguais ou inferiores a 1,00E-07 cm/s, conforme requerido pela bibliografia, todos os traços obtiveram valores reduzidos em relação ao traço sem adição de resíduo e compactado com a energia normal (0R-NOR). Pode-se complementar que, a mistura 10 LC-MOD, apresentou valor de k20 na faixa de 1,116E-07 cm/s, demonstrando alguns valores dentro do mínimo requerido ao longo de todo o ensaio.

A energia de compactação quando alterada de normal para modificada, teve influência significativa quando analisada sua variação dentro de um mesmo teor, onde foram atingidos valores de redução de permeabilidade em até 91,37%. Nesse contexto, a adição do resíduo também proporcionou redução da permeabilidade do solo, uma vez que a adição em 10% de gesso agrícola ao solo, por exemplo, reduziu o valor em 73,61%.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

2. _____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

3. _____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

4. _____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

5. _____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

6. _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

7. _____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

8. _____. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

9. BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

10. DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER - ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real**. 1994, 4p

11. HEINECK, Karla S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

12. MACAMBIRA, Indira Q. **Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável**. 2002. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

13. TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3 ed. United States of America: Wiley International, 1995.