

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

LINER PARA IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

* Marcelo Oliveira Caetano¹
Tiago Emanuel de Sá Schuck²
David Lamberti Diehl Camacho³
Luciana Paulo Gomes¹

UTILIZATION OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AS
ALTERNATIVE LANDFILL LINER

Recibido el 3 de septiembre de 2020. Aceptado el 13 de abril de 2021

Abstract

Studies addressing waterproofing systems in landfills, are seeking the replacement of mineral liner (clay) by alternative layers that ensure its tightness, but reduce construction costs and environmental impacts. This research evaluated, using the concept of particle packing, the application of a combination of local soil (SL) from a municipal solid waste disposal area, and construction and demolition waste containing red ceramic (RCD-CV) and / or concrete (RCD-C). From the materials characterization, a particle packing study was performed and the geotechnical parameters of the liners were determined. Their compaction was tested in three different energies: normal, intermediate and modified. Finally, tests were performed to determine the hydraulic conductivity index. Three (3) mixtures with potential application as landfill sealing system can be determined: SL 60% + 40% RCD-C; SL 60% + 40% RCD-CV; SL 60% + 20% RCD-CV + 20% RCD-C. However, after the hydraulic conductivity tests, the $k_{20} = 10^{-7}$ cm/s, required by environmental legislation and indicated by research as a reference for this type of application, the parameter was reached for all alternative liners tested by applying only one compatibility with modified energy. Due to the operational difficulties of implementing this type of procedure in the field and, from the result of $k_{20} = 10^{-7}$ cm/s for normal energy compaction for all evaluated liners, the research concludes that the best application is related to final coverage of landfills.

Keywords: landfill, bottom waterproofing, RCD, alternative landfill liner.

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Brasil.

² Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Brasil.

³ Universidade de Coimbra, Portugal.

* *Autor correspondente:* Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Brasil. Av. Unisinos, 950. CEP 93022-750 - São Leopoldo - RS - Brasil. Email: mocaetano@unisinos.br

Resumo

Estudos relacionados a sistemas de impermeabilização em aterros sanitários, estão buscando a substituição do liner mineral (argila) por camadas alternativas que garantam sua estanqueidade, porém reduzem custos construtivos e impactos ambientais. Esta pesquisa avaliou, utilizando o conceito de empacotamento de partículas, a aplicação de uma combinação de solo local (SL), oriundo de uma área de destinação final de resíduos sólidos urbanos, e resíduos de construção e demolição contendo cerâmica vermelha (RCD-CV) e/ou concreto (RCD-C). A partir da caracterização dos materiais, executou-se um estudo de empacotamento de partículas e fez-se a determinação dos parâmetros geotécnicos dos liners. Testou-se a compactação destes em três diferentes energias: normal, intermediária e modificada. Por fim, fez-se os ensaios para a determinação do coeficiente de permeabilidade. Pode-se determinar três misturas com potencial de aplicação como sistema de impermeabilização de aterros: SL 60% + 40% RCD-C; SL 60% + 40% RCD-CV; SL 60% + 20% RCD-CV + 20% RCD-C. Contudo, após os ensaios de permeabilidade, o $k_{20}=10^{-7}$ cm/s, exigido pela legislação ambiental e indicado por pesquisas como um referencial para este tipo de aplicação, foi alcançado para todos os liners alternativos testados apenas aplicando uma compactação com energia modificada. Devido as dificuldades operacionais de implantação deste tipo de procedimento em campo e, a partir do resultado de $k_{20}=10^{-6}$ cm/s para compactação com energia normal para todos os liner avaliados, a pesquisa concluiu que a melhor aplicação está relacionada a cobertura final de aterros.

Palavras chave: landfill, bottom waterproofing, RCD, alternative landfill liner.

Introdução

O artigo aborda dois aspectos técnicos e ambientais que justificam o desenvolvimento de *liners* alternativos para utilização como sistema de impermeabilização inferior de aterros sanitários. O primeiro, refere-se ao elevado volume de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) gerados nos centros urbanos brasileiros, que apesar do grande potencial de reciclagem, possui baixos índices de reaproveitamento, e acaba por ser disposto sem utilização. O segundo aspecto, refere-se a busca por uma solução tecnicamente adequada e viável economicamente, que substitua a utilização de argila na construção da camada impermeabilizante em aterros sanitários, de forma a reduzir os volumes de exploração deste recurso natural.

Com relação a RCD, a geração brasileira em 2019 foi cerca de 121.000 toneladas/dia. Isto representa um índice de 213.5 kg/habitante.ano (ABRELPE, 2020). Entre os anos de 2010 e 2019 o relatório mostra ainda que houve um incremento de coleta de RCD no Brasil na ordem de 10 milhões de toneladas. Contudo, conforme o relatório da ABRECON (2015), o índice de reciclagem de RCD estimado no Brasil para o ano de 2015 é de cerca de 21% do total gerado. Índice em países da Europa como Holanda e Alemanha chegam até 90% de reciclagem do RCD gerado. Ortiz, Pasqualino e Castells (2010) descrevem que em Portugal e Espanha, o índice de reaproveitamento é de 40%.

Autores como Karpinsk *et al.* (2009); Evangelista *et al.* (2010); Llatas (2011); Mália *et al.* (2011); Ding & Xiao (2014); Caetano, Lambiase e Gome (2016); Caetano, Selbach e Gomes (2016), também destacam que mais de 80% dos RCD gerados em obras podem ser classificados como Classe A. Ou seja, podem ser reaproveitados como agregado miúdo, inclusive na própria obra.

Contudo, há diversas dificuldades em reaproveitamentos destes resíduos. Entre estas pode-se citar: inexistência de um adequado inventário quantitativo e qualitativo destes resíduos; falhas na segregação e classificação; inviabilidade econômica e técnica de reciclagem do resíduo na própria obra (Caetano, Lambiase, Gomes 2016; Caetano; Selbach, Gomes, 2016; Parisi *et al.*, 2015).

Por outro lado, com relação a projeto, instalação e operação de aterros sanitários, no Brasil, a Lei 12305 (BRASIL, 2010) obriga a destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU) em áreas ambientalmente adequadas. Uma das tecnologias mais utilizadas no país é o uso de Aterros Sanitários. De acordo com o relatório da ABRELPE (2020), o Brasil gerou em 2019 cerca de 72 milhões de ton/ano de RSU e um índice per capita de 348.90 kg/hab.ano. Destes, 59.50% foram destinados para aterros sanitários. O restante, 40.50% (cerca de 30 milhões de ton/ano) foram dispostos locais ambientalmente inadequados (lixões e aterros controlados).

Ainda em relação a aterros sanitários, Pessin *et al.* (2002), Chernicharo *et al.* (2003), Burton & Watson-Craik (1998) e Renou *et al.* (2008), relatam que este é o método mais empregado no mundo para disposição final de RSU, além de mais vantajoso economicamente, conforme descrito por Renou *et al.* (2008). Este autor ainda apresenta índices de disposição final em aterros na ordem de 52%, 90% e 95%, para Coréia, Polônia e Tailândia, respectivamente.

Além de vantajoso financeiramente, se devidamente projetado, operado e monitorado, torna-se uma solução segura sob os aspectos técnicos, sanitários e ambientais. Como trata-se de um biodigestor projetado e operado de forma a favorecer a biodegradação anaeróbia, há geração de lixiviados e gases que devem ser devidamente retidos para posterior drenagem e tratamento.

Assim, entre as estruturas obrigatórias para uma operação adequada dos aterros sanitários, podem ser citados: o sistema de drenagem de águas superficiais, impermeabilização inferior e superior/cobertura, sistema de drenagem e tratamento de lixiviados e gases (Pessin *et al.*, 2002).

A função principal das impermeabilizações superiores e inferiores dos aterros sanitários é impedir o vazamento de lixiviados para o solo e lençol freático, eliminar a dissipação dos gases de aterro e evitar a entrada de água da chuva. Elevada permeabilidade na cobertura do aterro permite o ingresso de uma quantidade maior de água da chuva, resultando em um maior volume de lixiviados. Este líquido é altamente tóxico, composto por elevadas concentrações de matéria orgânica e nitrogenada. Existem diversos estudos que identificam as características dos lixiviados

e propostas de tratamento deste efluente. Entre estes pode-se citar: Bertanza *et al.* (1998); Marttinen *et al.* (2002); Ozturk *et al.* (2003); Cheung *et al.* (1997); Calli *et al.* (2005); Gomes *et al.* (2006); Renou *et al.* (2008); Gomes *et al.* (2014).

A composição de um sistema de impermeabilização superior de um aterro sanitário, normalmente é uma combinação entre uma camada drenagem, argila (*liner* mineral), um geossintético (geomebrana de PEAD), solo e gramínia. Para impermeabilização inferior, o usual é a utilização de uma camada de argila (*liner* mineral), um geossintético (geomebrana de PEAD) e uma camada de proteção da geomebrana (geotextil, camada de argila ou pó de brita). Há uma série de critérios geotécnicos para a garantia de durabilidade, estanqueidade, resistência intempéries, resistência mecânica, e compatibilidade com resíduos. Conforme Prim *et al.* (2003), entre estas características estão: espessura da camada, granulometria do solo, baixa permeabilidade, baixo índice de vazios, permeabilidade, capacidade de carga etc.

Com relação ao índice de permeabilidade, parâmetro essencial de controle, Vinayagamoorthy *et al.* (2015) analisaram *liners* minerais submetidos a ensaios de permeabilidade normal e permeabilidade acelerada. Os resultados foram considerados satisfatórios, já que o ensaio de forma acelerada traz redução de espaços na parte estrutural do *liner*. Já a pesquisa de Soares (2012), utilizando um solo saprolítico de filito compactado no ponto ótimo e energia normal, relatam uma permeabilidade de 5×10^{-8} m/s para o revestimento de fundo.

Adicionalmente a estas camadas tradicionais, a utilização de *liners* alternativos para sistemas de impermeabilização inferior em aterros sanitários, é um tema bastante estudado na literatura, como são os casos das pesquisas de Hejazi; Alirezazadeh (2017), Wang *et al.* (2019). Rubinos e Spagnoli (2018) apresentam, em seu artigo, a utilização de diversos tipos resíduos empregados para impermeabilização inferior e superior de aterro sanitário. Os autores incluem o uso de resíduos de cinza de casca de arroz e RCD. Destacam, no entanto, que os resíduos devem ser utilizados com cautela de forma a não prejudicar os *liners*. Conforme Rubinos e Spagnoli (2018), as propriedades químicas do *liner* podem ativar o potencial de lixiviado.

Maritsa *et al.* (2016) utilizou resíduos de mineração tipo Spilitic (material mais arenoso) e bentonita, em diversos teores. Os resultados mostraram que, a mistura com adição de 3% de bentonita atendeu o requisito para impermeabilização inferior da norma de aterros sanitário. Para Daniel & Benson (1990), uma base de impermeabilização adequada deve haver uma união de testes laboratoriais de compactação usando normas e métodos apropriados. Aliado a isso, a compactação de campo deve ser o mais próximo possível daquela executada no laboratório, para assim ter um resultado satisfatório de compactação. Ainda os mesmos autores citam a dificuldade de encontrar um controle de compactação no campo, no que diz respeito ao número de passadas do rolo, pois muitas vezes precisam ser realizados várias vezes.

Assim, para garantir o controle tecnológico na execução das impermeabilizações é importante entender pelo menos dois conceitos de mecânica dos solos: estabilização do solo e o empacotamento. Segundo Proctor (1933) e Vargas (1978), a estabilização de solos é definida por um processo que se executa no solo para obter uma resistência superior a cargas e desgastes por meio de processos de compactação, correção de granulometria, adições de cimento ou cal, de forma que ocorra cimentação ou aglutinação das partículas. A estabilização de solos é classificada em: estabilização física, química e mecânica, utilizada para melhorar ou alterar as propriedades do solo natural.

Para Villibor (1982), a estabilização pode ser entendida como a alteração de qualquer tipo da propriedade do solo, desde que o mesmo apresente uma melhora no comportamento do ponto de vista da engenharia. Neste contexto, há um tratamento artificial que se refere a uma adição ou energia a ser aplicada no solo. O mesmo autor cita melhoras nas propriedades geotécnicas do solo, como aumento de resistência ao carregamento, redução de compressibilidade, redução de sensibilidade à ação de variações externas principalmente umidade, aumento ou diminuição da permeabilidade, garantir a permanência de cargas durante um longo tempo.

A estabilização granulométrica tem como característica mudar ou alterar as propriedades do solo, no que diz respeito a textura. A técnica de estabilização de solo é usada na correção de granulometria. A correção granulométrica, é realizada para alterar e melhorar as diferentes partículas do solo, cada fração passante é importante para o que se pretende aprimorar. De acordo com Vargas (1978), a estabilização granulométrica é muito utilizada para a pavimentação, onde sua curva granulométrica e sua plasticidade devem ficar corrigidas, adicionando ou retirando certas frações de constituintes, com a finalidade da curva se enquadrar dentro dos limites indicados, para que se tenha a forma da curva de Talbot, e a plasticidade seja reduzida aos limites especificados.

A estabilização mecânica, conforme Nogueira (2005), é obtida pela compactação e redução do volume de vazios. Com isso, a camada possui maior densidade, aumentando a resistência ao cisalhamento, reduzindo da permeabilidade e compressibilidade. Em laboratório, o ensaio de compactação tem a finalidade de determinar a função da variação da massa específica seca com o teor de umidade, considerando uma energia escolhida por um processo dinâmico.

Por fim, o empacotamento de partículas foi estudado primeiramente por Féret em (1892), Fuller em 1907, Andreassen & Andersen (1930) e Furnas (1931). Esse termo pode ser interpretado como a capacidade de partículas com diferentes tamanhos e grãos se acomodarem em um determinado volume conhecido. Segundo Ortega *et al.* (1997), o empacotamento denso de partículas entende-se na formação de estruturas de partículas com grandes espaços que são ocupados por partículas com espaços menores. Com isso, o empacotamento possui alguns fatores que alteram nas suas propriedades, entre eles: o formato, tamanho e rugosidade superficial da partícula.

Considerando estes temas, o artigo objetiva estudar a substituição de um solo argiloso (comumente utilizado) por um composto de solo local e agregado produzido da reciclagem do RCD, para utilização como sistema de impermeabilização inferior em aterros sanitários.

Metodologia

A pesquisa busca o desenvolvimento de uma camada de impermeabilização alternativa a argila, capaz de garantir a estanqueidade do aterro sanitário. Para tal, utilizou-se os conceitos de empacotamento de partículas para associar as propriedades de um solo arenoso oriundo do aterro sanitário de São Leopoldo e Resíduos de construção e demolição. O trabalho foi executado em escala de bancada, considerando as etapas de caracterização física dos materiais, ensaios de compactação e permeabilidade dos *liners*.

Origem e beneficiamento dos materiais

Os solos que compõem os *liners* estudados são originados da área de um aterro sanitário privado localizado no município de São Leopoldo/RS, Brasil. A área de disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) está em operação desde de novembro de 2011 e recebe cerca de 1.000 toneladas de RSU por dia. O local compreende uma área total de 1.350.000 m². Destes, 600.000 m² são utilizados para a atividade de disposição de resíduos.

Foram utilizados dois tipos de solos encontrados na área estudo, sendo o primeiro, disponível em pouco volume na área., referente a um solo argiloso denominado LMP (*Liner Mineral Padrão*), utilizado na impermeabilização de uma parte do aterro sanitário. Devido suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, o solo foi considerado o material de referência. Já o segundo, denominado solo local (SL), disponível em elevado volume, possui características de areia, não possuindo capacidade hidráulica e mecânica que permitiria a utilização como impermeabilização inferior ou superior.

Os agregados reciclados foram produzidos a partir de resíduos da construção e demolição (RCD), coletados no laboratório de construção civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São originados de paredes de alvenarias de aproximadamente 1 m² (corpos de prova utilizados para estudos na graduação em Engenharia Civil e Arquitetura). Estas paredes foram desmontadas e separadas de acordo com sua fabricação, em bloco cerâmico RCD-CV (oriundo de cerâmica vermelha) e RCD-C (oriundo de concreto).

Os RCD foram beneficiados utilizando um moinho de mandíbulas e moinho de facas, para redução da granulometria até material passante na peneira 4.8mm. Finalmente, utilizou-se um moinho de rolo, com objetivo de conseguir uma granulometria das partículas similares a uma areia fina (Figura 1).



Figura 1. Processo de beneficiamento do RCD

Caracterização física dos materiais

A Tabela 1 apresenta os parâmetros físicos analisados e as respectivas determinações e metodologias analíticas utilizados para caracterização dos materiais

Tabela 1. Caracterização Física dos Materiais.

Parâmetros Físicos	Determinação / Método
Teor de umidade in situ (ω)	NBR 6457 (ABNT, 2016a).
Peso específico natural (γ_n)	-
Peso específico seco (γ_d)	-
Peso específico real dos grãos (γ_s)	MOURA E FIGUEIREDO, 2002
Limite de plasticidade (LP)	NBR 7180 (ABNT, 1984b)
Limite de liquidez (LL)	NBR 6459 (ABNT, 1984a)
Índice de plasticidade (IP)	NBR 7180 (ABNT, 1984b)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016)

O empacotamento de partículas

O estudo do empacotamento das partículas foi realizado com a utilização do software *EMMA Mix Analyzer*. Esse software é usualmente empregado para empacotamento de concreto de alta resistência. A fim de obter o menor índice de vazios possível, e assim ter uma resistência a compressão alta para o concreto, o software trabalha como princípio para sua análise com o método de Andreasen modificado e Andreasen. Para esta pesquisa, optou-se pelo método de Andreasen Modificado, possibilitando a utilização das partículas mais próximas de sua forma real.

A partir das frações e granulometrias encontradas na etapa de caracterização das amostras, inseriu-se os resultados no programa e definiu-se as curvas granulométricas ideais (teóricas), de acordo com as frações fornecidas ao programa. Além de, avaliar o Solo Mineral Padrão (LMP) e o Solo Local (SL), testou-se os melhores ajustes de empacotamento para as combinações entre SL, RCD-CV e RCD-C. Os resultados e curvas de empacotamento serão mostrados no capítulo de resultados.

Procedimento de compactação

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com NBR 7182 (ABNT, 2016). Foram ensaiados o solo local (SL), o *liner* mineral padrão (LMP), e os *liners* alternativos definidos na etapa metodológica anterior (combinações entre SL, RCD-CV e RCD-C).

O estudo englobou ensaios de compactação adotando a energia normal, intermediária e modificada. Estes ensaios são justificados devido a exigência de um teor baixo de permeabilidade para aterros sanitários ($k = 10^{-7}$ cm/s), de acordo com a Diretriz Técnica nº 04/2017 da FEPAM - Órgão Ambiental do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (FEPAM, 2017).

Os corpos de prova foram moldados com o reuso de solo, para encontrar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo. Para as diferentes energias, foi utilizado o mesmo cilindro de Proctor, variando apenas o número de golpes. Para energia normal foram 3 camadas de 26 golpes com o soquete de 2.5 kg; para a energia intermediária foi moldado com 3 camadas de 21 golpes com o soquete de 4.5 kg; para a energia modificada foram 5 camadas de 27 golpes com soquete de 4.5 kg. Após a compactação de cada ponto, foi retirada uma cápsula para coletar o teor de umidade do corpo de prova, para obter a curva de compactação.

Determinação do coeficiente de permeabilidade

Para determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos, foi utilizado a NBR 14545 (ABNT, 2000), Método de Ensaio B. Foram moldados corpos de prova, utilizando diferentes energias de compactação, para as combinações LMP, SL, RCD-CV e RCD-C; totalizando 15 corpos de prova. Fez-se a medição da diferença de altura de água inicial h_0 e final h_f a cada 10 minutos (600s), até o valor se manter constante (não variar entre +/- 0.4 cm). Posteriormente, executou-se de 5 a 6 medições por corpo de prova. Para compactar os corpos de prova, foram reduzidas as medidas iniciais do cilindro Proctor (12 cm), para o cilindro Marshall (8 cm), e utilizado o mesmo soquete de ensaio Marshall. Com isso, foi transformado a energia do ensaio de compactação para energia do ensaio Marshall. Esta adaptação do método (redução do tamanho do corpo de prova), é justificada pela diminuição do tempo para a percolação da água no corpo de prova para saturação.

Análise Estatística

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente utilizando o software SPSS versão 22 para Windows. As análises de variância seguiram os testes ANOVA e Tuckey. Todas as hipóteses foram testadas considerando 5% de nível de probabilidade ($p < 0.05$).

Resultados

Ensaio de caracterização

A Tabela 2 apresenta as características físicas do Solo Local (SL) e *Liner* Mineral Padrão (LMP).

Tabela 2. Caracterização física do SL e LMP

Parâmetros Físicos	Unidade	SL	LMP
Umidade	%	15.74	18.75
Peso Específico Natural (γ_n)	kN/m ³	17.13	16.10
Peso Específico Aparente Seco (γ_d)	kN/m ³	14.80	13.56
Peso Específico Real dos Grãos (γ_s)	kN/m ³	26.36	26.20
Índices de Vazios (e)	-	0.78	0.93
Porosidade (η)	%	43.85	48.26
Grau de Saturação (S)	%	48.35	48.73
Peso Específico Saturado (γ_{sat})	kN/m ³	17.13	16.10
Limite de plasticidade (LP)	%	20.00	28.00
Limite de liquidez (LL)	%	28.00	43.00
Índice de plasticidade (IP)	%	8.00	15.00

Legenda: Solo Local (SL); *Liner* Mineral Padrão (LMP).

A partir da obtenção do índice de plasticidade, o Solo Local pode ser considerado medianamente plástico e o *Liner* Mineral Padrão altamente plástico. Corroborando com estes resultados, a partir dos resultados apresentados na Figura 2 e Tabela 3, conforme esperado devido a origem da rocha da área, percebe-se que a granulometria do Solo Local apresentou menos de 10% de argila, com elevada porcentagem de silte e areia fina. Estas características, limitam a utilização deste tipo de solo como barreiras impermeáveis de aterros sanitários. Por outro lado, o *liner* mineral padrão (solo comumente utilizado para impermeabilização inferior), apresentou aproximadamente 30% de argila, o que contribuiu para o índice de plasticidade obtido.

Conforme as pesquisas de Gomes; Martins (2003) e Costa (2006), estas características físicas do LMP são consideradas aptas para serem utilizadas como impermeabilização inferior de aterros sanitários. Gomes; Martins (2003) e Costa (2006), citam em suas pesquisas, solos argilosos para confecção de camada impermeável em aterros sanitários. Entre as características os solos apresentavam quantidade de finos entre 15% a 30% e índice de plasticidade entre 3% e 10%. Daniel (1993) relata que a

porcentagem de finos deve ser entre 20% e 30% e um índice de plasticidade entre 7% e 10%. Ainda conforme os autores, estas propriedades físicas contribuem para uma menor permeabilidade da camada, atestando a capacidade do solo para ser utilizado como sistema de impermeabilização inferior.

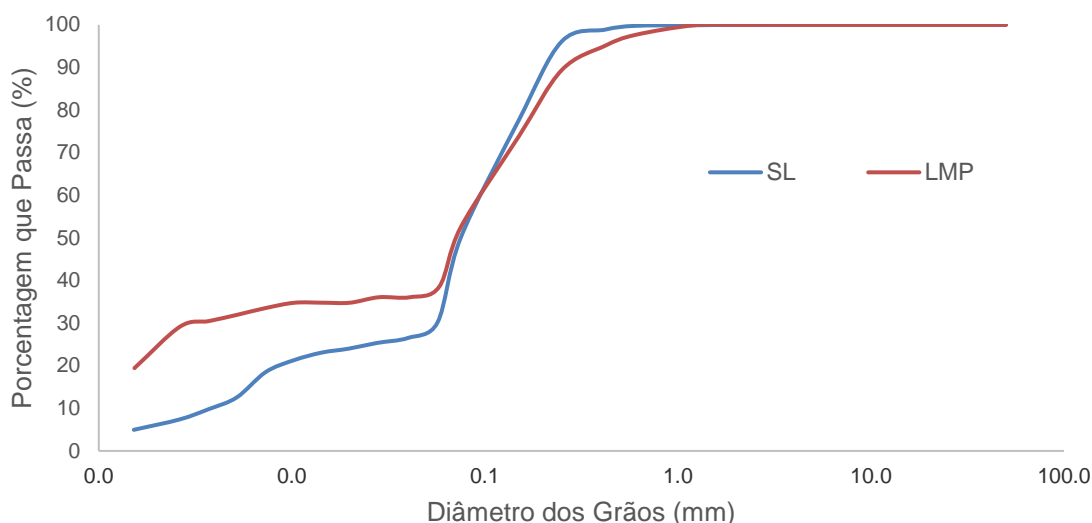


Figura 2. Curva granulométrica do SL e LMP
Legenda: Solo Local (SL); Liner Mineral Padrão (LMP).

Tabela 3. Composição granulométrica do SL e LMP.

Composição Granulométrica	SL	LMP
Pedregulho (%)	0.00	0.00
Areia Grossa (%)	0.23	2.37
Areia Média (%)	22.10	23.78
Areia Fina (%)	47.59	35.37
Silte (%)	22.69	9.29
Argila (%)	7.40	29.20

Legenda: Solo Local (SL); Liner Mineral Padrão (LMP).

De acordo com as composições granulométricas de cada solo apresentado, utilizou-se o método HRB (*highway research board*), dessa forma o solo SL pode ser classificado como A-5 (3) corresponde ao solo siltoso de alta compressibilidade. Entretanto, o LMP foi classificado como A-7-6 (5), ou seja, argila de alta compressibilidade e alta plasticidade.

Embora o LMP apresente características compatíveis para uso como barreiras impermeáveis de aterros sanitários, em função da quantidade disponível deste solo na área em estudo, somado a necessidade de ampliação da estrutura disposição final de RSU e, conseqüentemente, necessidade de importação de solo argiloso para construção das camadas de impermeabilização; fez-se uma proposta de mistura do SL e RCD. Com isso, buscou-se, através do empacotamento das partículas, promover um grau de permeabilidade compatível as características do LMP. Para tal, fez-se uma avaliação das propriedades físicas dos RCD, os quais estão apresentados nas Tabelas 4 e 5 e na Figura 3.

Tabela 4. Caracterização física dos resíduos de construção e demolição (RCD).

Parâmetros Físicos		RDC-C	RCD-CV
Umidade	%	1.45	1.13
Peso Específico (γ_n)	kN/m ³	13.30	11.60
Peso Específico Aparente Seco (γ_d)	kN/m ³	13.11	11.47
Peso Específico Real dos Grãos (γ_s)	kN/m ³	26.65	26.51
Índices de Vazios (e)	-	0.98	1.27
Porosidade (η)	%	49.49	55.95

Legenda: RCD-CV (oriundo de cerâmica vermelha) e RCD-C (oriundo de concreto).

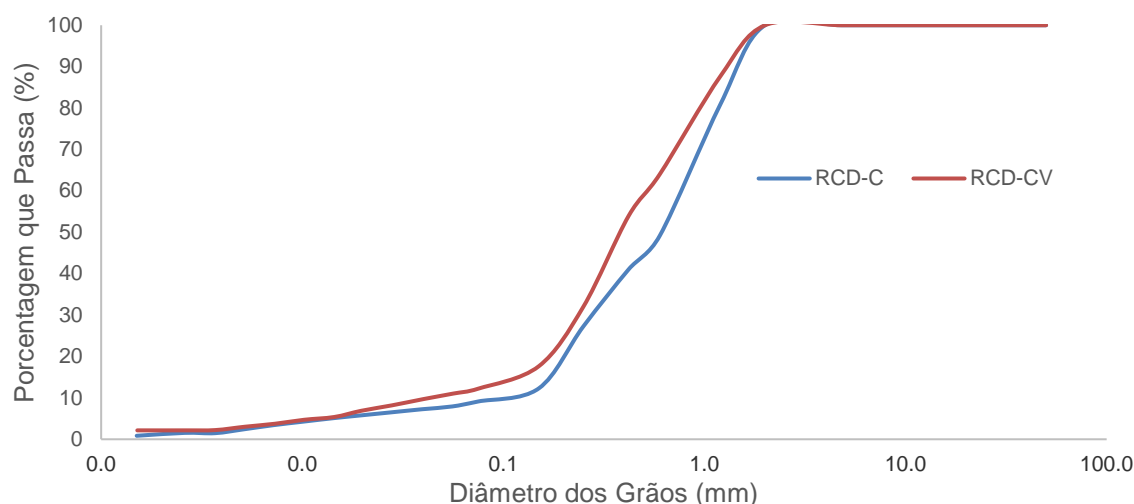


Figura 3. Curva granulométrica dos resíduos.

Legenda: RCD-CV (oriundo de cerâmica vermelha) e RCD-C (oriundo de concreto).

Tabela 5. Composição granulométrica dos resíduos de construção e demolição (RCD).

Composição Granulométrica	RCD-C	RCD-CV
Pedregulho (%)	0.00	0.00
Areia Grossa (%)	50.81	35.97
Areia Média (%)	36.90	46.40
Areia Fina (%)	4.35	6.58
Silte (%)	6.39	8.90
Argila (%)	1.54	2.15

Legenda: RCD-CV (oriundo de cerâmica vermelha) e RCD-C (oriundo de concreto).

Estes resultados de caracterização são similares aos estudos apresentados por Leite (2007), Jiménez et al. (2011), Arisha et al. (2018), Cabalar; Zardikawi; Abdulnafaa (2019), Jie Li (2019). Com isso, percebe-se certa padronização nas composições granulométricas dos RCD.

As características físicas apresentadas nas Tabelas 4 e 5 e a Figura 3, mostram similaridade entre as curvas granulométricas do RCD-C e RCD-CV. Fazendo uma analogia a classificação de solo pelo método HRB (*highway research board*), classifica-se o RCD-CV como areia fina A-3 (0), e o RCD-C como solos granulares sem finos A-1-b (0).

Determinação das camadas considerando o empacotamento de partículas

Os dados de entrada do software *EMMA Mix Analyzer* levaram em consideração as caracterizações físicas do SL, RCD-C e RCD-CV. Foram utilizadas na análise os resultados dos seguintes parâmetros: análise granulométrica, porosidade e peso específico real dos grãos.

Adotou-se, ainda, um fator “q” igual a 0.37. Esse “q” refere-se a um coeficiente de distribuição de partículas variável para cada material, conforme relatado por Dinger e Funk (1995). A partir disso, foram geradas as curvas de ajustes para cada mistura. As melhores combinações foram obtidas para as seguintes composições: 60% SL + 40% RCD-CV; 60% SL + 40% RCD-C; 60% SL + 20% RCD-CV + 20% RCD-C.

As Figuras 4-6 mostram as curvas geradas. A curva em vermelho, representa o padrão proposto pelo software conforme teoria de Andreassen Modificado. Em azul, a curva gerada a partir dos dados de granulometria, porosidade e peso específico real dos grãos dos materiais estudados nesta pesquisa.

O ideal seria um perfeito ajuste entre estas curvas azul e vermelha, o que não ocorre para nenhum material testado. Contudo, para todos os materiais, a fração mais fina está adequadamente ajustada a curva padrão. E, com isso, para o objetivo desta pesquisa, este comportamento foi considerado satisfatório.

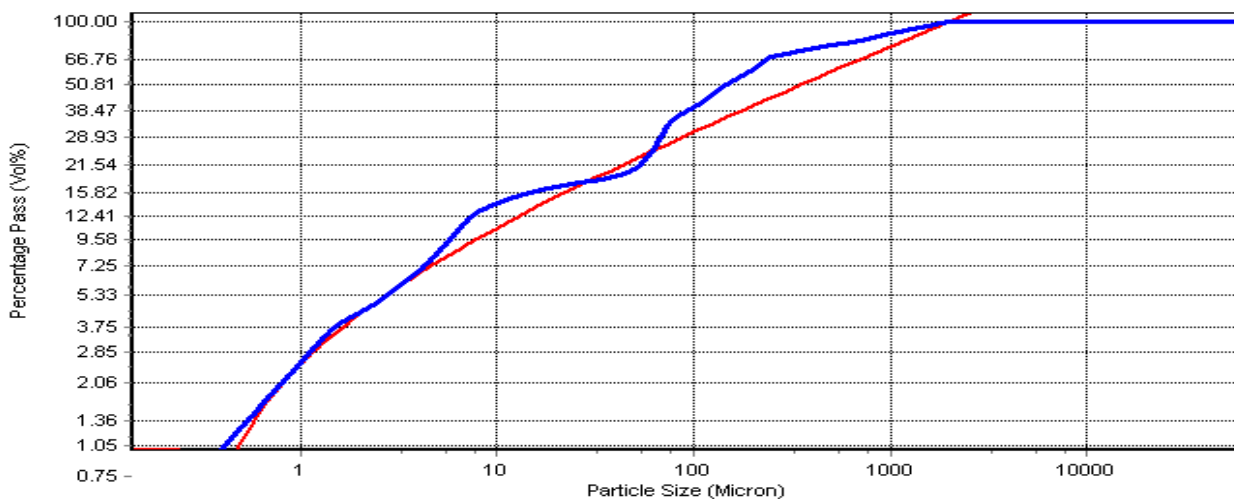


Figura 4. Distribuição da curva com 60% SL e 40% RCD-C.

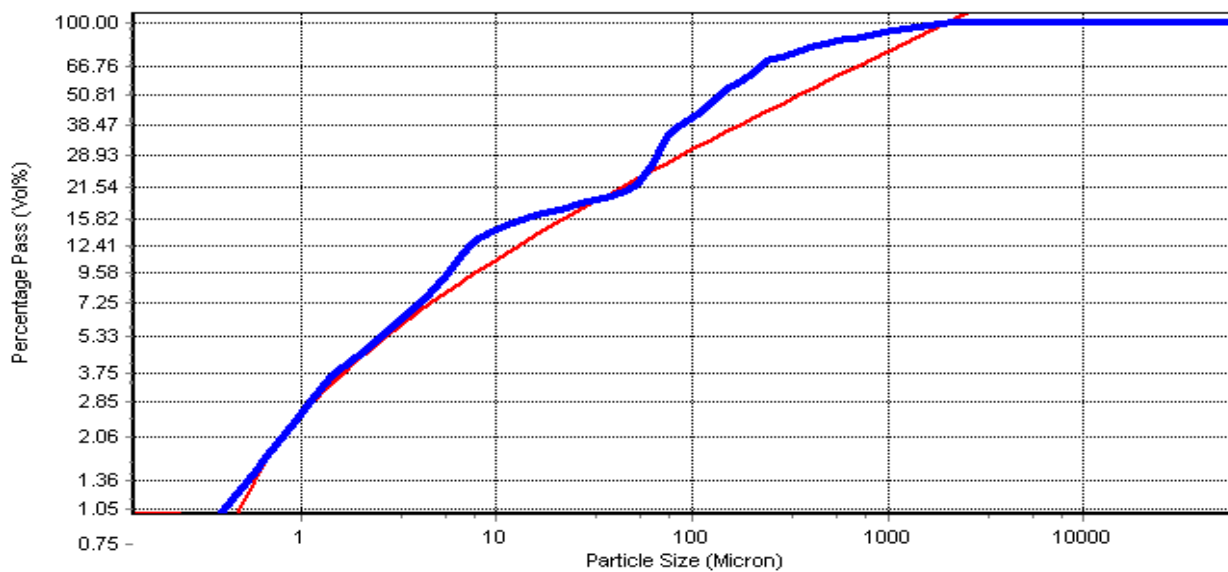


Figura 5. Distribuição da curva com 60% SL e 40% RCD-CV.

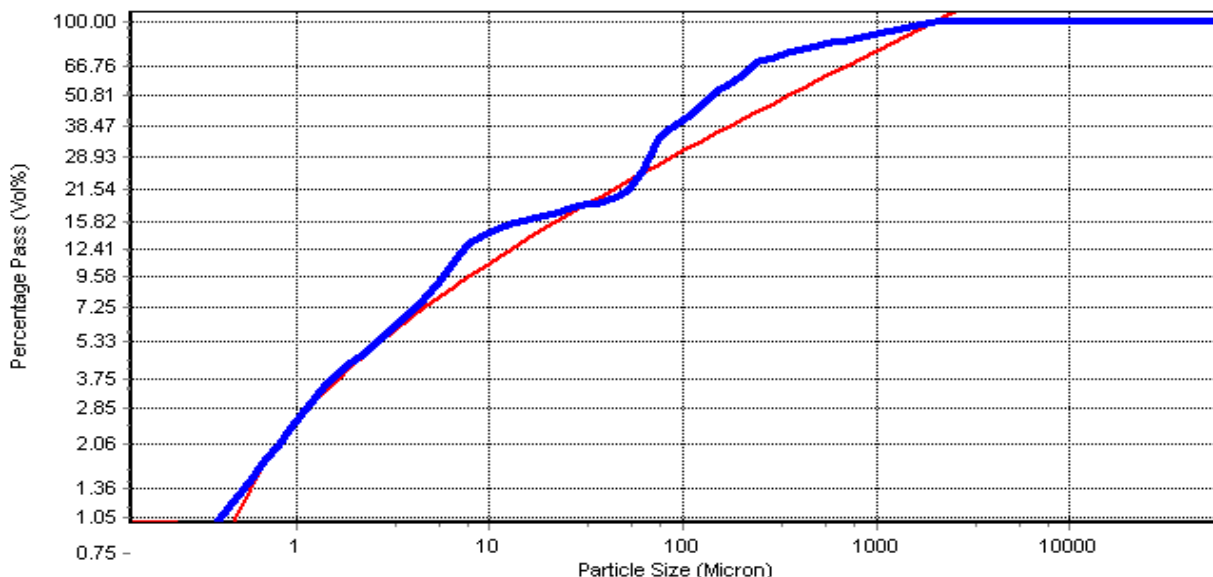


Figura 6. Distribuição da curva com 60% SL, 20% RCD-C e 20% RCD-CV.

Ensaio de compactação

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de compactação para o *Liner Mineral Padrão* (LMP). Para determinar os pontos de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, foram obtidos os valores máximos de cada curva gerados pelo Software Microsoft Excel.

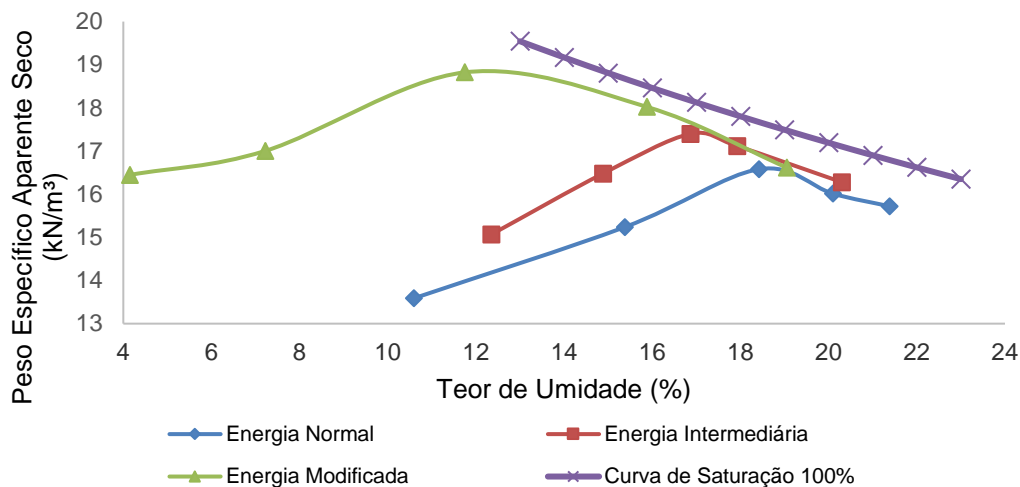


Figura 7. Ensaio compactação para a camada LMP.

O valor obtido para a umidade ótima com o emprego de energia normal foi de 18%, o peso específico aparente seco máximo de 16.60 kN/m³. Para a energia intermediária foi de 17% e 17.50 kN/m³, e para energia modificada foi de 12% e 18.80 kN/m³. A Figura 8 apresenta o resultado dos ensaios de compactação do Solo Local (SL).

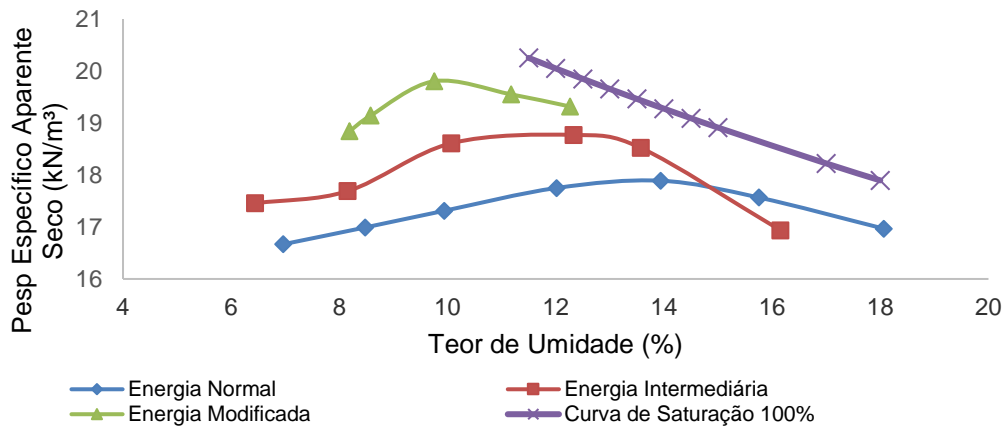


Figura 8. Ensaio compactação para a Camada SL.

O valor obtido para a umidade ótima ao ser empregado a energia normal foi de 14%, o peso específico aparente seco máximo de 17.90 kN/m³. Para a energia intermediária foi de 12% e 18.80 kN/m³, e para energia modificada foi de 10% e 19.70 kN/m³. A Figura 9 apresenta as curvas de compactação para 60% SL+40% RCD-C. Para a energia intermediária foi de 12% e 18.80 kN/m³.

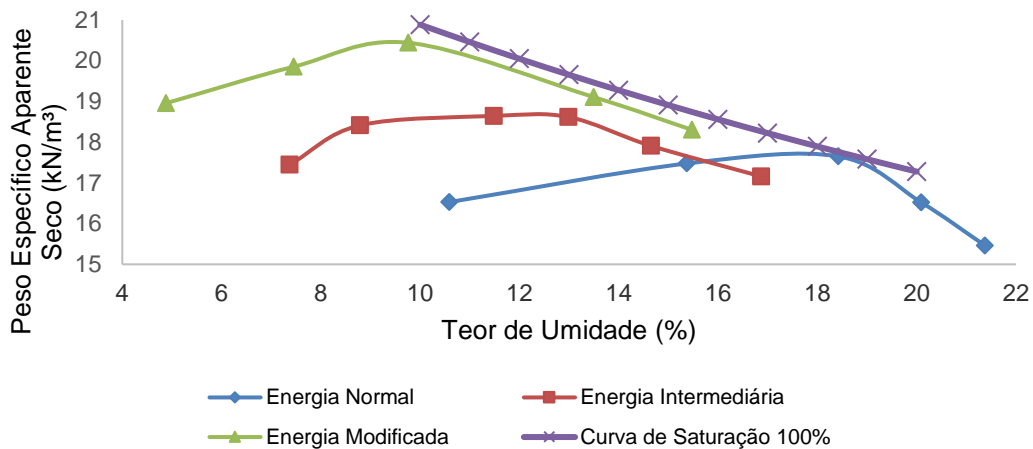


Figura 9. Ensaio compactação para a camada com 60% SL+40% RCD-C.

O valor obtido para a umidade ótima com o emprego de energia normal foi de 18.50%, o peso específico aparente seco máximo de 17.70 kN/m³. Para a energia intermediária foi de 13% e 18.60 kN/m³, e para energia modificada foi de 9.50% e 20.50 kN/m³. A Figura 10 demonstra as curvas de compactação para 60% SL+40% RCD-CV.

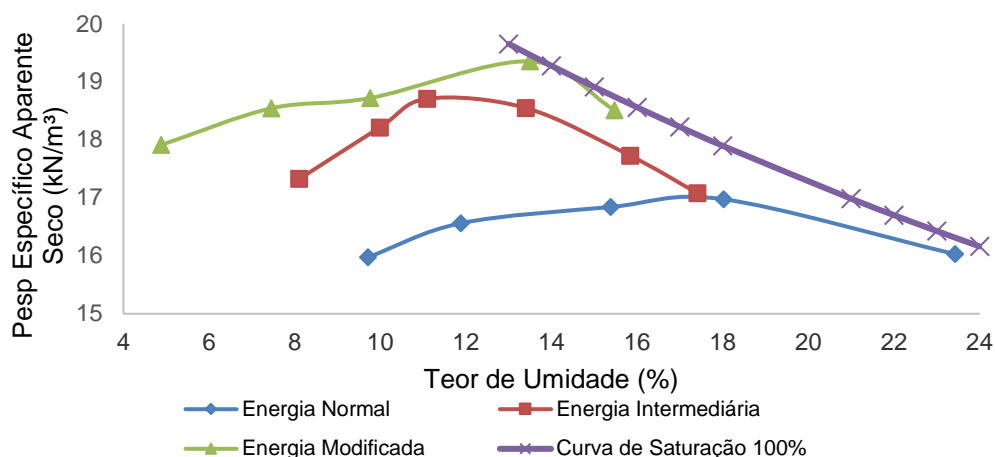


Figura 10. Ensaio compactação para a camada com 60% SL+40% RCD-CV.

O valor para a umidade ótima para a energia normal foi de 17.50%, o peso específico aparente seco máximo de 17.00 kN/m³. Para a energia intermediária foi de 11.50% e 18.70 kN/m³, e para a energia modificada foi de 12.50% e 19.00 kN/m³. A Figura 11 apresenta as curvas para 60% SL+20% RCD-C+20% RCD-CV.

O valor para a umidade ótima da energia normal foi de 13%, o peso específico aparente seco máximo de 17.70 kN/m³. Para a energia intermediária foi de 12.50% e 18.80 kN/m³, e para a energia modificada foi de 10% e 19.60 kN/m³.

Em todos os gráficos apresentados percebe-se uma redução do teor de umidade, à medida que aumenta a energia de compactação. Uma das primeiras pesquisas que relatou este fenômeno foi Mitchell; Hooper; Campanella (1966). Os autores apresentaram em sua pesquisa a redução do teor de umidade e aumento da energia de compactação para o estudo de siltes. Este efeito acontece porque a medida que aumenta a energia aplicada, ocorre a diminuição do volume de vazios entre as partículas, aumentando o arranjo dos grãos e diminuindo a lubrificação (água) entre as camadas de solo na moldagem do corpo de prova.

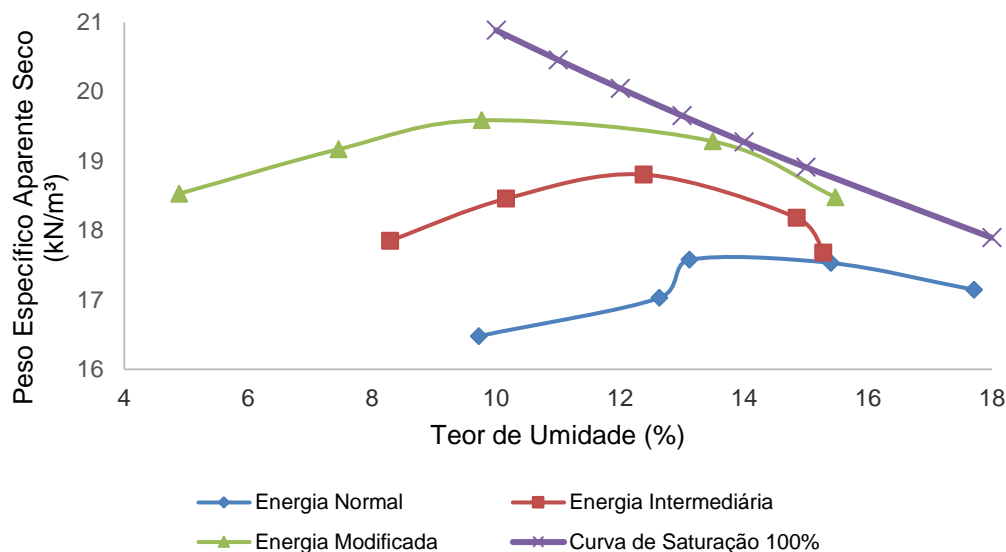


Figura 11. Ensaio compactação para a camada com 60% SL+20% RCD-CV 20% RCD-C.

Daniel & Benson (1990), analisaram a energia de compactação em três diferentes tipos de solos que comprovam a teoria de Mitchell; Hooper; Campanella (1966). Além disso, os autores ainda determinaram que a zona ótima aceitável de compactação está entre os pontos de viragem da curva de compactação (ramo úmido e ramo seco). Em teoria, isso ocorre pois quanto maior a energia de compactação, mais rapidamente os vazios de ar são preenchidos, e com isso, há necessidade de menos água. Por outro lado, uma menor energia, necessita de mais água para o mesmo efeito.

Relacionado a área de *liners* para aterros de resíduos sólidos, Gomes e Martins (2003), sugerem a compactação a cada 20 cm, totalizando 60 cm de *liner*. O objetivo é atingir um coeficiente de permeabilidade compatível com a legislação ou norma técnica. Conforme Day & Daniel (1985), quando isto não é possível com o solo local, importa-se argila. A compactação em campo, conforme os autores, é obtida utilizando rolo, sendo que o número de passadas está relacionado a garantia da impermeabilização da camada. Um resumo dos resultados obtidos nas Figuras 7 - 11 é apresentado na Tabela 6.

O teste ANOVA e Tuckey por tipo de *liner*, desconsiderando a energia de compactação e considerando o intervalo de confiança de 95% ($p > 0.05$), mostra que não há diferenças significativas para nenhum parâmetro físico analisado (peso específico aparente $p = 0.615$; umidade ótima $p = 0.582$; índice de vazios $p = 0.666$; porosidade $p = 0.696$). Isto significa dizer que, as propriedades físicas dos *liners* estudados são similares entre si. Este resultado, demonstra o potencial de utilização do *liner* alternativo estudado por este artigo.

Tabela 6. Resultado dos ensaios de compactação para os *liners* estudados.

Nomenclatura/Energia aplicada	Peso Específico Aparente seco Máximo (kN/m ³)	Umidade Ótima (%)	Índice de Vazios (e)	Porosidade (%)
SL - Energia Normal	17.90	14.00	0.47	32.20
SL - Energia Intermediária	18.80	12.00	0.40	28.79
SL - Energia Modificada	19.70	10.00	0.34	25.38
LMP - Energia Normal	16.60	18.00	0.58	36.64
LMP - Energia Intermediária	17.50	17.00	0.50	33.21
LMP - Energia Modificada	18.80	12.00	0.39	28.24
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Normal	17.70	18.50	0.49	32.95
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Intermediária	18.60	12.00	0.42	29.55
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Modificada	20.50	9.50	0.29	22.35
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Normal	17.00	17.50	0.55	35.61
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Intermediária	18.70	11.50	0.41	29.17
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Modificada	19.00	12.50	0.39	28.03
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Normal	17.70	13.00	0.49	32.95
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Intermediária	18.80	12.50	0.40	28.79
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Modificada	19.60	10.00	0.35	25.76

Contudo, outro teste ANOVA e Tuckey ($p > 0.05$), desconsiderando o tipo de *liner* e considerando os diferentes tipos de energias de compactação, mostrou diferenças significativas para todos os parâmetros físicos analisados (peso específico aparente $p = 0.000$; umidade ótima $p = 0.005$; índice de vazios $p = 0.000$; porosidade $p = 0.000$). Ou seja, conforme esperado, a energia de compactação melhora as características físicas dos *liners*.

Assim, a partir desses resultados, destaca-se o o *liner* SL 60% e 40% RCD-C, na energia modificada. Esse ensaio apresentou elevado peso específico, baixa umidade ótima e menor índice de vazios.

Ensaio de permeabilidade

Os resultados encontrados no ensaio de permeabilidade estão apresentados na Tabela 7.

No Brasil, o Órgão Ambiental do Estado do Rio Grande do Sul FEPAM (2017) exige um coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-7} cm/s, para construção de sistemas de impermeabilização inferior em aterros sanitários. Gomes, Martins (2003) também relatam em sua pesquisa este índice como o ideal para *liners* minerais aplicados a estas estruturas.

Tabela 7. Resultados dos testes para determinação do coeficiente de permeabilidade.

Nomenclatura/Energia aplicada	Coeficiente de Permeabilidade k_{20} (cm/s)
SL - Energia Normal	2.86×10^{-6}
SL - Energia Intermediária	2.96×10^{-6}
SL - Energia Modificada	1.90×10^{-7}
LMP - Energia Normal	9.79×10^{-7}
LMP - Energia Intermediária	9.77×10^{-7}
LMP - Energia Modificada	9.37×10^{-7}
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Normal	1.36×10^{-6}
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Intermediária	1.59×10^{-6}
SL 60% e 40% RCD-C - Energia Modificada	5.51×10^{-7}
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Normal	1.05×10^{-6}
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Intermediária	1.46×10^{-6}
SL 60% e 40% RCD-CV - Energia Modificada	9.96×10^{-7}
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Normal	6.35×10^{-6}
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Intermediária	8.30×10^{-6}
SL 60% e 20% RCD-CV e 20%RCD-C - Energia Modificada	9.37×10^{-7}

Neste sentido, avaliando o enquadramento destes critérios aos resultados obtidos e apresentados na Tabela 7, percebe-se que o *liner* LMP atende a estas especificações para todas as energias de compactação testadas, devido ao elevado teor de argila e silte. O restante dos *liners* conseguem um coeficiente de permeabilidade nesta ordem, porém, com energia de compactação modificada.

Conforme Mitchell; Hooper; Campanella (1966) esse efeito é possível com o aumento da energia de compactação e, conseqüentemente, redução do volume de vazios de solo. Como resultado, ocorre uma redução da permeabilidade, já que esta varia diretamente com a área de seção dos poros.

Entretanto, índices de permeabilidade maiores já eram hipóteses da pesquisa, utilizando o RCD nas composições dos *liners*. Rosa e Santos (2016) executaram ensaios para determinação da permeabilidade do Resíduo de Construção e Demolição Reciclado, utilizando permeômetro de carga constante. Os resultados mostraram que o aumento do grau de compactação e a redução do índice de vazios, promoveram uma redução do coeficiente de permeabilidade, chegando ao máximo de 1.835×10^{-4} cm/s.

Percebe-se, no entanto, que a mistura com solo local (SL) e o estudo de empacotamento executado, melhorou as condições de impermeabilidade dos *liners* alternativos. Mesmo não atendendo aos critérios técnicos para as compactações normais e intermediárias, os índices de permeabilidade obtidos foram de 10^{-6} cm/s.

Por fim, cabe ainda o relato de que, além da qualidade e tipo de material utilizado, o atendimento a este requisito depende de um adequado controle de qualidade na execução do sistema de impermeabilização. Como exemplo, cita-se a pesquisa de Benson *et al.* (1999). Os autores avaliaram 85 argilas compactadas em escala real nos Estados Unidos para uso em *liners*. Destas, apenas 74% atenderam o coeficiente de permeabilidade 10^{-7} cm/s, sugerido pela norma. A pesquisa apontou falhas no sistema de revestimento relacionado a execução e controle da umidade de compactação.

Conclusões

Ao aplicar o sistema de impermeabilização de um aterro sanitário, a substituição do *liner* com argila buscando a minimização dos impactos ambientais e a redução de custos operacionais de um aterro sanitário, é um tema destaque na área de geotecnia ambiental. O desafio é desenvolver um *liner* alternativo que garanta estes princípios mantendo as características técnicas necessárias para manutenção da impermeabilização do sistema.

Nesta pesquisa, o atendimento dos *liners* alternativos aos critérios técnicos mínimos exigidos para sistemas de impermeabilizações inferiores em aterros sanitários, principalmente no que se refere ao coeficiente de permeabilidade $k_{20}=10^{-7}$ cm/s, somente foi obtido utilizando compactação com energia modificada.

Sabe-se, no entanto, que a transposição de um experimento escala de laboratório para escala real, nem sempre é possível de reprodução. Neste caso, a energia modificada é difícil de ser executada em campo. Em teoria, esse grau de energia, pode ser obtida com o aumento do número de passadas do rolo compactador e com a redução da espessura das camadas de compactação. Contudo, envolveria um maior custo operacional.

Por outro lado, a exigência de permeabilidade para um sistema de impermeabilização superior / cobertura final é menor. Assim sendo, considerando os resultados obtidos de coeficiente de permeabilidade dos *liners* desenvolvidos nessa pesquisa, é possível a aplicação destas misturas considerando uma compactação com energia normal, sendo mais facilmente empregado em campo.

A partir disso, pode-se concluir que a combinação de solo local, oriundo de uma área de disposição final de resíduos sólidos urbanos, e RCD, mostrou-se com potencial para utilização como sistema de impermeabilização superior e inferior em aterros sanitários. Utilizando o conceito de empacotamento de partículas, pode-se determinar três misturas que podem ser utilizadas, sendo: SL 60% + 40% RCD-C; SL 60% + 40% RCD-CV; SL 60% + 20% RCD-CV + 20% RCD-C.

Finalmente, cabe uma reflexão quanto a ampliação das pesquisas de *liners* alternativos com RCD envolvendo a incorporação de outros materiais que permitam um maior espectro de granulometrias, além da evolução de testes utilizando outras energias de compactação. Da mesma forma, buscando uma aproximação entre os resultados de laboratório e de campo, o desenvolvimento de metodologias e procedimentos para instalação destes *liners*, em campo, em escala piloto e/ou real. Como resultado desta combinação de pesquisas, pode-se ter uma resposta mais aplicável da possibilidade de utilização deste tipo de camada de impermeabilização em aterros sanitários.

Referências bibliográficas

- Abrecon, Associação Brasileira para reciclagem de resíduos da Construção Civil e Demolição, (2015), *Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015*, Abrecon, São Paulo, SP, 30p. Acesso em: 14 de janeiro de 2021, disponível em: <http://www.abrecon.org.br>
- Abrelpe, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2020) Acesso em: 14 de janeiro de 2021, disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama>
- Andreasen, AH MN., Andersen, J. (1930) Relation between grain size and interstitial space in products of unconsolidated granules. *Kolloid-Zeitschrift*, **50**(3), 217-228.
- Arisha A.M., Gabr, A.R., El-Badawy., S.M, Shwally., S.A. (2018) Performance Evaluation of Construction and Demolition Waste Materials for Pavement Construction in Egypt. *Journal of Materials Civil Engineering*, **30**(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002127)
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) *NBR 10004: Resíduos sólidos: classificação*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000) *NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016a) *NBR 6457: versão corrigida. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016b) *NBR 6458: versão Corrigida. 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.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016c) *NBR 6459: versão Corrigida. Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) *NBR 6502: Rochas e Solos*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016d) *NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016e) *NBR 7181: Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) *NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento*. Rio de Janeiro.

- Benson, Craig H., Daniel, David E., Boutwell, Gordon P. (1999) Field performance of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(5), 390-403.
- Bernardes, A., Thomé, A., Prietto, P. D. M., & de Abreu, Á. G. (2008) Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. *Ambiente Construído*, **8**(3), 65–76.
- Brasil, Lei no 12.305, de 2 de Agosto de 2010 Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- Bertanza, Carlo Collivignarelli Giorgio., Baldi., Marco., Avezzù., Franco. (1998) Ammonia stripping from MSW landfill leachate in bubble reactors: process modeling and optimization. *Wast Management & Research*. **16**(5), 455-466.
- Burton, Simon A. Q., Watson-Craik, Irene A. (1998) Ammonia e nitrogen fluxes in landfill site: applicability to sustainable landfilling. *Wast Management & Research*, **16**(1), 41-53.
- Cabalar, A.F, Zardikawi, O.A.A., Abdulnaffaa, M.D. (2019) Utilisation of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade. *Road Materials and Pavement Design*, **20**(3), 702–714 <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1407817>.
- Caetano, M. O., Lambiase, F. B., Gomes, L. P. (2016) Composição dos RCD gerados em etapa de pós obra originadas de correções patológicas em edificações verticais. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, **9**(3), 331–348.
- Caetano, M. O., Selbach, J. B. O., Gomes, L. P. (2016) Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. *Ambiente Construído*, **16**(2), 51–67.
- Calli, Baris, Mertoglu, Bulent, Inanc, Bulent. (2005) Landfill leachate management in Istanbul: applications and alternatives. *Chemosphere*, **59**(6) 819-829.
- Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos, Libânio, Paulo Augusto Cunha, Leite, Valderi Duarte, Sousa, José Tavares de (2003), Capítulo 6: Tratamento e recirculação de lixiviados. In: Ferreira, Andréia C., Castilhos Júnior, Armando Borges de, Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos, Andreoli, Cleverson Victorio, Paula Júnior, Durval Rodrigues de, Borges, Eduardo Sales Machado, Soares, Hugo Moreira, Sousa, José Tavares de, Moraes, Luciana de Mattos, Pinto, Marcelo Texeira, França, Milene, Pontes, Patrícia Procópio, Libânio, Paulo Augusto Cunha, Belli Filho, Paulo, Pinto, Rafael de Oliveira, Gonçalves, Ricardo Franci, Vazoller, Rosana Filomena, Cassini, Sérgio Túlio, Leite, Valderi Duarte, Lopes, Wilton Silva, (Eds.), *Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás*, ABES, Rio de Janeiro, RJ, 166-196.
- Cheung, K. C., Chu, L. M., Wong, M. H. (1997) Ammonia Stripping as a pretreatment for landfill leachate. *Water, Air and Soil Pollution*, **94**, 209-221.
- Costa, Carlos Henrique Rinck da. (2006) *Estudo de mistura solo-carvão ativado como barreira reativa no tratamento de lixiviados de resíduos sólidos urbanos*, Programa de Pós-Graduação em Geologia, UNISINOS, 103 pp.
- Daniel, David E, Benson, Craig H. (1990) Water content-density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**(12), 1811-1830.
- Daniel, David Edwin (Ed.) (1993) *Geotechnical practice for waste disposal*, Springer Science & Business Media, UK, 683 pp.
- Day, Steven R., Daniel, David E. (1985) Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, **111**(8), 957-970.
- Ding, T., Xiao, J. (2014) Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai. *Waste Management*, **34**(11), 2327–2334.
- Evangelista, P. P. DE A, Costa, D. B, Zanta, V. M. (2010) Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. *Ambiente Construído*, **10** (3), 23-40.
- Fepam - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. Diretriz Técnica N° 04/2017. Acesso em: 25 de abril de 2019, disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DT-004-2017.PDF>
- Funk, James E., Dinger, Dennis. (1994) *Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing*. Springer Science & Business Media.
- Furnas, C. C. (1931) Grading aggregates-I.-Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Industrial & Engineering Chemistry*, **23**(9), 1052-1058.

- Gomes, Luciana Paulo, Lange, Lisete Celina, Jucá, José Fernando Thomé, Fernandes, Fernando, Silva, Sandra Márcia Cesário Pereira da (2006) Capítulo 3: Processos e Monitoramento da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos. In: Castilhos Júnior, Armando Borges de, Fernandes, Fernando, Ferreira, João Alberto, Jucá, José Fernando Thomé, Lange, Lisete Celina, Gomes, Luciana Paulo, Pessin, Neide, Santos Neto, Pedro Murrieta, Zanta, Viviana Maria, (Eds.), *Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários*. ABES, Rio de Janeiro, RJ, 65-108. Acesso em: 07 de março de 2022, disponível em: <http://finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/historico-de-programa/prosab/produtos>
- Gomes, L. P., Martins, F. B. (2003) Capítulo 3: Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos Urbanos para municípios de Pequeno Porte. In: Castilhos Junior, Armando Borges de (Eds.), *Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades*, ABES, Rio de Janeiro, RJ, 51-105. Acesso em: 07 de março de 2022, disponível em: <http://finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/historico-de-programa/prosab/produtos>
- Gomes, L.P., Caetano, M.O, Miranda, L.A.S. (2014) Ammoniacal nitrogen removal from sanitary landfill leachate by stripping process using a baffled reactor. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, **7**(1), 19-32.
- Hejazi, F.P.S.M., Alirezazadeh, M.S.A. (2017) A parametric study on hydraulic conductivity and self-healing properties of geotextile clay liners used in landfills. *Journal of Environmental Management*, 29-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.013>
- Jie Li, M. S. (2019) Long-term permanent deformation behaviour of recycled concrete aggregate with addition of crumb rubber in base and sub-base applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 121, 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.029>.
- Jiménez, J. R., Agrela, F., Ayuso, J., & López, M. (2011) A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*, **61**(302), 289-302.
- Karpinsk, L. A. (2009) Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental. Edipucrs, Porto Alegre, 163 pp.
- Kern, A. P., Dias, M. F., Kulakowski, M. P., & Gomes, L. P. (2015) Waste generated in high-rise buildings construction: A quantification model based on statistical multiple regression. *Waste Management*, **39**, 35–44.
- Leite, Fabiana da Conceição. (2007) *Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 185 pp.
- Llatas, C. A. (2011) Model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, **31**(6), 1261–1276.
- Mália, M., Brito, J. DE. (2011) Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. *Ambiente Construído*, **351**(21), 117–130 .
- Maritsa, L., Tsakiridis, P. E., Katsiotis, N. S., Tsiavos, H., Velissariou, D., Xenidis, A., & Beazi-Katsioti, M. (2016) Utilization of spilitic mining wastes in the construction of landfill bottom liners. *Journal of environmental chemical engineering*, **4**(2), 1818-1825.
- Marttinen, S. K, Kettunen, R.H.; Sormunen, K. M.; Soimasuo, R.M.; Rintala, J. A. (2002) Screening of phisical-chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates. *Chemosphere*, **46**(6) 851-858.
- Mitchell, James Kenneth., Hooper, Don R.; Campanella, Richard G. (1965) Permeability of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **91**(4)
- Moura, Maria José, Figueiredo, Maria Margarida. (2002) Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de E. globulus. *Silva Lusitana*, **10**(2), 207-216.
- Nogueira, Joao Baptista (2005) *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*, EESC -USP, São Carlos, 248 pp.
- Ortega, F. D. S., Pileggi, R. G., Sepúlveda, P., & Pandolfelli, V. C. (1997) Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. *Cerâmica*, **43**, 185-191.

- Ortiz, Oscar, Pasqualino, J. C, Castells, F. (2010) Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste management*, **30**(4), 646-654.
- Ozturk, Izzet, Altinbas, Mahmut, Koyuncu, Ismail; Arikan, Osman; Gomec-Yangin, Cigdem. (2003) Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Management*, **23**(5) 441-446.
- Pessin, Neide, Silva, Arthur Roberto, Conto, Suzana Maria de, Panarotto, Cláudia Teixeira, Beal, Lademir Luiz. (2002) Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: Castilhos Júnior, Armando Borges de, Lange, Lisete Celina, Gomes, Luciana Paulo, Pessin, Neide, (Eds.), *Alternativa de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para pequenas comunidades*. RiMa, Florianópolis, SC, 13–17.
- Prim, Oliveira, Castilhos Junior. (2003) Apêndice 2: Transportes de Contaminantes. In: Castilhos Junior, Armando Borges de (Eds.), *Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades*, ABES, Rio de Janeiro, RJ, 235-255. Acesso em: 07 de março de 2022, disponível em: <http://finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/historico-de-programa/prosab/produtos>.
- Proctor, Ralph R. (1933) Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News Record*, **111**(9), 245-248.
- Renou, S., Givaudan, J. G, Poulain, S, Dirassouyan, F, Moulin, P. (2008) Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*. **150**(3), 468-493.
- Rosa, Isabelle de Lima, Dos Santos, Eder Carlos Guedes. (2016) Fatores de Influência na Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R), *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil*.
- Rubinos, David A., Spagnoli, Giovanni. (2018) Utilization of waste products as alternative landfill liner and cover materials—A critical review. *Critical reviews in environmental science and technology*, **48** (4), 376-438.
- Soares, Valéria. (2012) *Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 118 pp.
- Vargas, Milton. (1978) *Introdução à mecânica dos solos*, McGraw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 203 pp.
- Vinayagamoorthy, Sivakumar et al. (2015) Influence of testing on permeability of compacted fine soils. *Geotechnical Engineering*, **168** (5), 422-438.
- Villibor, Douglas Fadul. (1982) Estabilização granulométrica ou mecânica, Gráfica, EESC-USP, São Carlos, 56 pp.
- Wang, B., Xu, J., Chen, B., Dong, X., Do, T. (2019) Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to inorganic waste leachate. *Applied Clay Science*, **168**, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.021>