

GIAN FONSECA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS
COMPACTADAS DE SOLOS TROPICAIS COM RESÍDUO DE POLIESTIRENO
EXPANDIDO (EPS)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - CAMPUS VIÇOSA

T

S237a
2020 Santos, Gian Fonseca dos, 1993-
Avaliação de propriedades geotécnicas de misturas compactadas
de solos tropicais com resíduo de poliestireno expandido (eps) / Gian
Fonseca dos Santos. - Viçosa, MG, 2020.
88 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Mecânica do solo. 2. Propriedades mecânicas. 3. Poliestirenos.
4. Resíduos. 5. Modelos hidráulicos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 631.433


GIAN FONSECA DOS SANTOS


**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS
COMPACTADAS DE SOLOS TROPICAIS COM RESÍDUO DE POLIESTIRENO
EXPANDIDO (EPS)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de março de 2020.

Assentimento:


Gian Fonseca dos Santos
Autor


Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças, sabedoria e por colocar pessoas especiais em minha volta, que tanto me ajudam a trilhar esta caminhada.

Aos meus pais José e Lídia, pelo amor, apoio, carinho, simplicidade e exemplo de pessoas que eu tanto admiro. Ao meu irmão Genilson, pelo apoio e companheirismo sempre. Vocês sempre foram minha base para que eu alcançasse os meus objetivos.

Ao meu orientador Heraldo, que foi peça fundamental para a execução deste trabalho, agradeço muito pela orientação, dedicação, empenho, paciência e todo suporte que me foi oferecido durante a pesquisa

Aos professores Taciano, Roberto Ferraz e Pedrotti, pela disponibilidade e apoio à pesquisa.

Aos professores Heraldo, Claudio e Eduardo, pelas aulas e ensinamentos que tanto agregaram na minha formação.

Aos alunos do curso de Engenharia Civil Gabriel e Sarah, que tanto me ajudaram durante a execução dos ensaios, agradeço muito todo o empenho e a amizade de vocês. Vocês foram peças fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório Marcelo, Anderson e Dedé, além dos amigos que fiz durante a pesquisa, agradeço a amizade, companheirismo e apoio ao longo dessa pesquisa.

Ao Giovani, pelo empenho, paciência, ensinamentos e boa vontade na execução e auxílio dos ensaios de laboratório.

A todos os amigos que contribuíram de alguma forma para essa conquista, muito obrigado!

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Civil, pela estrutura, suprimentos e equipamentos necessários para a realização deste trabalho e à obtenção do título.

Ao Núcleo de Microscopia e Microanálise (NMM) da Universidade Federal de Viçosa e as agências financiadoras dos equipamentos (Fapemig, FINEP, CNPq, Capes), pela utilização do MEV e os equipamentos auxiliares.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

SANTOS, Gian Fonseca dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2020. **Avaliação de propriedades geotécnicas de misturas compactadas de solos tropicais com resíduo de poliestireno expandido (eps)**. Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.

Considerando-se as características físico-químicas do resíduo de EPS (poliestireno expandido) e as eventuais vantagens ambientais decorrentes de seu aproveitamento, este estudo visou a reutilização deste material em mistura com solos, visando o emprego do compósito em obras geotécnicas. A pesquisa avaliou as respectivas respostas mecânicas e hidráulicas de misturas de solos com resíduo de EPS triturado, sendo utilizados materiais geológicos com características granulométricas distintas. Os solos utilizados foram provenientes de duas jazidas de empréstimo situadas no município de Viçosa, na região da Zona da Mata, Minas Gerais (MG), Brasil. Os resíduos de EPS foram coletados em uma unidade de reciclagem de resíduos do município de Viçosa-MG, sendo submetidos à trituração controlada a fim de obter uma granulometria mais uniforme. Foram realizados ensaios de caracterização física dos solos e dos resíduos de EPS triturados e de compactação das misturas solo-resíduo de EPS nas proporções volumétricas de 0%, 20%, 30% e 40% de resíduo em relação ao volume aparente total da mistura, nas energias de compactação Proctor Intermediária e Modificada. Para os respectivos pontos de ótimo das curvas de compactação dos materiais investigados, foram moldados corpos de prova, visando à caracterização mecânica, por meio dos ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada, CBR (Índice CBR e Expansão CBR) e Cisalhamento Direto, e à caracterização hidráulica, por meio do ensaio de percolação em coluna (permeabilidade saturada), utilizando os gradientes hidráulicos de 15, 66 e 85. Para as particularidades de cada modalidade de ensaio desta pesquisa, os resultados mostraram a influência do tipo de solo, da energia de compactação e dos gradientes hidráulicos utilizados nas respostas de engenharia geotécnica dos materiais investigados. Em geral, o solo predominantemente argiloso apresentou melhores comportamentos mecânicos, principalmente nas proporções de 20% e 30%, na energia Proctor Modificada. Além disto, este solo apresentou, em ambas energias e misturas com EPS, aplicabilidade técnica em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários, mesmo com o ligeiro aumento da permeabilidade saturada com a inclusão do EPS e o aumento do gradiente hidráulico. Para o solo predominantemente arenoso, houve, em geral, reduções nas magnitudes das propriedades mecânicas quantificadas pelos ensaios, além da manutenção da inviabilidade técnica de sua utilização em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários em misturas

com EPS, por conta do seu alto coeficiente de permeabilidade saturada. Presume-se que a mobilização das respectivas resistências mecânicas dos compósitos foi influenciada pelos mecanismos de aderência e de atrito na interface entre as partículas de solo e de resíduo de EPS. A aderência interfacial também é presumida como mecanismo fundamental para a manutenção dos baixos valores de permeabilidade saturada dos compósitos solo argiloso-EPS. Adicionalmente, foi constatada a redução da densidade seca das misturas em relação à dos solos naturais compactados, representando um eventual diferencial técnico na utilização do compósito solo-EPS em cenários de projetos geotécnicos nos quais o material de apoio possua baixa rigidez e para os quais a carga devida ao peso próprio do material que será sobre ele assentado pode ser particularmente relevante.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades mecânicas. Poliestireno expandido. Reutilização. Resíduos. Solo argiloso. Solo arenoso. Ensaio hidráulico. Percolação em coluna.

ABSTRACT

SANTOS, Gian Fonseca dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2020. **Assessment of geotechnical properties of compacted mixtures of tropical soils with expanded polystyrene waste (eps)**. Adviser: Heraldo Nunes Pitanga.

Considering the physical-chemical characteristics of EPS waste (expanded polystyrene) and the possible environmental advantages resulting from its use, this study aimed at reusing this material in mixture with soils, aiming at the use of the composite in geotechnical works. The research evaluated the respective mechanical and hydraulic responses of a mixture of soil and grinded EPS waste. The geological materials used had different granulometric characteristics. The soils used came from two soil deposits located in the city of Viçosa, in the Zona da Mata region, Minas Gerais (MG), Brazil. The EPS waste was collected at a waste recycling unit in the city of Viçosa-MG. The EPS waste went through a controlled grinding to obtain a more uniform granulometry. It was performed tests of physical characterization of the soil and grinded EPS waste. It was also performed a compaction test of soil-EPS mixtures, with Intermediate and Modified Proctor compaction energies. The soil-EPS mixtures volumetric proportions were 0%, 20%, 30% and 40% of EPS waste regarding the mixture total apparent volume. For the respective optimal points of the compaction curves from the investigated materials, specimens were made. The specimens aimed the mechanical characterization through tests of Unconfined Compressive Strength, CBR (CBR index and CBR expansion), and Direct Shear. It was also performed a hydraulic characterization, through the column percolation test (saturated permeability), using the hydraulic gradients of 15, 66 and 85. For the particularities of each specific test used in the geotechnical engineering responses of the investigated materials, the results showed the influence of the soil type, the compaction energy, and the hydraulic gradients. Overall, using the Modified Proctor energy, the soil mainly composed of clay, showed the best mechanical behavior, especially in the proportions of 20% and 30%. This soil also showed, in both compaction energies and mixtures with EPS waste, technical applicability as base and top layers of a sanitary landfill, even with the slight increase in saturated permeability due to the inclusion of EPS waste and the increase in the hydraulic gradient. For the soil mainly composed of sand, in general, the magnitudes of the mechanical properties quantified by the tests reduced. The technical infeasibility of the use of this soil as base and top layers of a sanitary landfill in mixtures with EPS waste is kept, due to its high saturated permeability coefficient. It is assumed that the mobilization of the respective

mechanical resistances was mainly influenced by the adhesion mechanism at the interface between the soil particles and EPS waste. The interfacial adhesion is also assumed to be a fundamental mechanism for keeping low saturated permeability values of EPS-clay soil composites. It was found a reduction in the dry density of mixtures compared to compacted natural soils. It represents an eventual technical differential for the use of the soil-EPS mixture for project scenarios in which the support material of the hydraulic barrier is less rigid and also for which the load due to the barrier material own weight might be particularly relevant.

KEYWORDS: Mechanical properties. Expanded polystyrene. Reuse. Waste. Clayey soil. Sandy soil. Hydraulic testing. Column percolation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Localização e detalhe das jazidas de coleta dos solos pesquisados.	24
Figura 2.2-Detalhes do resíduo de EPS coletado (a) e após o processo de trituração (b).	25
Figura 2.3-Detalhes das misturas do resíduo de EPS triturado com amostras de solo BR-120 (a) e de solo Vila Secundino (b).	25
Figura 2.4-Curvas de distribuição granulométrica dos solos.	28
Figura 2.5-Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de EPS triturado.	30
Figura 2.6-Curva média de distribuição granulométrica do resíduo de EPS triturado.	31
Figura 2.7-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.	32
Figura 2.8-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.	33
Figura 2.9-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.	33
Figura 2.10-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.	34
Figura 2.11-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.	34
Figura 2.12-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.	35
Figura 2.13-Resultados de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) dos solos e das misturas solo-EPS, na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.	36
Figura 2.14-Resultados de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) dos solos e das misturas solo-EPS, na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.	37
Figura 2.15-Imagem de amostra de resíduos de EPS triturados obtida por microscopia óptica: textura superficial lisa (a) e morfologia arredondada (b) de partícula representativa.	39
Figura 2.16-Imagens de amostras do compósito solo argiloso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes do “aprisionamento”, por adesão interfacial, das partículas de EPS na massa de solo coesivo. Solo BR-120 com 30% em proporção volumétrica de EPS na Energia Proctor Modificada (a) e Proctor Intermediária (b).	40
Figura 2.17-Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS com textura mais fibrosa delimitado por linhas tracejada vermelha, envolvido pela massa do solo na amostra com proporção	

volumétrica de 30% EPS na Energia Proctor Modificada, imagem do Ensaio MEV com zoom de 25 vezes (a) e 300 vezes (b).....	40
Figura 2.18-Imagens de amostras do compósito solo arenoso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes da “flutuação” das partículas de EPS na massa de solo granular.....	41
Figura 2.19-Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS com textura mais fibrosa delimitado por linhas tracejada vermelha, em contato com solo Vila Secundino na amostra com proporção volumétrica de 30% EPS na Energia Proctor Modificada, imagem do Ensaio MEV com zoom de 50 vezes (a) e 120 vezes.	42
Figura 2.20-Resultados do Índice CBR e da Expansão CBR dos solos e das misturas solo EPS na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.....	43
Figura 2.21-Resultados do Índice CBR e da Expansão CBR dos solos e das misturas solo EPS na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.....	43
Figura 2.22-Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico}) dos solos e das misturas solo-EPS compactados na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.	46
Figura 2.23- Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico}) dos solos e das misturas solo-EPS compactados na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.....	47
Figura 3.1- Localização e detalhe das jazidas de coleta dos solos pesquisados.....	59
Figura 3.2-Detalhes do resíduo de EPS coletado (a) e após o processo de trituração (b).	60
Figura 3.3-Detalhes das misturas do resíduo de EPS triturado com amostras de solo BR-120 (a) e de solo Vila Secundino (b).	61
Figura 3.4-Curvas de distribuição granulométrica dos solos.	64
Figura 3.5-Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de EPS triturado.	65
Figura 3.6-Curva média de distribuição granulométrica do resíduo de EPS.....	66
Figura 3.7-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.....	67
Figura 3.8-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor.....	68
Figura 3.9-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.	68
Figura 3.10-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.....	69
Figura 3.11-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.	69

Figura 3.12-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.	70
Figura 3.13- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo BR-120 e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Intermediária.....	71
Figura 3.14- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo Vila Secundino e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Intermediária.....	72
Figura 3.15- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo BR-120 e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Modificada.....	72
Figura 3.16- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo Vila Secundino e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Modificada.....	73
Figura 3.17-Imagem do Ensaio MEV do solo BR-120 puro (ausência das estruturas de macroporos).....	74
Figura 3.18-Imagem do Ensaio MEV do solo Vila Secundino puro (presença das estruturas de macroporos, apontados pelas setas).....	75
Figura 3.19-Imagem do Ensaio MEV mostra o surgimento das estruturas de macroporos na interface do solo BR-120 e EPS (textura mais fibrosa), apontados pelas setas.....	76
Figura 3.20- Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS com textura mais fibrosa indicado por setas vermelhas, envolvido pela massa do solo na amostra com proporção volumétrica de 30% EPS na Energia Proctor Modificada.....	76
Figura 3.21-Imagem de amostra de resíduos de EPS triturados obtida por microscopia óptica: textura superficial lisa (a) e morfologia arredondada (b) de partícula representativa.	77
Figura 3.22- Imagens de amostras do compósito solo argiloso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes do “aprisionamento”, por adesão interfacial, das partículas de EPS na massa de solo coesivo. Solo BR-120 com 30% em proporção volumétrica de EPS na Energia Proctor Modificada (a) e Proctor Intermediária (b).	77
Figura 3.23- Imagem do Ensaio MEV mostra a formação de novos macroporos (indicadas por setas) pela inserção do grão de EPS no solo Vila Secundino.....	79
Figura 3.24-Amplitude dos valores de k_{20} dos materiais investigados (solo argiloso e correspondentes compósitos) para um dado valor de gradiente hidráulico.....	79

Figura 3.25 - Imagens de amostras do compósito solo arenoso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes da “flutuação” das partículas de EPS na massa de solo granular. Solo Vila Secundino com 30% em proporção volumétrica de EPS na Energia Proctor Intermediária (a) e Proctor Modificada (b).	80
Figura 3.26-Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS envolvido pelo solo Vila Secundino.	80
Figura 3.27-Imagens do Ensaio MEV dos solos Vila Secundino (a) e BR-120 (b).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores de índice CBR mínimo e expansão CBR máxima para camadas de pavimentos asfálticos. Fonte: (DNIT,2006).	27
Tabela 2.2-Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.....	28
Tabela 2.3- Granulometria média do resíduo de EPS triturado.....	30
Tabela 2.4- Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado.....	31
Tabela 2.5-Dados dos valores das proporções em volume e em massa.	32
Tabela 2.6-Aplicabilidade dos materiais investigados segundo as exigências de DNIT (2006) para camadas estruturais de pavimento asfáltico.....	45
Tabela 2.7-Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento de Pico dos solos (BR-120 e Vila Secundino) e das respectivas misturas solo-EPS compactados nas energias Proctor Intermediária e Modificada.	47
Tabela 3.1-Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.....	63
Tabela 3.2-Requisitos mínimos para solo de impermeabilização de aterros sanitários.	64
Tabela 3.3- Granulometria média do resíduo de EPS	65
Tabela 3.4- Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado.....	66
Tabela 3.12-Dados dos valores das proporções em volume e em massa.	67

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 2	18
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	20
2.1. INTRODUÇÃO	21
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS	23
2.2.1 Materiais.....	23
2.2.2 Métodos.....	25
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
2.3.1 Caracterização geotécnica dos solos	28
2.3.2 Classificação geotécnica dos solos.....	28
2.3.3 Análise granulométrica do resíduo de EPS	29
2.3.4 Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado	31
2.3.5 Ensaios de compactação.....	32
2.3.6 Ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada.....	36
2.3.7 Ensaios CBR	42
2.3.8 Ensaios de Resistência ao Cisalhamento Direto	46
2.4 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS.....	50
CAPÍTULO 3	53
RESUMO.....	53
ABSTRACT.....	55
3.1. INTRODUÇÃO	57
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.2.1. Materiais.....	59
3.2.2 Métodos.....	61
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
3.3.1. Caracterização geotécnica dos solos	63
3.3.2 Análise granulométrica do resíduo de EPS	64
3.3.3 Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado	66
3.3.4 Ensaios de compactação.....	67
3.3.5 Ensaio de permeabilidade.....	71

3.4 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS.....	84
CAPÍTULO 4	88
CONCLUSÃO GERAL	88

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO GERAL

O EPS é a sigla internacional do poliestireno expandido, um termoplástico derivado do petróleo. Ele é um material quimicamente constituído por apenas dois elementos: carbono e hidrogênio. Um grânulo de EPS é composto, em massa, por 98% de ar e 2% de matéria-prima (TAMUT et al., 2014). O EPS é um polímero termoplástico espumado com estrutura celular fechada, biologicamente inerte, não tóxico. Além disto, ele possui propriedades diferenciadas, como baixa densidade, baixa suscetibilidade térmica, comportamento hidrofóbico e resistência química a ácidos e álcalis (FERRÁNDIZ-MAS e GARCÍA-ALCOCEL, 2012).

O EPS já possui aplicabilidade na Engenharia Geotécnica, na qual ele geralmente é utilizado como material manufaturado em blocos de formatos prismáticos, chamado de geoexpandido ou geofoam, possuindo propriedades que permitem a sua utilização em diversas aplicações. Por ser um material de baixa massa específica (cerca de 100 vezes inferior à de solos), consequência de seu processo de fabricação, e possuir uma resistência mecânica relativamente alta, sua utilização como aterro é bem difundida, principalmente em regiões com solo de fundação de baixa capacidade de carga (solos moles), por exemplo (AVESANI NETO e BUENO, 2009).

Segundo Tessari (2006), o grande volume de resíduos de poliestireno expandido (EPS), material popularmente conhecido no Brasil como Isopor®, decorrentes de sobras advindas de embalagens de equipamentos, máquinas, eletrodomésticos, dentre outros, constitui um preocupante problema ambiental, visto que, além de provocar uma poluição visual na estética urbana das cidades quando dispostos em locais inadequados, eles possuem aspecto negativo referente ao longo período de tempo para a sua degradação, sendo considerado um material não biodegradável.

O uso do resíduo de EPS como material alternativo pode eliminar problemas atuais de disposição em lixões e aterros sanitários, uma vez que ele é considerado como um dos vilões do lixo por ocupar muito espaço nos aterros sanitários, dificultar a compactação do aterro e prejudicar a degradação dos materiais presentes (SILVEIRA e CALHEIROS, 2018).

Neste contexto, esta pesquisa se justifica, preliminarmente, pela sua perspectiva ambiental, pois como visto o EPS é um material amplamente utilizado. Assim, o objetivo principal da presente pesquisa é investigar a viabilidade do emprego do resíduo de EPS triturado como material de substituição parcial de solos para obras geotécnicas, através de ensaios

experimentais de laboratório. Vislumbra-se que o uso do resíduo EPS triturado em obras de terra possa contribuir com o menor consumo de material natural (solo), além de possibilitar uma nova aplicação do resíduo.

Adicionalmente, sob a perspectiva técnica, o objetivo dessa investigação foi de realizar testes mecânicos a fim de verificar qual tipo de solo proporciona melhores respostas de engenharia com a inclusão do EPS triturado frente às solicitações (compressão, puncionamento e cisalhamento) impostas pelos ensaios. Além disto, avaliou-se a viabilidade técnica em utilizar o EPS triturado em misturas com solos (arenoso e argiloso), para o emprego em camadas selantes de aterros sanitários, realizando ensaios de permeabilidade saturada nas amostras compactadas.

Por fim, sob a perspectiva científica, objetivava-se explicar os mecanismos de interação entre as partículas de solo e de resíduo de EPS responsáveis pela mobilização das respectivas propriedades de resistência e de permeabilidade saturada dos compósitos investigados.

REFERÊNCIAS

- AVESANI NETO, J.O.; BUENO, B.S. (2009). **Ensaio de compressão cíclica em blocos de EPS para uso geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. In: <http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geors2009/2009-neto-bueno2.pdf>. 6p.
- FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. **Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS)**. *Materiales de construcción*, 2012, 62.308: 547-566.
- SILVEIRA, M. V.; CALHEIROS, A. V.; CASAGRANDE, M. D. T. **Applicability of the expanded polystyrene as a soil improvement tool**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 6, p. 06018006, 2018.
- TAMUT, T., R. PRABHU, K. VENKATARAMANA, and S. C. YARAGAL. 2014. **Partial replacement of coarse aggregates by expanded polystyrene beads in concrete**. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 3 (2): 238–241.
- TESSARI, J. **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento dos Seus Resíduos na Construção Civil**. 2006. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2006.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLOS TROPICAIS COM RESÍDUO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

RESUMO

Considerando-se as particularidades físico-químicas (baixa densidade, inércia química, baixas suscetibilidades térmica e à umidade) do resíduo de EPS (poliestireno expandido) e as eventuais vantagens ambientais decorrentes de seu aproveitamento, este estudo visou a reutilização deste material em mistura com solos, para emprego em obras geotécnicas e de pavimentação. A pesquisa avaliou as respostas mecânicas de misturas de solos com resíduo de EPS triturado, sendo utilizados solos com características granulométricas distintas. Os solos utilizados foram provenientes de duas jazidas de empréstimo situadas no município de Viçosa, na região da Zona da Mata, Minas Gerais (MG), Brasil. Os resíduos de EPS foram coletados em uma unidade de reciclagem de resíduos do município de Viçosa-MG, sendo submetidos à trituração controlada a fim de obter uma granulometria mais uniforme. Foram realizados ensaios de caracterização física dos solos e dos resíduos de EPS triturados e de compactação das misturas solo-resíduo de EPS nas proporções volumétricas de 0%, 20%, 30% e 40% de resíduo em relação ao volume aparente total da mistura, nas energias de compactação Proctor Intermediária e Modificada. Para os respectivos pontos de ótimo das curvas de compactação dos materiais investigados, foram moldados corpos de prova, visando à caracterização mecânica por meio dos ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada, CBR (Índice CBR e Expansão CBR) e de Cisalhamento Direto. Para as particularidades de cada modalidade de ensaio, os resultados mostraram que houve influência do tipo de solo e da energia de compactação aplicada na resposta de engenharia dos materiais face às solicitações impostas (compressão, punção e cisalhamento). Em geral, o solo predominantemente argiloso apresentou melhores comportamentos mecânicos, principalmente nas proporções de 20% e 30%, na energia Proctor Modificada. Para o solo predominantemente arenoso, houve, em geral, reduções nas magnitudes de todas as propriedades mecânicas quantificadas pelos ensaios. Presume-se que a mobilização das respectivas resistências mecânicas foi influenciada principalmente pelo mecanismo de aderência na interface entre as partículas de solo e de resíduo de EPS, com uma menor contribuição do mecanismo de atrito, ressaltando a maior vantagem técnica de misturas solo-EPS constituídas por solos argilosos. Também foi constatada a redução da densidade seca da mistura em relação à dos solos naturais compactados, representando um diferencial técnico

na utilização das misturas como material de aterro em locais com fundação de baixa capacidade de suporte, nos quais a carga devida ao peso próprio do material de aterro é particularmente relevante.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades mecânicas. Poliestireno expandido. Reutilização. Resíduos. Solo argiloso. Solo arenoso.

ABSTRACT

Considering the physical-chemical characteristics (low density, chemical inertness, thermal and moisture low susceptibility) of EPS waste (expanded polystyrene), and the possible environmental advantages of its use, this study aimed the reuse of the EPS waste mixed with soil in geotechnical and paving works. The research assessed the mechanical responses from a mixture of grinded EPS waste and soil of different granulometric characteristics. The soils used came from two soil deposits located in the city of Viçosa, in the Zona da Mata region, Minas Gerais (MG), Brazil. The EPS waste was collected at a waste recycling unit in the city of Viçosa-MG. The EPS waste went through a controlled grinding to obtain a more uniform granulometry. It was performed tests of physical characterization of the soil and grinded EPS waste. It was also performed a compaction test of soil-EPS mixtures, with Intermediate and Modified Proctor compaction energies. The soil-EPS mixtures volumetric proportions were 0%, 20%, 30% and 40% of EPS waste regarding the mixture total apparent volume. For the respective optimal points of the compaction curves from the investigated materials, specimens were made aiming at their mechanical characterization through tests of Unconfined Compressive Strength, CBR (CBR index and CBR expansion), and Direct Shear. For the particularities of each specific test, the results showed that the soil type and the applied compaction energy influenced the engineering response of the materials for the applied demands (compression, punching, and shear). Overall, using the Modified Proctor energy, the soil mainly composed of clay, showed the best mechanical behavior, especially in the proportions of 20% and 30%. For the soil mainly composed of sand, in general, the magnitudes of all mechanical properties quantified by the tests reduced. It is assumed that the mobilization of the respective mechanical resistances was mainly influenced by the adhesion mechanism at the interface between the soil particles and EPS waste, with a smaller contribution from the friction mechanism. It highlights the greater technical advantage of soil-EPS mixtures using clayey soils. It was found a reduction in the dry density of the EPS-soil mixture compared to compacted natural soils. It represents an eventual technical differential for the use of the soil-EPS mixture as landfill material for places with low support capacity foundation, in which the load due to the own weight of the landfill material is particularly relevant.

KEYWORDS: Mechanical properties. Expanded polystyrene. Reuse. Waste. Clayey soil. Sandy soil.

2.1. INTRODUÇÃO

O EPS é a sigla internacional do poliestireno expandido, um termoplástico derivado do petróleo. Trata-se de um material constituído por um polímero de hidrocarboneto de estireno (poliestireno), que é submetido à expansão por meio da utilização de gás pentano (outro hidrocarboneto). Portanto, o EPS é um material quimicamente constituído por apenas dois elementos: carbono e hidrogênio. Um grânulo de EPS é composto, em massa, por 98% de ar e 2% de matéria-prima (TAMUT et al., 2014).

O EPS é um polímero termoplástico espumado com estrutura celular fechada, biologicamente inerte, não tóxico e que possui propriedades diferenciadas, como baixa densidade, baixa suscetibilidade térmica, comportamento hidrofóbico e resistência química a ácidos e álcalis (FERRÁNDIZ-MAS e GARCÍA-ALCOCEL, 2012).

Avesani Neto e Bueno (2009a; 2009b; 2009c) destacam que o uso do EPS e do XPS (poliestireno extrudado) na Engenharia Civil já possui uma aplicação reconhecida na Construção Civil devida à sua alta capacidade como isolante térmico e acústico e na absorção de impactos e recalques.

Na Engenharia Geotécnica, esse material, manufaturado em blocos de formatos prismáticos, chamado de geoexpandido ou geofoam, possui propriedades que permitem a sua utilização em diversas aplicações. Por ser um material de baixa massa específica (cerca de 100 vezes inferior à de solos), consequência de seu processo de fabricação, e possuir uma resistência mecânica relativamente alta, sua utilização como aterro é bem difundida, principalmente em regiões com solo de fundação de baixa capacidade de carga (solos moles), por exemplo. Em decorrência destas características, espera-se que o geofoam resista às cargas como aterro e não comprometa o solo de fundação (AVESANI NETO e BUENO, 2009a).

Segundo Tessari (2006), o grande volume de resíduos de poliestireno expandido (EPS), material popularmente conhecido no Brasil como Isopor®, decorrentes de sobras advindas de embalagens de equipamentos, máquinas, eletrodomésticos, dentre outros, constitui um preocupante problema ambiental, visto que, além de provocar uma poluição visual na estética urbana das cidades quando dispostos em locais inadequados, eles possuem aspecto negativo referente ao longo período de tempo para a sua degradação, sendo considerado um material não biodegradável.

O uso do resíduo de EPS como material alternativo pode contribuir para agregar valor ao resíduo e atenuar problemas ambientais a ele associados, eliminando problemas atuais de disposição em lixões e aterros sanitários, uma vez que ele é considerado como um dos vilões

do lixo por ocupar muito espaço nos aterros sanitários, dificultar a compactação do aterro e prejudicar a degradação dos materiais presentes (SILVEIRA e CALHEIROS, 2018).

Alguns pesquisadores realizaram estudos avaliando o comportamento da mistura solo-EPS em diferentes cenários de aplicações e ensaios. Na pesquisa de Abdelrahman et al. (2009), utilizou-se mistura solo-EPS e cimento nas proporções de 1 a 5% em massa de EPS em grânulos em relação à massa seca do solo e cimento Portland nas proporções de 5 a 25% em relação à massa seca do solo. A resistência ao cisalhamento direto aumentou com o aumento do teor de cimento, sendo que o EPS pouco influenciou na resistência do compósito. Já o aumento da proporção de EPS provocou a redução do parâmetro d resistência à compressão não confinada.

Na pesquisa de Gao et al. (2012), trabalhou-se com misturas solo-EPS e cimento, nas proporções de 2 a 4% em massa de EPS e de 8 a 10% em massa de cimento, ambas em relação à massa seca do solo. Foram realizados ensaios edométricos, verificando-se uma redução da deformabilidade na mistura com o acréscimo de percentagem de cimento, sendo que a inserção de EPS não influenciou nesta característica.

Na pesquisa de Abdelrahman et al. (2013), trabalhou-se com mistura solo-EPS constituída por solo de característica arenosa, nas proporções em massa em relação ao solo seco de 0,3 a 1,2%, realizando-se análise de deformação dessa mistura em camadas compactadas submetidas a um carregamento circular. Os resultados mostraram que a inclusão do EPS reduziu a deformabilidade da camada solicitada, com reduções maiores nos cenários que envolveram a utilização de EPS com maior densidade.

Na pesquisa de Silveira e Calheiros (2018), foram realizados ensaios de compressão não confinada na mistura solo-EPS com proporções em massa em relação ao solo argiloso seco de 0,25 a 1%, ensaios triaxiais nas proporções em massa em relação ao solo arenoso seco de 0,50 e 0,75% e ensaios de cisalhamento direto utilizando bentonita com proporções de EPS em massa em relação à massa de bentonita seca de 0,50 e 0,75%. Nos ensaios de resistência à compressão não confinada, houve um ganho de resistência até a proporção de 0,75% e uma perda na proporção de 1%; nos ensaios triaxiais, o EPS não influenciou nos parâmetros de resistência; nos ensaios de cisalhamento direto, não houve influência do EPS na resistência de pico, apenas na resistência residual, promovendo um comportamento mais deformável do compósito.

Neste contexto, esta pesquisa se justifica, preliminarmente, pela sua perspectiva ambiental, pois o EPS é um material amplamente utilizado, principalmente em embalagens de produtos, encontrando-se em abundância em aterros sanitários, lixões e outros locais de disposição de resíduos. Assim, a presente pesquisa visa investigar a viabilidade do emprego do

resíduo de EPS triturado como material de substituição parcial de solos para obras geotécnicas e de pavimentação, através de ensaios experimentais de laboratório. Vislumbra-se que o uso do resíduo EPS triturado em obras de terra possa contribuir com o menor consumo de material natural (solo), além de possibilitar uma nova aplicação do resíduo.

Adicionalmente, sob a perspectiva técnica, o objetivo dessa investigação foi de realizar testes mecânicos a fim de verificar qual tipo de solo proporciona melhores respostas de engenharia com a inclusão do EPS triturado frente as solicitações (compressão, puncionamento e cisalhamento) impostas pelos ensaios. Este objetivo será alcançado através das análises dos resultados de ensaios realizados sobre solos e misturas solo-EPS compactados em diferentes energias de compactação.

Por fim, sob a perspectiva científica, busca-se explicar os mecanismos de interação entre as partículas de solo e de resíduo de EPS responsáveis pela mobilização da resistência do compósito em cada uma das modalidades de ensaio contempladas na pesquisa.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

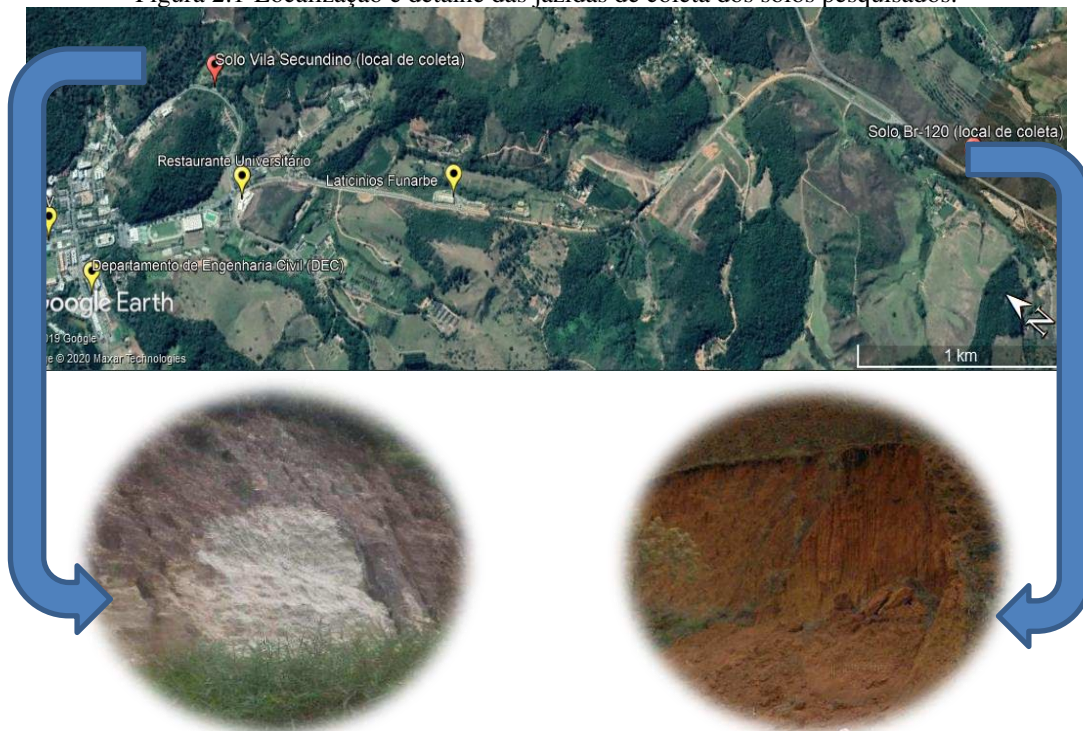
2.2.1 Materiais

2.2.1.1 Solo

As amostras de solo utilizadas nesta pesquisa foram coletadas de duas jazidas de empréstimo, uma da qual foi extraída uma amostra de solo residual jovem de gnaiss (chamado de solo Vila Secundino) e uma outra da qual foi extraída uma amostra de solo residual maduro de gnaiss (chamado de solo BR-120), representativos, respectivamente, dos horizontes C e B dos perfis de intemperismo das respectivas jazidas.

As jazidas de empréstimo de onde foram coletadas as amostras de solos situam-se na microrregião de Viçosa, na região da Zona da Mata, estado de Minas Gerais (MG), Brasil, cujas coordenadas de localização são 20°45'48" S; 42°51'29,50" O e 20°47'30" S; 42°50'17,50" O, respectivamente (Figura 2.1).

Figura 2.1-Localização e detalhe das jazidas de coleta dos solos pesquisados.



Fonte: Próprio autor.

As referidas amostras de solos foram coletadas segundo os procedimentos previstos na norma PRO 003 (DNER, 1994a). As amostras coletadas foram armazenadas e transportadas em sacos plásticos adequadamente vedados. Os procedimentos de redução e preparação das amostras de solo para os ensaios seguiram, respectivamente, as orientações prescritas pelas normas técnicas NBR NM 27(ABNT, 2001) e NBR 6457 (ABNT, 2016a).

2.2.1.2 Resíduos de EPS

Os resíduos de EPS foram coletados, sob a forma de blocos prismáticos, em uma unidade de reciclagem de resíduos do município de Viçosa-MG, sendo posteriormente triturados e conformados a uma granulometria padrão (conforme item 2.2.2) (Figura 2.2), visando garantir a uniformidade geométrica dos mesmos nas misturas solo-resíduo de EPS, daqui pra frente designadas misturas solo-EPS.

Figura 2.2-Detalhes do resíduo de EPS coletado (a) e após o processo de trituração (b).

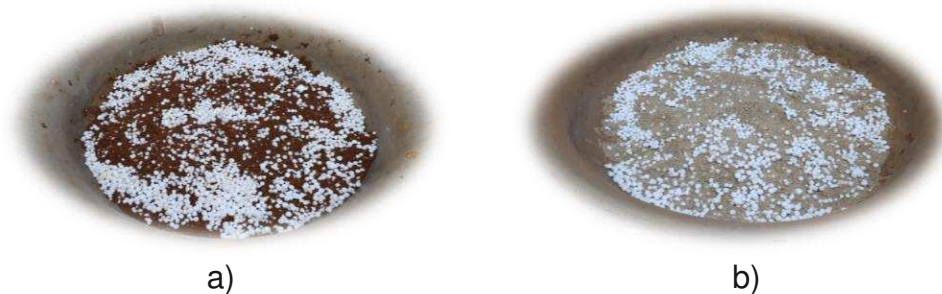


Fonte: Próprio autor.

2.2.1.3 Misturas solo-EPS

A pesquisa contemplou a análise de propriedades mecânicas de misturas solo-EPS (Figura 2.3) compactadas, nas seguintes proporções volumétricas (solo-resíduo): 100%-0%, 80%-20%, 70%-30% e 60%-40%.

Figura 2.3-Detalhes das misturas do resíduo de EPS triturado com amostras de solo BR-120 (a) e de solo Vila Secundino (b).



Fonte: Próprio autor.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica dos solos

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica dos solos pesquisados foram os que seguem:

- i) Análise granulométrica conjunta segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018);
- ii) Limites de *Atterberg* segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c) e a NBR 7180 (ABNT, 2016d);
- iii) Massa específica dos grãos do solo segundo a NBR 6508 (ABNT, 2016e).

2.2.2.2 Classificação dos solos

As amostras de solos foram classificadas segundo os sistemas *Unified Soil Classification* (USC) e *Transportation Research Board* (TRB), conforme as orientações constantes no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). Os solos também foram classificados segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical). Para isto, foram realizados os ensaios de Mini-MCV

e de Perda de massa por imersão, conforme os procedimentos prescritos no método CLA 259 (DNIT, 1996), com necessárias consultas complementares aos métodos de ensaio ME 258 (DNER, 1994b) e ME 256 (DNER, 1994c).

2.2.2.3 Ensaio de análise granulométrica do resíduo de EPS triturado

Este ensaio foi necessário para determinar a granulometria dos grãos de resíduo de EPS obtidos após a sua trituração. Os procedimentos para este ensaio foram os mesmos aplicáveis à caracterização granulométrica de agregados, realizados de acordo com a NM 248 (ABNT, 2003). Para se avaliar a eventual variabilidade geométrica do resíduo de EPS triturado, foram realizados ensaios sobre amostras trituradas oriundas de cinco processos sequenciais de trituração, dos quais resultou todo o material empregado na pesquisa.

2.2.2.4 Ensaio de determinação das massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado

O ensaio de massa unitária foi realizado nos solos e no resíduo de EPS triturado de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), para que fossem determinados os traços em massa correspondentes às proporções em volume consideradas neste estudo para as misturas solo-EPS. Assim, na preparação das misturas solo-EPS para os ensaios subsequentes, utilizaram-se os valores obtidos neste ensaio para realizar a correta proporção da mistura solo-EPS em volume aparente desejado.

2.2.2.5 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação dos solos e das misturas solo-EPS foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016f), empregando-se as energias de compactação Proctor Intermediária e Modificada, visando à determinação dos respectivos parâmetros de ótimo de compactação (peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo).

2.2.2.6 Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada

O ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) foi realizado conforme a norma técnica NBR 12770 (ABNT, 1992). Os corpos de prova cilíndricos foram compactados no teor de umidade ótimo da respectiva curva de compactação dos solos e das misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada. Três repetições de ensaio foram realizadas visando à quantificação da RCNC média dos materiais investigados, admitindo-se um coeficiente de variação (CV) máximo de 10%.

2.2.2.7 Ensaio CBR

O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) foi realizado de acordo com a norma técnica NBR 9895 (ABNT, 2016b). Os corpos de prova foram compactados no teor de umidade ótimo da respectiva curva de compactação dos solos e das misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada. Três repetições de ensaio foram realizadas visando à quantificação do índice CBR e da Expansão CBR médios dos materiais investigados, admitindo-se um CV máximo de 10%. Na Tabela 2.1, são apresentados os valores limites do índice CBR e da Expansão CBR exigidos para os materiais destinados a compor as camadas da superestrutura de pavimentos asfálticos.

Tabela 2.1 Valores de índice CBR mínimo e expansão CBR máxima para camadas de pavimentos asfálticos.
Fonte: (DNIT,2006).

Camada da superestrutura	Valores exigidos para o índice CBR	Valores exigidos para a expansão CBR
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do subleito	\geq CBR do subleito	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
Base	$\geq 80\%^*$	$\leq 0,5\%$

*Admite-se CBR $\geq 60\%$ para condição de tráfego leve

2.2.2.8 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto

Os ensaios de Resistência ao Cisalhamento Direto foram realizados de acordo com a norma técnica D 3080 (ASTM, 2011). Os corpos de prova foram compactados no teor de umidade ótimo da respectiva curva de compactação dos solos e das misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada.

Corpos de prova dos solos e das misturas solo-EPS compactados foram inicialmente moldados em cilindros CBR e destes foram moldados os corpos de prova (CPs) destinados aos ensaios de cisalhamento direto.

Após saturação por água, os CPs foram adensados e os dados de adensamento foram utilizados para a determinação da velocidade de ruptura, sendo adotada aquela que atendesse a todos os materiais investigados e a todas as condições de carregamento externo (tensão de adensamento).

Foram adotadas as tensões de adensamento de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa, sendo que, para cada uma dessas tensões, foram realizadas duas repetições de ensaio, admitindo-se que o coeficiente “R²” obtido para a envoltória de resistência linear apresentasse um valor maior que 0,90.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Caracterização geotécnica dos solos

Na Tabela 2.2, apresentam-se os resultados da caracterização geotécnica dos dois solos estudados. A Figura 2.4 apresenta as curvas granulométricas dos mesmos.

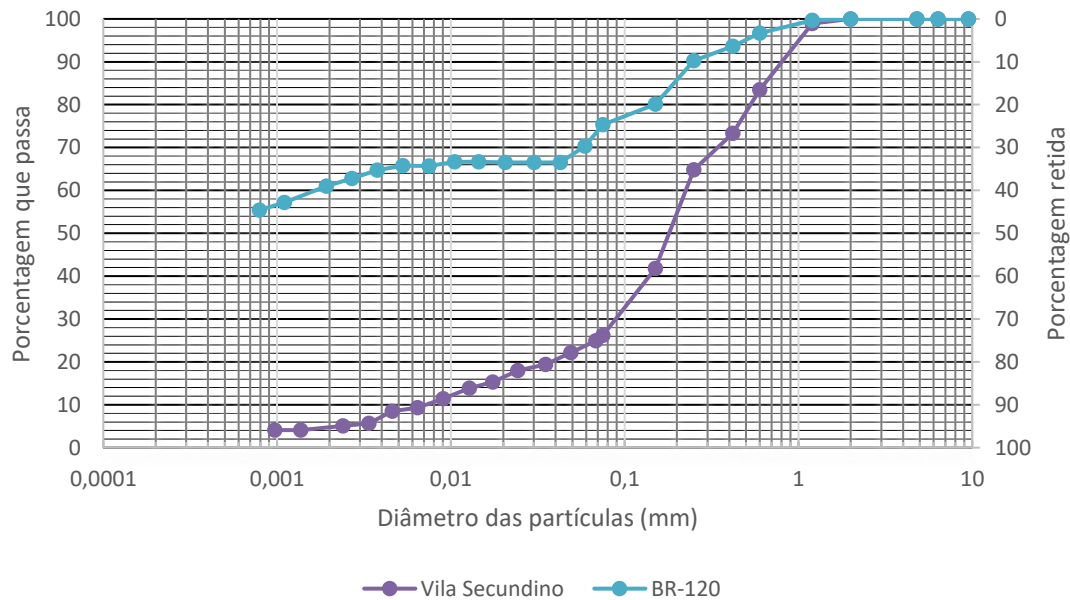
Tabela 2.2-Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.

Solo	Análise Granulométrica (%)					Limites de Consistência (%)			Peso Específico dos Grãos Sólidos (kN/m ³)
	Areia ¹			Silte ¹	Argila ¹	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
	Grossa ¹	Média ¹	Fina ¹						
BR-120	0	12	18	9	61	70	42	28	27,09
Vila Secundino	15	43	17	20	5	25	18	7	26,03

¹ Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

A partir da análise granulométrica, é possível verificar que o solo BR-120 apresenta grande porcentagem de finos, predominando a fração argila. Texturalmente, esta amostra foi classificada como argila areno-siltosa. Já o solo Vila Secundino apresenta predominância da fração areia, preponderando a areia média, sendo considerado uma areia silto-argilosa.

Figura 2.4-Curvas de distribuição granulométrica dos solos.



subleito. A classificação TRB o qualifica como uma argila plástica [A-7-5 (20)], considerada imprópria para uso como material de subleito.

O solo Vila Secundino, de acordo com o USC, foi qualificado como uma areia argilosa (SC), sendo considerado um solo com boa trabalhabilidade como material de construção e que pode apresentar certo valor para aplicação em fundações de pavimentos. Na classificação TRB, ele se enquadra no grupo A-2-4 (0), podendo ser uma areia siltosa ou argilosa, sendo considerado um material com bom comportamento para uso em subleito.

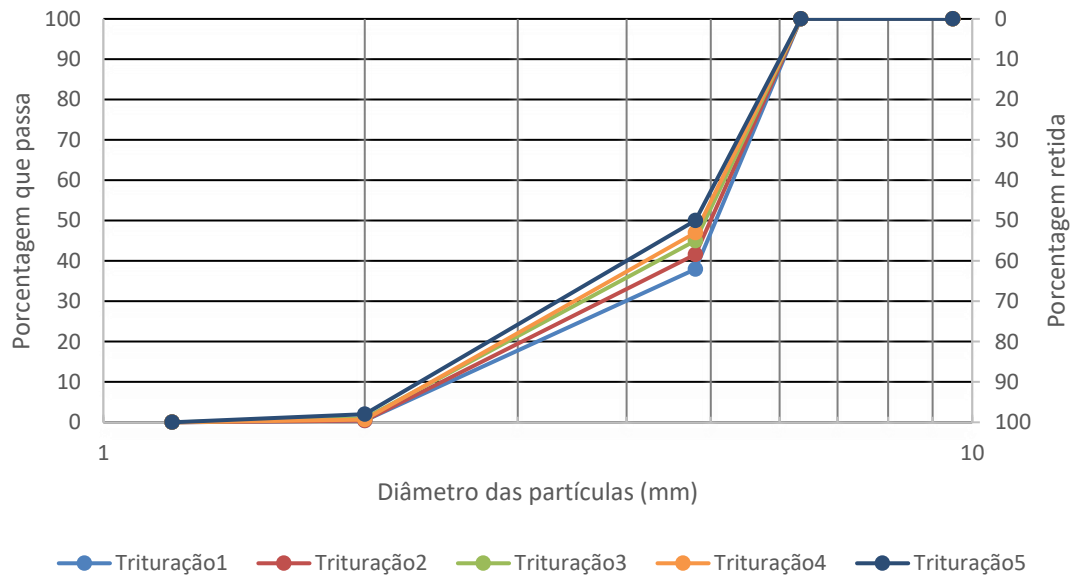
Segundo a classificação pelo sistema MCT, o solo BR-120 se enquadra na classe LG', correspondendo a um solo Laterítico Argiloso, grupo caracterizado por ser formado por argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos pedologicamente conhecidos por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Ao apresentarem percentagem relativamente elevada de grãos de areia, podem também exibir um comportamento semelhante ao dos solos do grupo LA' (Laterítico Arenoso), com aplicação prevista até em camadas de sub-base de pavimentos.

Por sua vez, o solo Vila Secundino se enquadra na classe NA', correspondendo a um solo Não-Laterítico Arenoso. Tratam-se, geralmente, de solos compostos granulometricamente por misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades análogas), com finos passando na peneira de 0,075mm, possuindo como tipos mais representativos os solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo, tais como os granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros. É um material que pode ser aplicado na execução das camadas estruturais de pavimentos.

2.3.3 Análise granulométrica do resíduo de EPS

A partir da análise granulométrica do resíduo de EPS obtido após a sua trituração, foi possível verificar que os grãos de EPS possuem dimensões acima de 1,2 mm (Figura 2.5), ou seja, ele apresenta dimensão granular maior do que os grãos presentes nos solos. Neste ensaio, foi possível identificar que, para a peneira 4,8 mm, cada amostra apresentou percentagens distintas umas das outras, com valores oscilando entre 38% a 51% passantes. Assim, faz-se necessário um maior controle da etapa de trituração dos blocos de EPS para obtenção do resíduo triturado, o que seria possível em uma operação de trituramento e peneiramento em escala industrial, tal como se faz com os agregados para construção civil por exemplo.

Figura 2.5-Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de EPS triturado.



Fonte: Próprio autor.

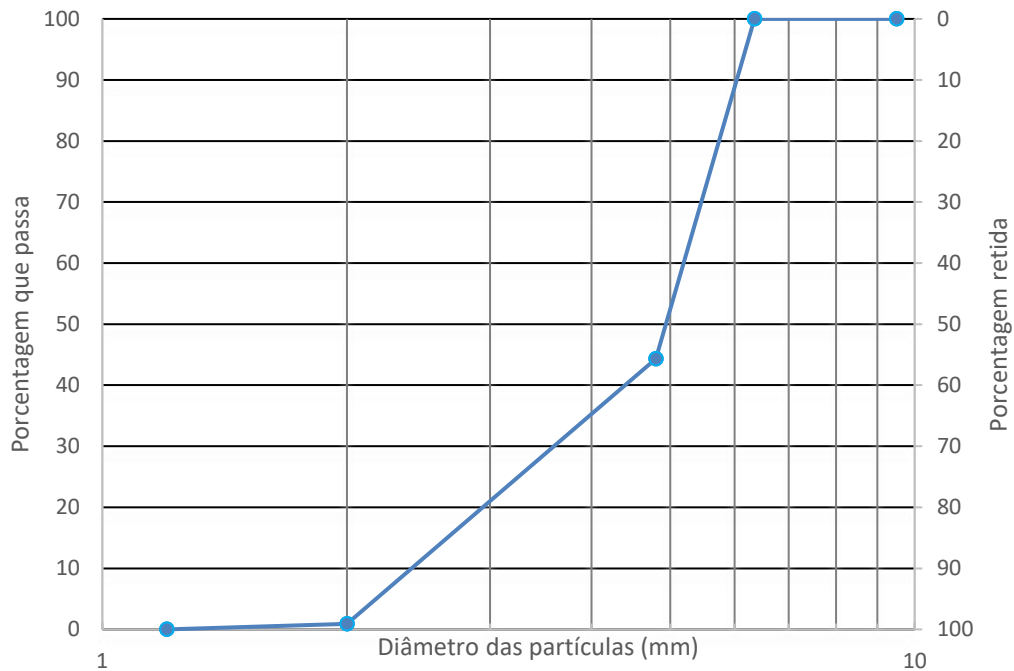
A seguir, está representada a Tabela 2.3, com as porcentagens médias das frações (tamanhos areia e pedregulho) em relação ao resíduo de EPS triturado, além da curva que expressa a média das cinco distribuições granulométricas obtidas (Figura 2.6).

Tabela 2.3- Granulometria média do resíduo de EPS triturado.

EPS triturado	Análise Granulométrica (%)			
	Tamanho Pedregulho ¹	Tamanho Areia ¹		
		Grossa ¹	Média ¹	Fina ¹
Média das curvas	99	1	0	0

¹ Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Figura 2.6-Curva média de distribuição granulométrica do resíduo de EPS triturado.



Fonte: Próprio autor.

2.3.4 Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado

Na Tabela 2.4, encontram-se os respectivos valores de massa unitária dos solos e do resíduo de EPS triturado.

Tabela 2.4- Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado.

Material	Massa unitária (kg/m ³)
Solo BR-120	955,20
Solo Vila Secundino	1210,81
Resíduo de EPS triturado	7,77

As equações pelas quais foram feitas as conversões de volume aparente (V_{EPS}) para massa seca de EPS ($Massa_{EPS}$) em função da massa de solo seco ($Massa_{solo\ seco}$) estão descritas a seguir:

- Equação exemplo

$$V_{EPS=A\%} \rightarrow Massa_{EPS} = \left(\frac{A}{(100-A)} \times \frac{\gamma_{aparente\ do\ EPS}}{\gamma_{aparente\ do\ solo}} \right) \times Massa_{solo\ seco} \quad (1)$$

- Solo BR-120

$$V_{EPS=20\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 1,999 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (2)$$

$$V_{EPS=30\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 3,427 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (3)$$

$$V_{EPS=40\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 5,332 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (4)$$

- Solo Vila Secundino

$$V_{\text{EPS}=20\%} \rightarrow \text{Massa}_{\text{EPS}} = 1,604 \times 10^{-3} \times \text{Massa}_{\text{solo seco}} \quad (5)$$

$$V_{\text{EPS}=30\%} \rightarrow \text{Massa}_{\text{EPS}} = 2,750 \times 10^{-3} \times \text{Massa}_{\text{solo seco}} \quad (6)$$

$$V_{\text{EPS}=40\%} \rightarrow \text{Massa}_{\text{EPS}} = 4,278 \times 10^{-3} \times \text{Massa}_{\text{solo seco}} \quad (7)$$

A seguir está apresentada na Tabela 3.12, as conversões das proporções volumétricas do EPS em relação aos solos, para as proporções em massa.

Tabela 3.12, as conversões das proporções volumétricas do EPS em relação aos solos, para as proporções em massa.

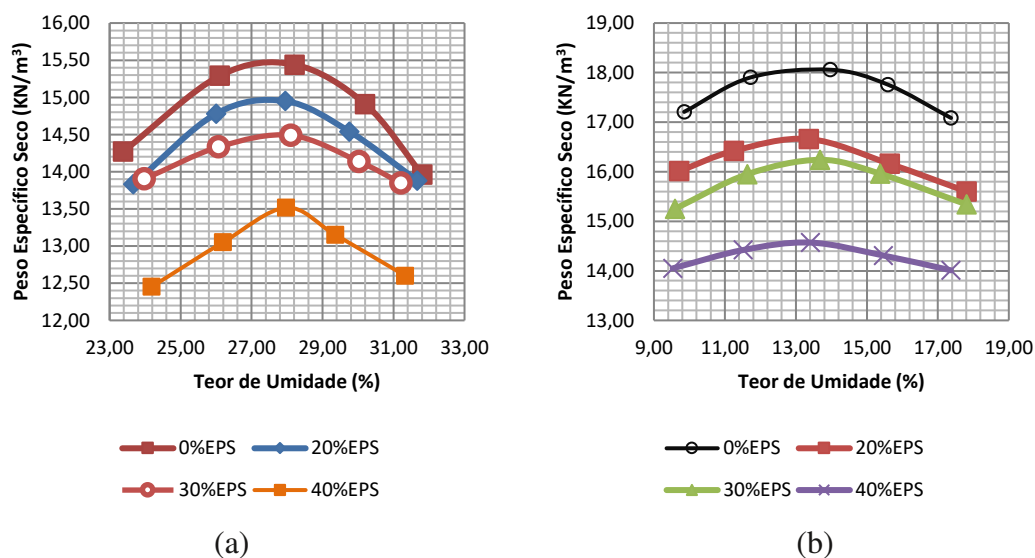
Tabela 2.5-Dados dos valores das proporções em volume e em massa.

CONVERSÃO DAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA PROPORÇÕES EM MASSA		
Proporções Volumétricas do EPS	Proporções em massa do EPS com Solo BR-120	Proporções em massa do EPS com Solo Vila Secundino
20%	0,20%	0,16%
30%	0,34%	0,28%
40%	0,53%	0,43%

2.3.5 Ensaios de compactação

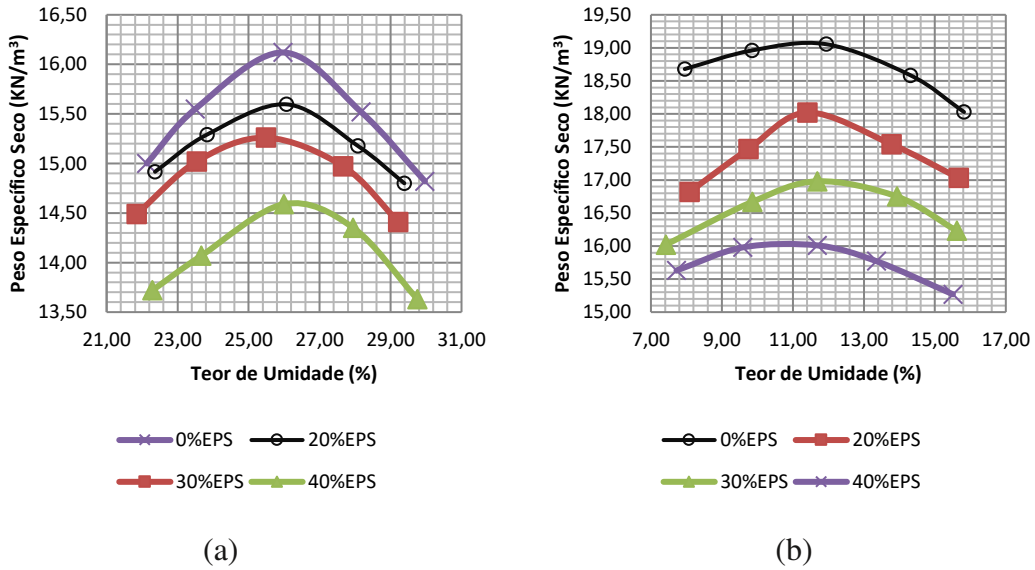
Nas Figuras 2.7 e 2.8, apresentam-se as curvas de compactação para os solos BR-120 e Vila Secundino, tanto em estado natural (0% em volume aparente de resíduo de EPS) quanto em misturas de 20%, 30% e 40% em volume aparente de EPS triturado, utilizando as energias Proctor Intermediária e Modificada. Os respectivos parâmetros ótimos de compactação (peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo) são apresentados nas Figuras 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12.

Figura 2.7-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



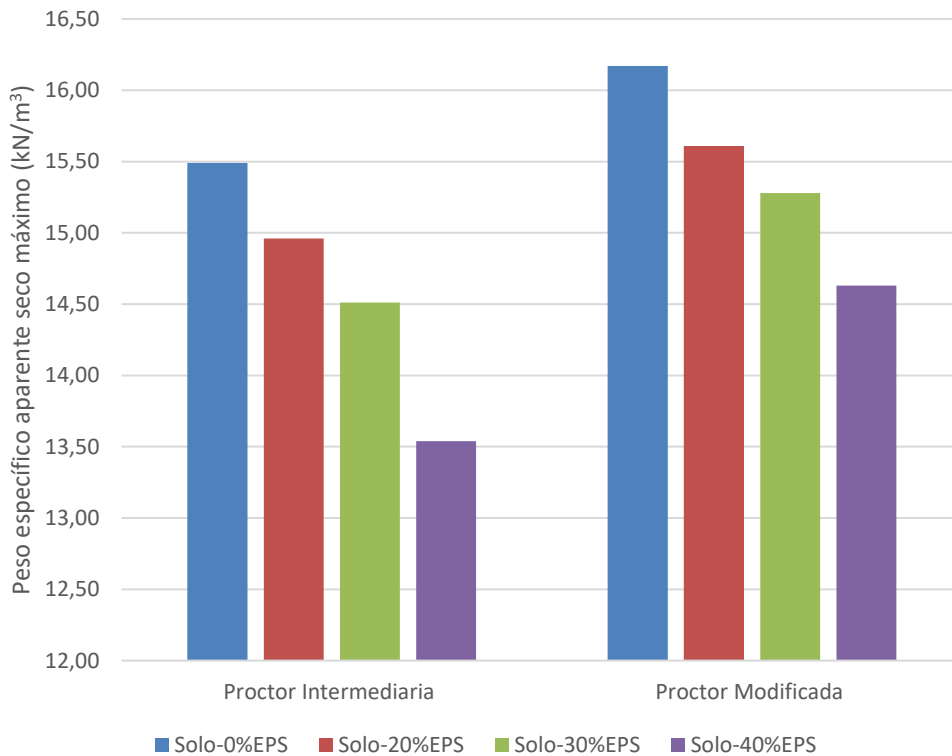
Fonte: Próprio autor.

Figura 2.8-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



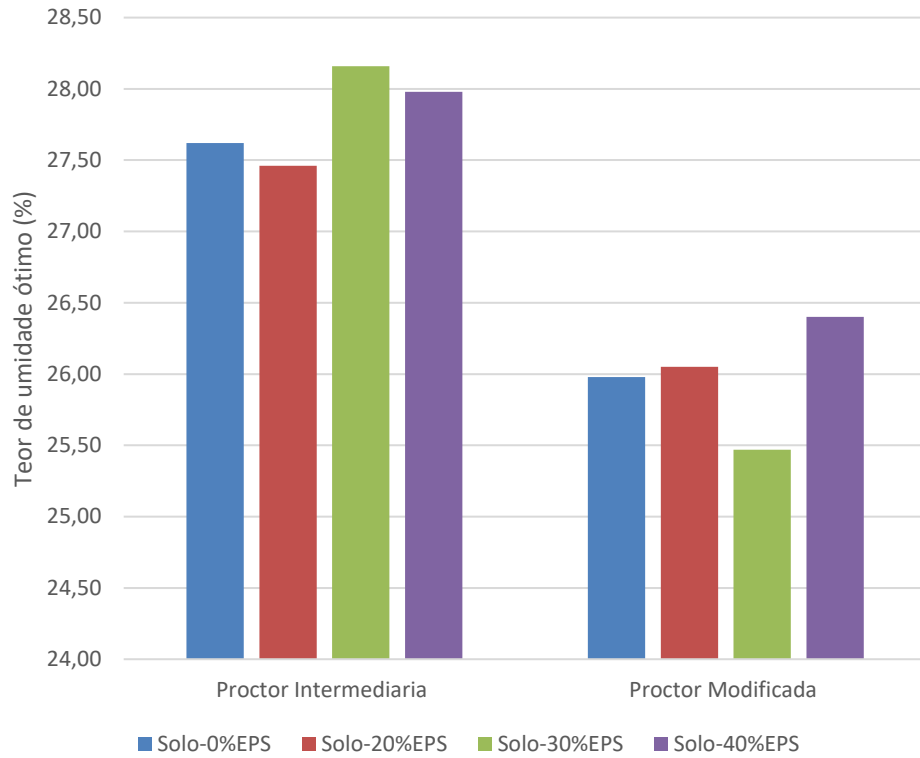
Fonte: Próprio autor.

Figura 2.9-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.



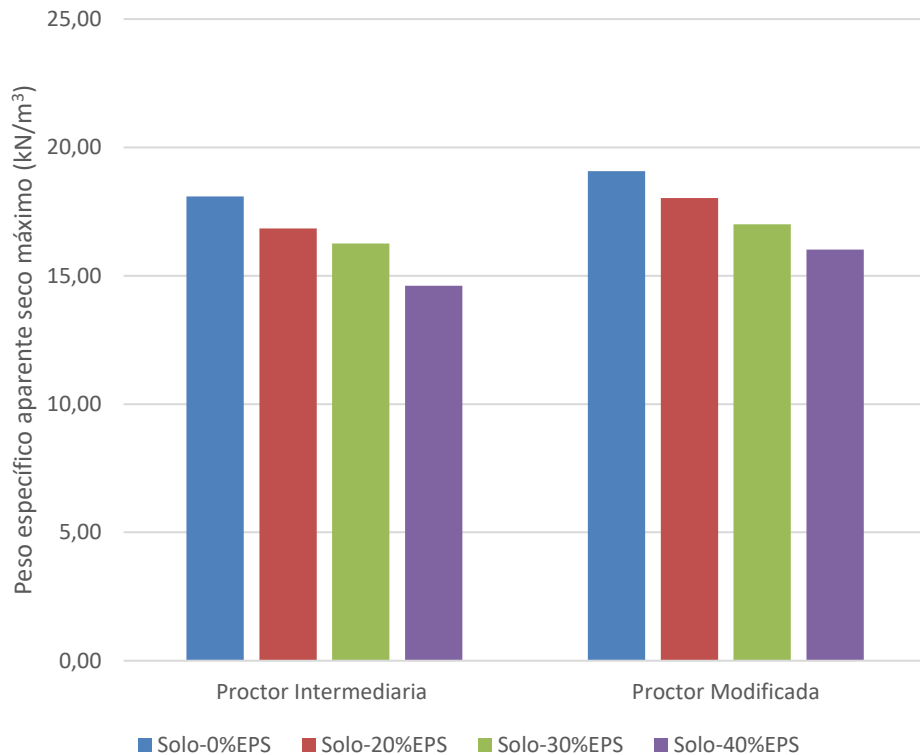
Fonte: Próprio autor.

Figura 2.10-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.



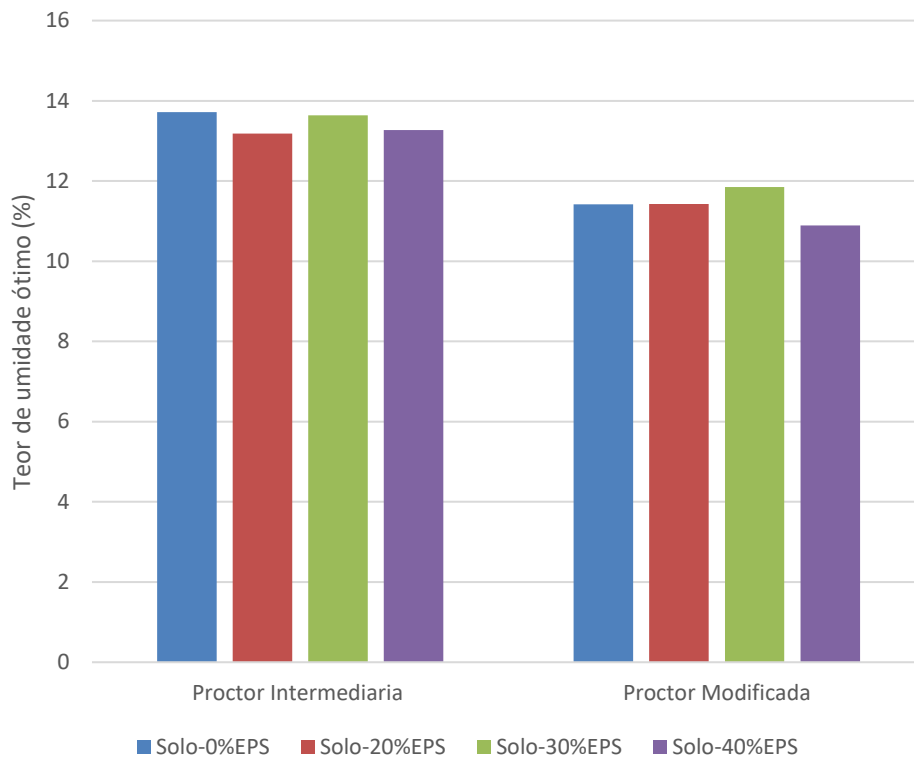
Fonte: Próprio autor.

Figura 2.11-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.12-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.



Fonte: Próprio autor.

Para ambos os solos analisados, independente da energia de compactação, verificou-se que a inclusão do resíduo de EPS triturado implicou em redução do peso específico aparente seco em geral, evidenciada pelo posicionamento gradativamente inferior da curva de compactação, comparativamente à curva do solo natural, com o incremento da percentagem volumétrica do resíduo na mistura. Isso se justifica pela gradativa substituição do solo mais denso pelo resíduo mais leve, resultando em uma menor massa seca por unidade de volume compactado.

Como consequência direta dessa tendência, o peso específico aparente seco máximo também tem sua magnitude reduzida com os sucessivos acréscimos percentuais de resíduo. Essa característica pode ser importante, pois, desse modo, obras geotécnicas que forem assentadas sobre materiais com baixa resistência e alta deformabilidade poderão obter vantagem na utilização de um material mais leve, pois o mesmo solicitará menos o material de fundação, evitando assim recalques excessivos e, como consequência, o colapso da estrutura por deformação excessiva.

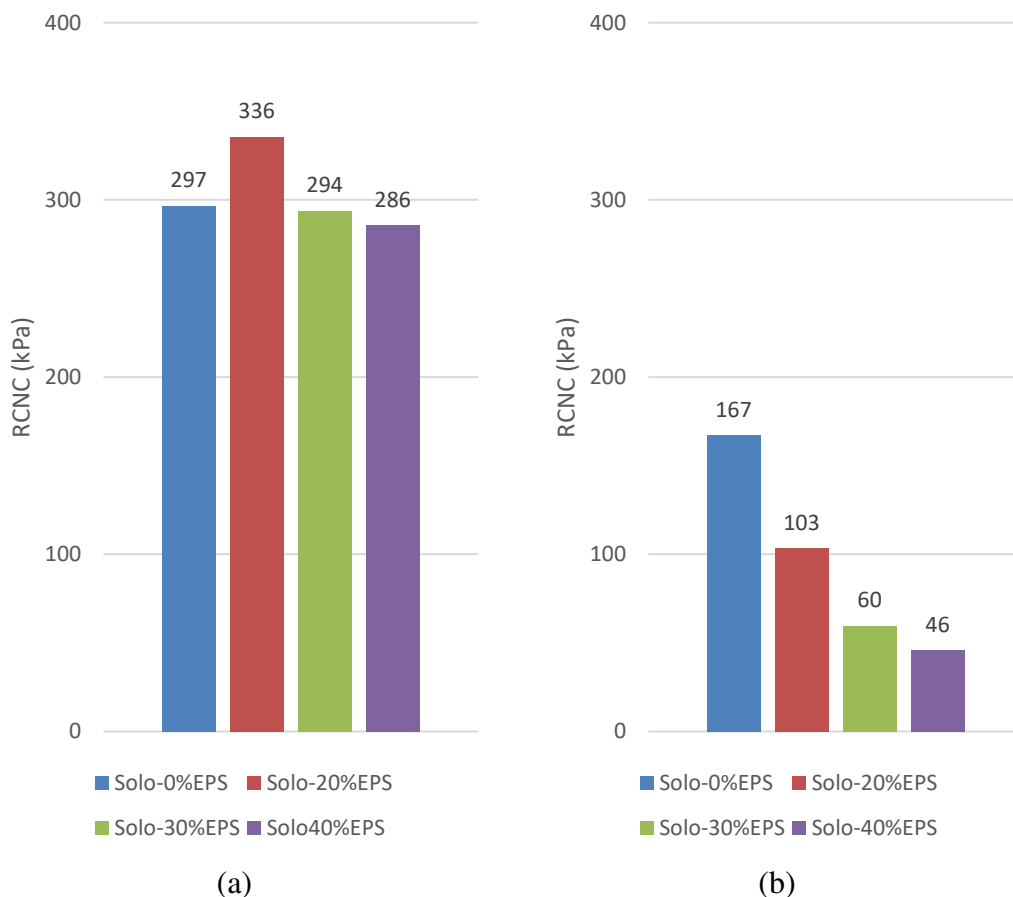
O mesmo não se constatou para o teor de umidade ótimo de compactação, o qual se mostrou menos sensível ao efeito da incorporação do resíduo, sofrendo variações pouco

significativas. Conclui-se que a incorporação do resíduo de EPS não modifica a demanda hídrica do sistema submetido à compactação, de modo que a necessidade de água para promover o rearranjo das partículas do sistema solo-EPS é essencialmente a mesma das partículas do solo. Este comportamento também foi verificado por outros trabalhos envolvendo misturas solo-EPS (ABDELRAHMAN, MOHAMED e AHMED, 2013; SILVEIRA, CALHEIROS e CASAGRANDE, 2018).

2.3.6 Ensaios de Resistência à Compressão Não Confinada

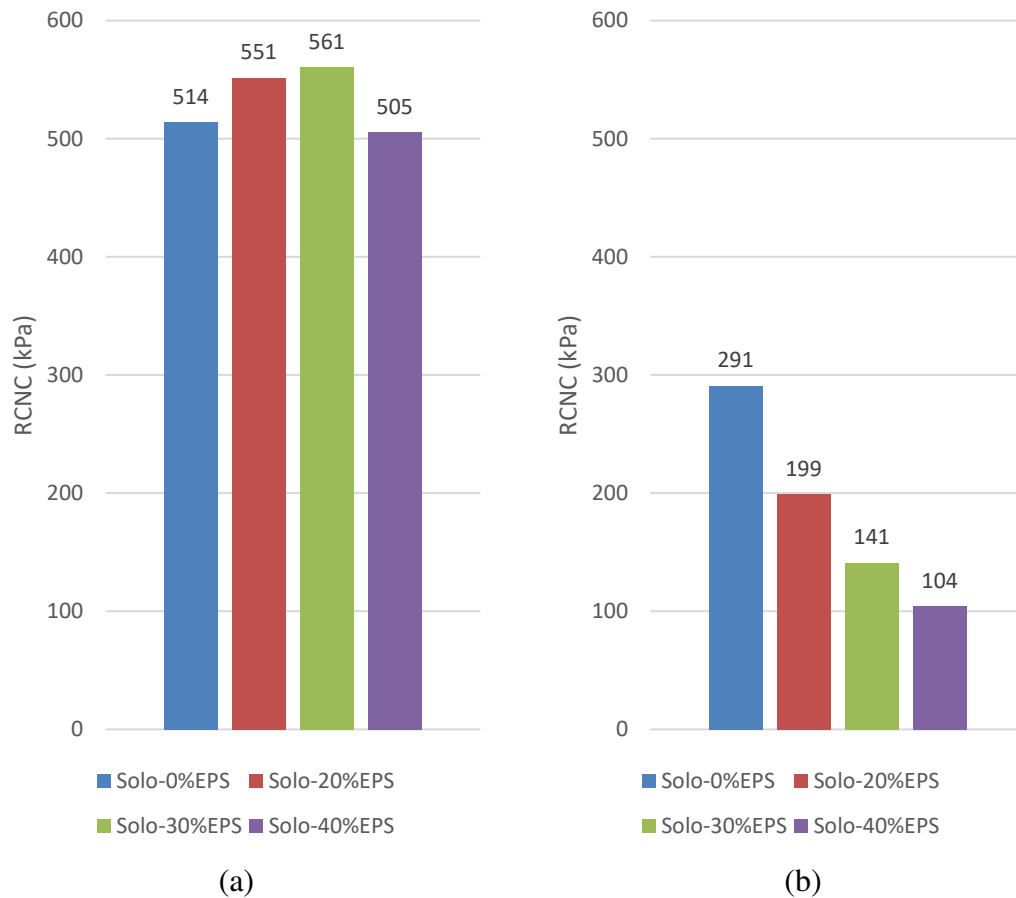
Os valores de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) dos solos BR-120 e Vila Secundino e das respectivas misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada, são apresentados nas Figuras 2.13 e 2.14, respectivamente. Os valores de CV das repetições variaram entre 2,2% e 7,7%, portanto dentro do limite pré-estabelecido ($CV \leq 10\%$).

Figura 2.13-Resultados de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) dos solos e das misturas solo-EPS, na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.14-Resultados de Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC) dos solos e das misturas solo-EPS, na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados do ensaio de RCNC, nas energias Proctor Intermediária e Modificada, indicaram comportamentos nitidamente distintos para os solos investigados. O solo BR-120 obteve uma ligeira variação da RCNC com a inclusão do resíduo de EPS, enquanto que, para o solo Vila Secundino, esta variação foi bem mais considerável, mostrando neste último caso uma clara tendência de piora da resposta mecânica do material com o acréscimo do resíduo de EPS ao solo.

O solo BR-120 apresentou uma ligeira melhora na RCNC na proporção de 20% de EPS, na energia Proctor Intermediária, e de 20% e 30%, na energia Proctor Modificada. Para as outras proporções, os resultados foram similares aos do solo puro compactado. Pode-se considerar que a adição de EPS não implicou em mudanças significativas no parâmetro de resistência à compressão do material.

Analisando as particularidades do ensaio, que mobiliza a resistência através da compressão axial do corpo de prova com ausência de confinamento lateral, depreende-se que a interação entre os grãos sob condição de livre deformação transversal ao eixo de carregamento

é o principal fator de mobilização desta resistência. Essa interação é regida pelas contribuições das componentes de resistência por adesão (aderência) e por fricção (atrito) nos pontos de contato entre as partículas constituintes do compósito solo-EPS.

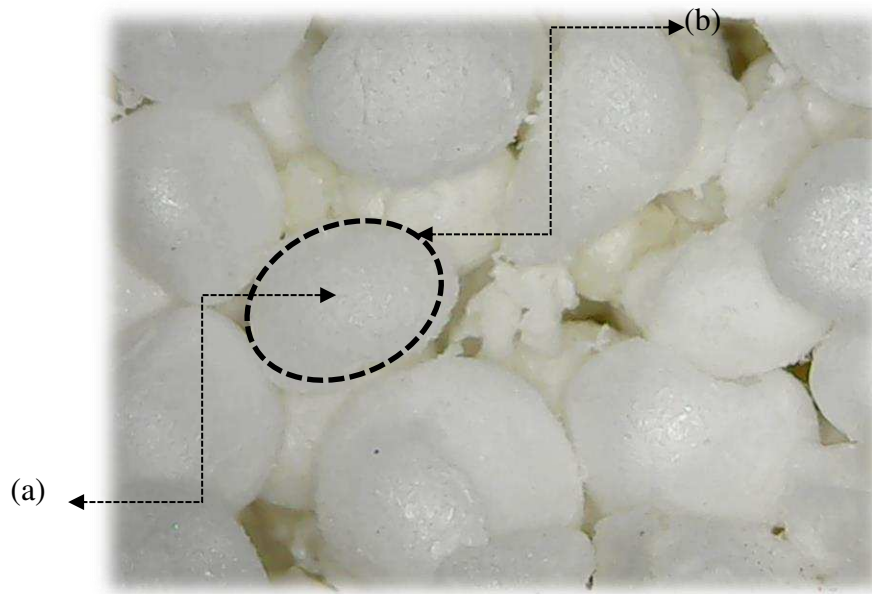
Para o solo BR-120, de granulometria argilosa e, portanto, constituído predominantemente por partículas de menor tamanho, ainda que o número de contatos entre as partículas tenha diminuído pela substituição parcial de partículas de menor tamanho (presentes no solo removido mais fino) por partículas de maior tamanho (presentes no resíduo de EPS mais granular), supõe-se que houve a manutenção de um número ainda significativo de contatos entre as partículas constituintes do compósito e, portanto, um número ainda significativo de interações entre as partículas do solo e as partículas do resíduo de EPS.

Devido o EPS possuir elevada rigidez (AVESANI NETO e BUENO, 2009a e MÁRCIO DE SOUZA e MARQUES, 2010), deste modo, para essa configuração estrutural, as tensões concentradas atuantes nos pontos de contato interpartículas têm suas magnitudes reduzidas em decorrência da maior rigidez relativa das partículas de EPS comparativamente às do solo argiloso. A maior rigidez das partículas de EPS implica em maior absorção por estas das tensões internas geradas pelo carregamento compressivo axial, promovendo a redistribuição destas para as partículas do solo em níveis inferiores ou equivalentes aos transmitidos na estrutura interna do solo puro (sem adição de EPS). Admite-se, portanto, que a perda de desempenho estrutural promovida pela redução do número de contatos interpartículas seja compensada por esse mecanismo de redistribuição de tensões internas.

Considerando-se que as partículas de EPS apresentam uma textura superficial essencialmente lisa e uma morfologia essencialmente arredondada (Figura 2.15), a despeito do seu caráter eminentemente granular (Tabela 2.3), presume-se que a interação por atrito entre estas e as partículas do solo argiloso são limitadas, resultando em igualmente restrita contribuição da componente de resistência friccional na mobilização da rigidez e da resistência à compressão do compósito sob a ação da sollicitação compressiva axial característica do ensaio.

Supõe-se, portanto, que a componente de resistência por adesão seja a principal responsável pela resposta mecânica do compósito para o estado de tensões característico do ensaio, restringindo a deformabilidade à compressão do compósito e, conseqüentemente, demandando um maior nível de sollicitação compressiva para vencer essa restrição e conduzir a estrutura interna do sistema solo-EPS à ruptura.

Figura 2.15-Imagem de amostra de resíduos de EPS triturados obtida por microscopia óptica: textura superficial lisa (a) e morfologia arredondada (b) de partícula representativa.

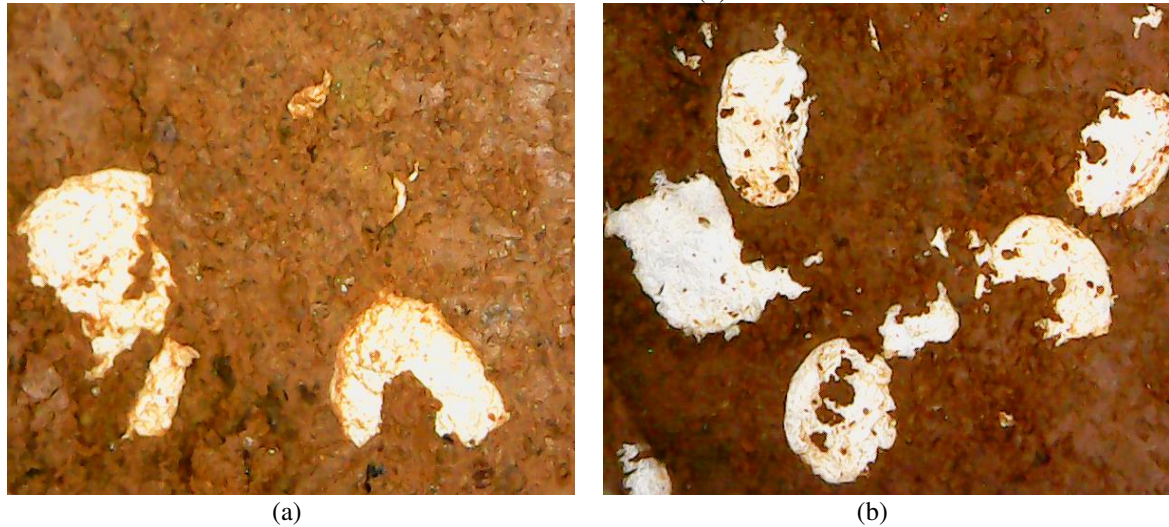


Fonte: Próprio autor.

Os maiores graus de arredondamento e de lisura superficial das partículas de EPS e o caráter intrinsecamente coesivo das partículas de argila favorecem a adesão interfacial entre tais partículas, adesão essa que se multiplica nos diversos pontos de contato interpartículas previamente mencionados, favorecendo a transmissão de tensões internas às partículas de EPS mais rígidas e, por conseguinte, a sua redistribuição em níveis inferiores ou equivalentes aos do sistema sem adição de EPS. Constata-se experimentalmente que as partículas de EPS estão “aprisionadas” na massa de solo compactada em decorrência do caráter coesivo do material geológico constituinte do compósito (Figura 2.16) e a outra característica que se constata é boa aderência entre o solo e o resíduo de EPS que é demonstrada em detalhe na imagem do Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV (

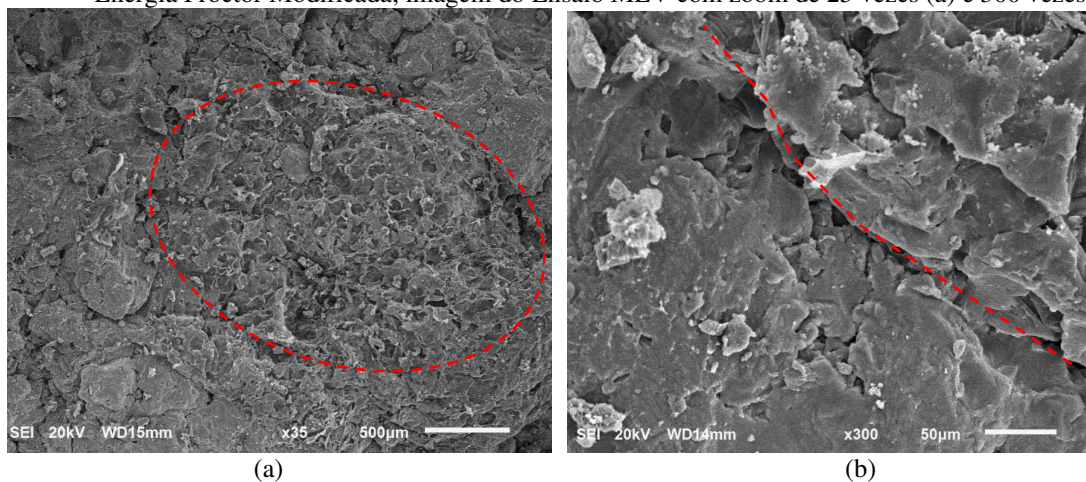
Figura 2.17).

Figura 2.16-Imagens de amostras do compósito solo argiloso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes do “aprisionamento”, por adesão interfacial, das partículas de EPS na massa de solo coesivo. Solo BR-120 com 30% em proporção volumétrica de EPS na Energia Proctor Modificada (a) e Proctor Intermediária (b).



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.17-Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS com textura mais fibrosa delimitado por linhas tracejada vermelha, envolvido pela massa do solo na amostra com proporção volumétrica de 30% EPS na Energia Proctor Modificada, imagem do Ensaio MEV com zoom de 25 vezes (a) e 300 vezes (b).

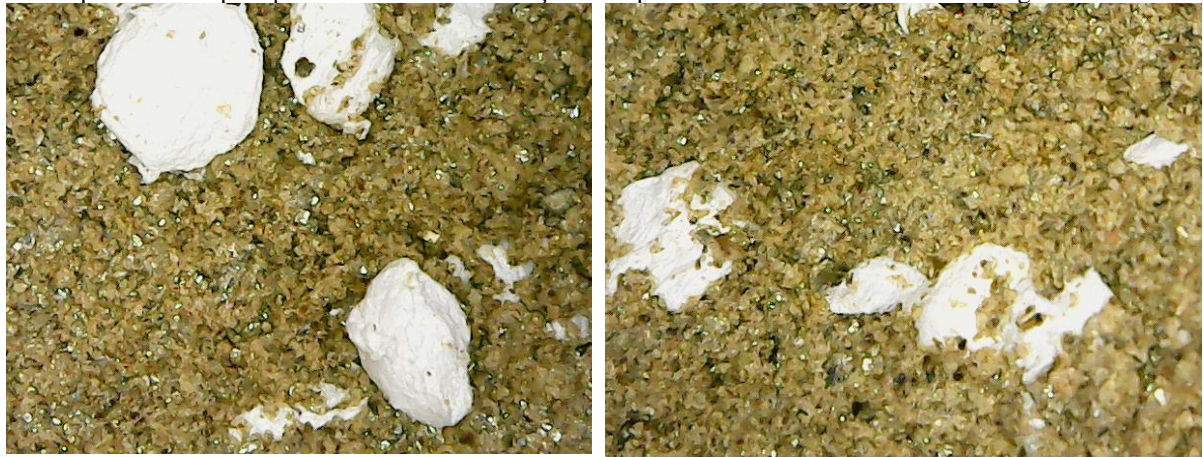


Fonte: Próprio autor.

O solo Vila Secundino, de granulometria arenosa, apresentou significativa redução em sua RCNC com a inclusão do resíduo de EPS. Nesse caso, pelas características granulométricas de ambos materiais, essencialmente granulares, e considerando-se que houve substituição parcial de um material granular “mais fino” (solo arenoso) por um material granular “mais grosso” (resíduo de EPS), estima-se, para essa configuração, a existência de um menor número de contatos entre as suas respectivas partículas e, conseqüentemente, de tensões concentradas de maior magnitude dada a menor quantidade de pontos de transmissão das tensões internas geradas pelo carregamento compressivo externo.

Também em função de seu caráter granular, não há expectativa de que a interação entre as suas partículas possa implicar em adesão e, conseqüentemente, em contribuição dessa componente de resistência à resposta mecânica do compósito. Seria admissível supor, portanto, que a componente de resistência friccional dominasse a interação entre as partículas granulares de ambos os materiais e regesse sua rigidez e resistência à compressão, porém, conforme previamente mencionado, os elevados graus de arredondamento e de lisura superficial das partículas de EPS diminuem o grau de imbricamento e o atrito interfacial entre as partículas. Constata-se experimentalmente que as partículas de EPS “flutuam” na massa de solo granular compactada, estando soltas nessa massa em decorrência da aludida falta de interação (Figura 2.18).

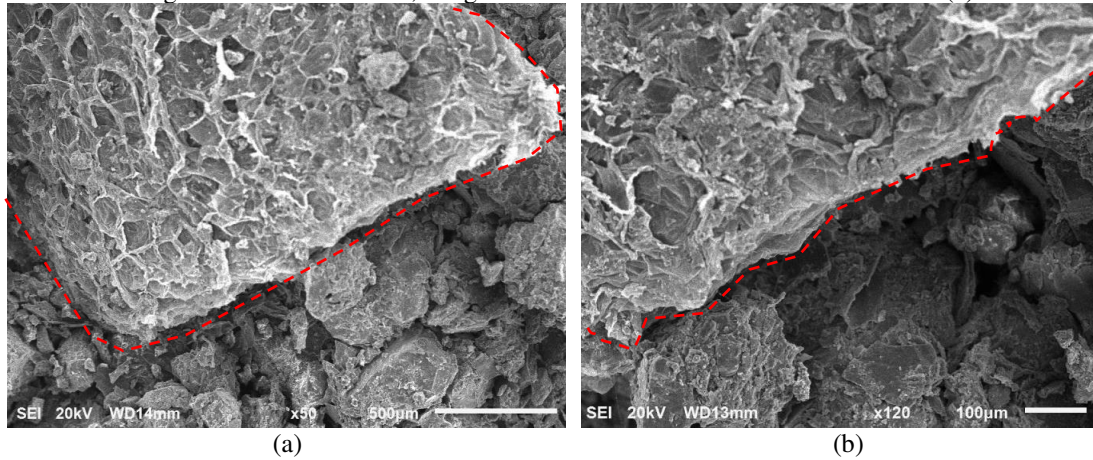
Figura 2.18-Imagens de amostras do compósito solo arenoso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes da “flutuação” das partículas de EPS na massa de solo granular.



Fonte: Próprio autor.

Portanto, sem adequadas interações interfaciais por adesão e/ou por atrito, a transmissão das tensões internas às partículas de EPS é ineficiente, impedindo a redistribuição destas e, conseqüentemente, implicando em efeito nitidamente adverso de perda de resistência do solo arenoso combinado com o resíduo. Na verdade, a deficiente interação interfacial entre as partículas de solo arenoso e as partículas de EPS converte essas interfaces em pontos de fraqueza do compósito, nos quais se dá sua ruptura à compressão axial em níveis muito inferiores ao do solo puro compactado. A falta de interação fica explícita nas imagens do Ensaio MEV (Figura 2.19), que mostra a separação física entre o solo Vila Secundino e o resíduo de EPS.

Figura 2.19-Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS com textura mais fibrosa delimitado por linhas tracejada vermelha, em contato com solo Vila Secundino na amostra com proporção volumétrica de 30% EPS na Energia Proctor Modificada, imagem do Ensaio MEV com zoom de 50 vezes (a) e 120 vezes.



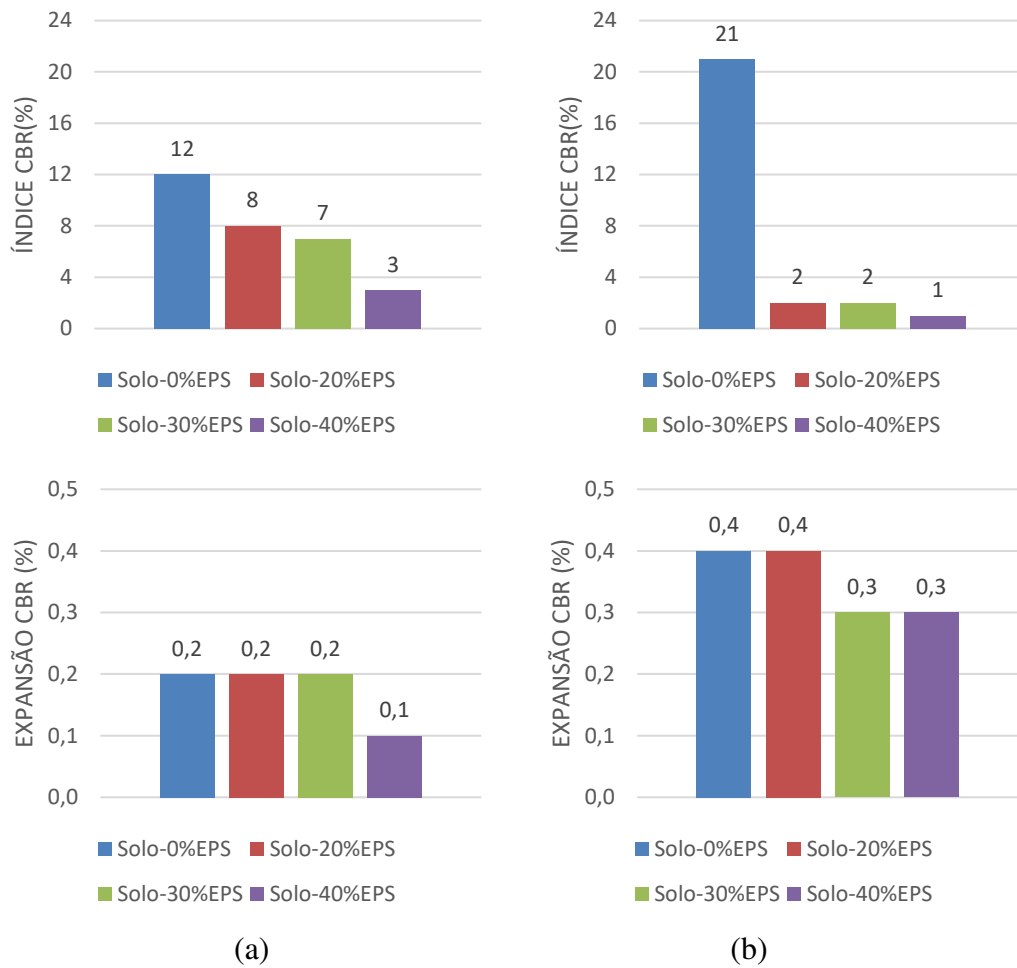
Fonte: Próprio autor.

As interfaces entre o solo e o EPS promove o surgimento de zonas de fraqueza (menor resistência), sugerindo assim à medida que o corpo-de-prova é solicitado axialmente sem o confinamento lateral, há uma propagação destas zonas de fraqueza contribuindo para o surgimento de fissuras e trincas que se propagam instantaneamente quando o corpo-de-prova é solicitado. Deste modo a resistência a compressão não confinada do solo Vila Secundino em mistura com o resíduo de EPS é bem inferior ao solo puro, devido à falta de interação entre os grãos do solo com o EPS.

2.3.7 Ensaios CBR

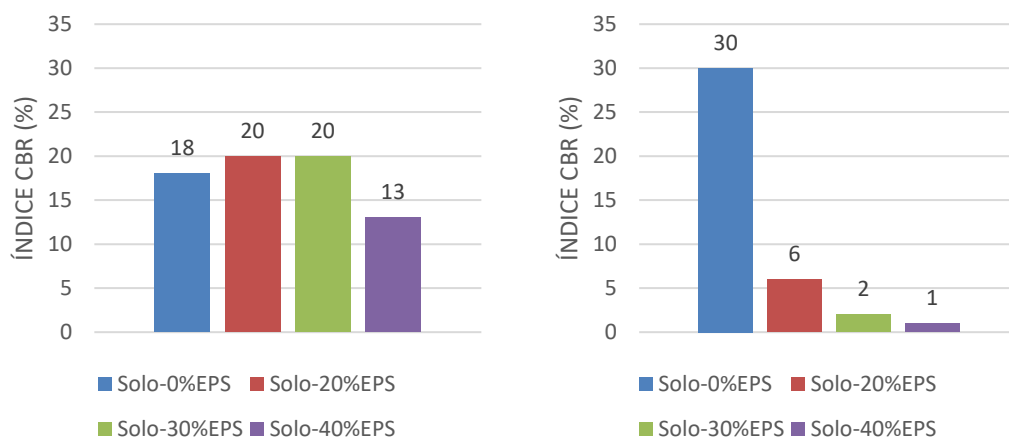
Os valores de Índice CBR e de Expansão CBR dos solos BR-120 e Vila Secundino e das respectivas misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada, são apresentados nas Figura 2.20 e Figura 2.21, respectivamente. Os valores de CV das repetições variaram entre 5,8% e 8,9%, portanto dentro do limite pré-estabelecido ($CV \leq 10\%$).

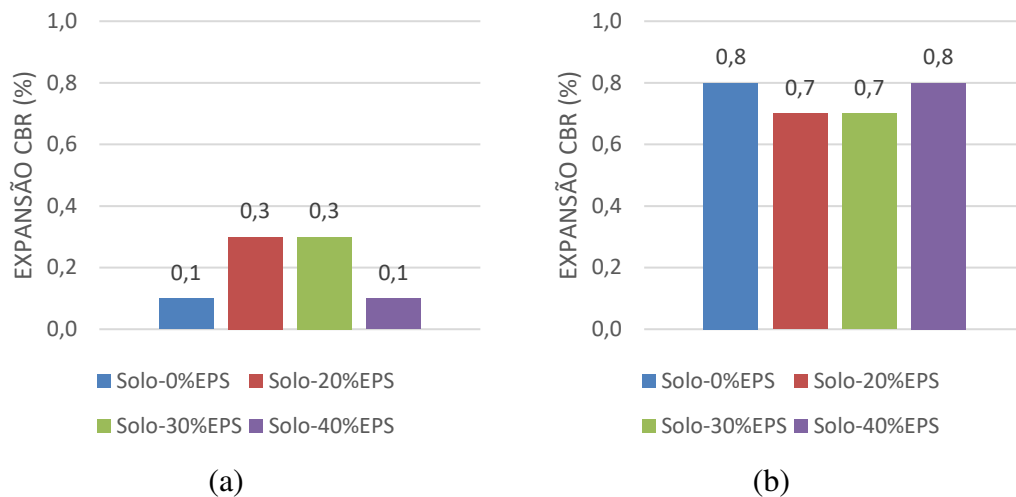
Figura 2.20-Resultados do Índice CBR e da Expansão CBR dos solos e das misturas solo EPS na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.21-Resultados do Índice CBR e da Expansão CBR dos solos e das misturas solo EPS na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.





Fonte: Próprio autor.

Os resultados do Índice CBR indicaram comportamentos nitidamente distintos para os solos investigados. Salienta-se que esse índice retrata a resistência oferecida pelo material compactado ao esforço puncionante imposto em sua superfície por um pistão de carga, sob condição de confinamento apenas lateral promovido pelas paredes do molde cilíndrico no qual o material se encontra confinado. Conforme o tipo de material ensaiado, o índice CBR traduz a resposta resistente do material mobilizada pela contribuição da resistência coesiva e/ou friccional de um solo. Portanto, os respectivos resultados desse índice para os compósitos investigados podem ser explicados segundo as mesmas hipóteses de interação entre as partículas dos solos e as partículas de EPS previamente apresentadas.

Para o solo BR-120, sob a ação das tensões cisalhantes internas geradas pelo mecanismo de puncionamento, a resistência traduzida pelo índice CBR deve-se predominantemente à parcela de adesão interfacial entre as partículas do solo e as partículas de EPS. Salienta-se, porém, que, para este tipo de solicitação, a resposta resistente do compósito é fortemente dependente do nível de energia de compactação aplicado.

Para uma energia de compactação mais baixa (Proctor Intermediária), a adesão interfacial entre as partículas de solo e de EPS não foi suficiente para manter o equilíbrio do sistema puncionado equivalente ao do solo puro compactado, justificando os menores valores do índice CBR comparativamente ao solo. O aumento da energia de compactação (Proctor Modificada) foi capaz de suprir as deficiências do mecanismo de interação por aderência entre as partículas de solo e as partículas de resíduo de EPS, elevando a resistência ao puncionamento para níveis similares ao do solo (proporções volumétricas de 20% e 30% de EPS).

Outro aspecto a ser ressaltado da contribuição da maior energia de compactação em reposta a resistência do material frente a solicitação do puncionamento do ensaio CBR, é o

aumento da rigidez do EPS promovido pela maior deformação (densificação) durante o processo de compactação, resultando assim em uma maior dificuldade de penetração do pistão do ensaio CBR, resultando assim em uma maior resistência do compósito.

Para o solo Vila Secundino, os resultados do Índice CBR indicaram tendências de comportamento semelhantes para ambas energias de compactação consideradas, constatando-se uma nítida e significativa redução da resistência ao puncionamento do material com o acréscimo de resíduo de EPS, independentemente do nível de energia de compactação aplicado.

As deficientes interações entre os materiais constituintes do compósito justificam a não mobilização das resistências por adesão (equivalente à coesão) e por atrito na interface solo-EPS, as quais respondem pela resistência às tensões cisalhantes internas impostas pelo puncionamento externo que caracteriza o ensaio. Assim, por constituírem zonas de fraqueza do material, as rupturas por puncionamento se dão nestas interfaces, em níveis muito inferiores ao do solo puro compactado.

Além disto, a deficiência das interações entre o solo Vila Secundino e o EPS, ocasionou durante o processo de inundação do corpo-de-prova, que a água ocupasse os espaços entre o resíduo e o solo, e quando o corpo-de-prova foi solicitado pelo pistão durante o ensaio CBR, promoveu um aumento da deficiência de interação entre o solo e o resíduo EPS devido a lubrificação dos grãos pelo processo de inundação, resultando assim em uma menor resistência do solo em mistura com o EPS em relação ao solo puro.

As expansibilidades (Expansão CBR), nas respectivas energias de compactação (Proctor Intermediária e Modificada), apresentaram pequena variação com a inclusão do resíduo de EPS, independentemente do tipo de solo constituinte do compósito. Este fenômeno pode ser justificado pela inércia química do EPS, que torna o compósito menos suscetível à expansibilidade decorrente da hidratação.

Considerando-se as exigências técnicas estabelecidas pelo DNIT (2006), conforme Tabela 2.1, a Tabela 2.6 apresenta um resumo do potencial de aplicação dos materiais investigados em camadas estruturais de pavimentos asfálticos.

Tabela 2.6- Aplicabilidade dos materiais investigados segundo as exigências de DNIT (2006) para camadas estruturais de pavimento asfáltico.

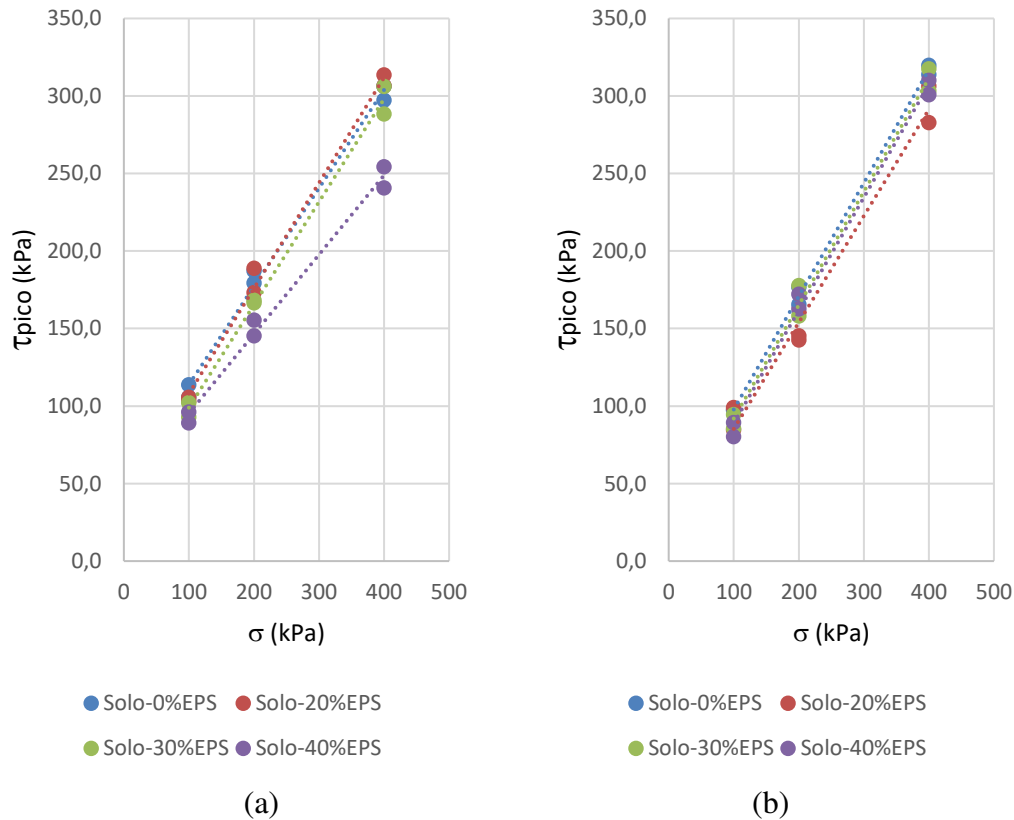
Material	Camada estrutural aplicável	
	Energia Proctor Intermediária	Energia Proctor Modificada
Solo BR-120	Reforço de subleito	Reforço de subleito
Solo BR-120-20%EPS	Reforço de subleito	Sub-base
Solo BR-120-30%EPS	Reforço de subleito	Sub-base
Solo BR-120-40%EPS	-	Reforço de subleito

Solo Vila Secundino	Sub-base	Sub-base
Solo Vila Secundino-20%EPS	-	Reforço de subleito
Solo Vila Secundino-30%EPS	-	-
Solo Vila Secundino-40%EPS	-	-

2.3.8 Ensaios de Resistência ao Cisalhamento Direto

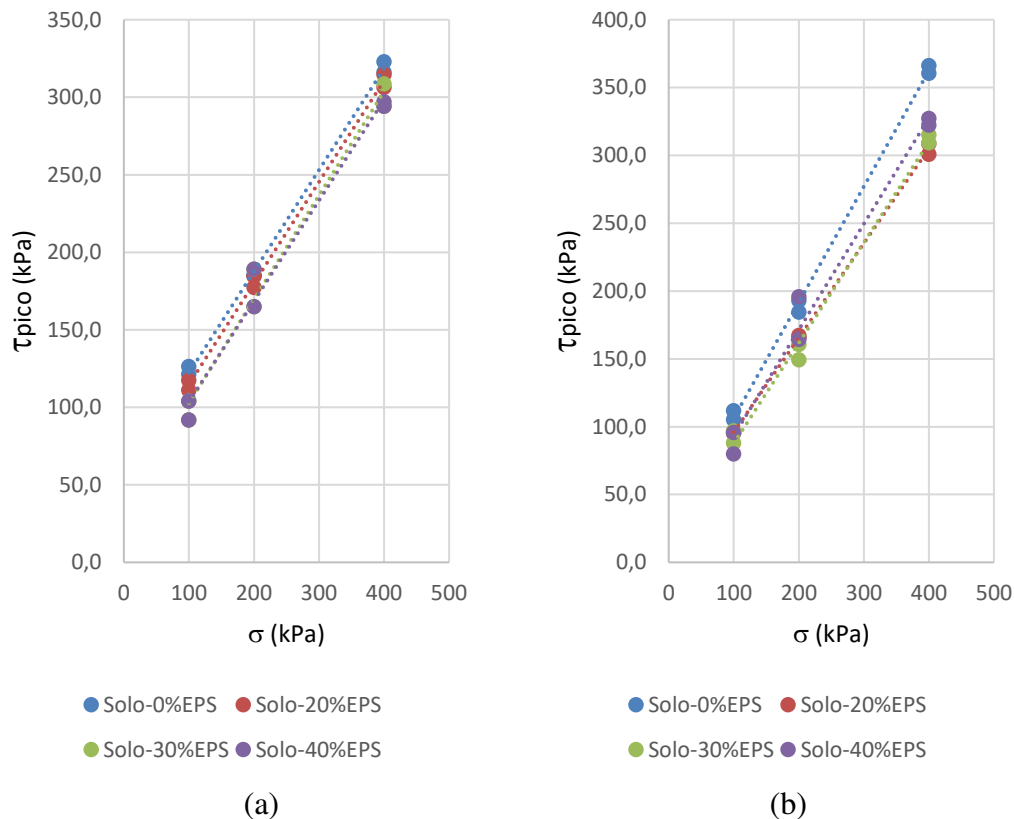
As envoltórias de Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico}) dos solos BR-120 e Vila Secundino e das respectivas misturas solo-EPS, compactados nas energias Proctor Intermediária e Modificada, são apresentadas nas Figura 2.22 e Figura 2.23, respectivamente. Os correspondentes parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto coesivo e ângulo de atrito interno) são apresentados na Tabela 2.7.

Figura 2.22-Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico}) dos solos e das misturas solo-EPS compactados na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.23- Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento de Pico (τ_{pico}) dos solos e das misturas solo-EPS compactados na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2.7-Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento de Pico dos solos (BR-120 e Vila Secundino) e das respectivas misturas solo-EPS compactados nas energias Proctor Intermediária e Modificada.

Solo BR-120						
MATERIAL	Proctor Intermediária			Proctor Modificada		
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)	R ²	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)	R ²
SOLO-0%EPS	50	32	0,9941	57	33	0,9986
SOLO-20% EPS	40	34	0,9946	49	33	0,9979
SOLO-30% EPS	33	34	0,9948	46	32	0,9924
SOLO-40% EPS	31	30	0,9988	39	33	0,9851
Solo Vila Secundino						
MATERIAL	Proctor Intermediária			Proctor Modificada		
	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)	R ²	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)	R ²
SOLO-0%EPS	25	36	0,9984	21	40	0,9985
SOLO-20% EPS	17	34	0,9847	26	35	0,9992
SOLO-30% EPS	19	36	0,9929	14	37	0,9948
SOLO-40% EPS	16	36	0,9953	15	38	0,9852

Para o solo BR-120, predominantemente argiloso, a inclusão do resíduo de EPS é fisicamente equivalente à inclusão de material granular arredondado e liso em sua composição, implicando em redução de sua componente resistente coesiva e leve incremento de sua parcela resistente friccional. Essa tendência é mais acentuada para o cenário de menor esforço compactativo (energia Proctor Intermediária), realçando a influência do nível de compactação no desenvolvimento dos mecanismos de interação interfacial solo-EPS que respondem pela resistência do compósito quando solicitado.

Para o solo Vila Secundino, a inclusão do resíduo de EPS também seria fisicamente equivalente à inclusão de material granular arredondado e liso, reduzindo sua contribuição coesiva (já originalmente reduzida dado o caráter intrinsecamente granular do material) e diminuindo o atrito nos pontos de contato entre as partículas de solo e as partículas de resíduo (pelo menor imbricamento e pela lisura superficial das partículas de EPS).

A redução da parcela coesiva com o acréscimo do resíduo EPS pode ser também justificada, pois a presença dos grãos do EPS provocou a desestruturação do solo, o que fez a coesão mudar, pois, teoricamente se mudou a continuidade do solo.

O aumento no ângulo de atrito e a redução da parcela coesiva, pelo acréscimo de resíduo em incorporação aos solos, foi também evidenciado em outros estudos que envolveram a mistura solo e borracha de pneu triturada (resíduo), onde o resíduo de borracha de pneu se assemelha ao resíduo de EPS, pelas suas características de ser inerte quimicamente e possuir sua granulometria mais grossa em relação aos solos. Os estudos que relataram estes comportamentos (aumento da parcela atritiva e redução da componente resistente coesiva) foi de Zornberg 2004 em solos arenosos e silto arenosos, Franco, Costa e Silva 2011 em uma areia argilosa, Franco 2012 em uma areia argilosa, Chursciak 2013 em uma argila arenosa, Suárez 2016 em uma argila arenosa, De Moraes, Bandeira e Menegotto 2018 em uma argila siltosa.

Há que se destacar, porém, que diferentemente das respostas mecânicas oferecidas pelo compósito solo arenoso-EPS nos ensaios prévios (RCNC e CBR), o ensaio de cisalhamento direto não indicou alterações bruscas na resposta cisalhante do material, cujas envoltórias de resistência e correspondentes parâmetros de resistência ao cisalhamento não apresentaram, comparativamente ao solo arenoso puro compactado, variações tão bruscas na propriedade resistente quantificada.

Para o ensaio de cisalhamento direto, o confinamento do compósito pela tensão de adensamento, normal ao plano de cisalhamento, apresenta-se como condição de contorno fundamental para impedir a exposição do material ensaiado a limitações similares àquelas que, nos ensaios de RCNC e CBR, onde tal confinamento inexistia, deflagraram a brusca perda de

resistência do compósito arenoso. Portanto, no caso de materiais arenosos, o confinamento aparenta ser condição de contorno essencial para a avaliação da viabilidade técnica do produto de engenharia.

Por fim, a despeito da constatação experimental de cenários de redução seja da componente coesiva seja da componente friccional, as envoltórias de resistência, que retratam a ação conjugada dessas componentes na mobilização da resistência ao cisalhamento, evidenciam a existência de compósitos solo-EPS que, para determinadas energias de compactação e determinadas composições volumétricas, apresentam, para o tipo particular de sollicitação do ensaio de cisalhamento direto, desempenho mecânico equivalente ou superior ao apresentado pelo solo.

2.4 CONCLUSÕES

Após o programa experimental realizado, pode-se concluir que:

- ✓ A inclusão do EPS proporcionou uma redução da densidade seca das misturas comparativamente aos solos, sugerindo, assim, uma possível vantagem técnica em sua utilização em obras geotécnicas que serão assentadas sobre materiais de baixas resistência e rigidez;
- ✓ A resposta mecânica do compósito solo-EPS se mostrou essencialmente dependente das características granulométricas do solo: para as particularidades da pesquisa, o solo argiloso apresentou, em geral, melhores respostas mecânicas à ação do resíduo de EPS que o solo arenoso;
- ✓ As diferentes respostas mecânicas dos solos investigados à ação da inclusão (resíduo de EPS) podem ser explicadas pelos mecanismos de aderência e de atrito na interface entre as partículas de solo e de resíduo de EPS;
- ✓ Os cenários investigados apontam para a existência de um intervalo ótimo de adição do resíduo de EPS (20% a 30% em volume) capaz de proporcionar melhoria ou equivalência de propriedades mecânicas do compósito comparativamente ao solo argiloso puro, principalmente em relação às sollicitações de compressão e de puncionamento;
- ✓ Para os compósitos constituídos por solo arenoso, o efeito do confinamento perpendicular ao plano de ruptura mostrou-se essencial para garantir a viabilidade técnica do produto de engenharia proposto, realçando, portanto, a relevância das condições de contorno do ensaio na análise dessa viabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, G. E.; MOHAMED, H. K. e AHMED, H. M. **New replacement formations on expansive soils using recycled EPS beads.** Proc. 18th ICSMGE, 2013.
- ABDELRAHMAN, G.E. 2009. **Lightweight fill using clay, EPSbeads and cement Un Mélange Léger en Utilisant l' Argile, les Billes d'EPS et le Ciment.** Geotechnical Engineering: 2256-2259.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2011). **ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.** Philadelphia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995). **NBR 6502/95: Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2001). **NBR NM 27/01: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Rio de Janeiro, 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2003). **NBR NM 248/03: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2004). **NBR 10007/04: Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 21p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2006). **NBR NM 45/06: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016a). **NBR 6457/16: Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016b). **NBR 9895/16: Solo - índice de suporte Califórnia – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016c). **NBR 6459/16: Solo - Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro, 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016d). **NBR 7180/16: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016e). **NBR 6508/16: Solo - Determinação da Massa Específica Aparente.** Rio de Janeiro, 8p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016f). **NBR 7182/16: Solo - ensaio de compactação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2018). **NBR 7181/18: Análise Granulométrica – Solos - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não Confinada- Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1992. 4p.
- AVESANI NETO, J.O. e BUENO, B.S. (2009a). **Ensaio de compressão cíclica em blocos de EPS para uso geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. In: <http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geors2009/2009-neto-bueno2.pdf>. 6p.
- AVESANI NETO, J.O. e BUENO, B.S. (2009b). **Ensaio de absorção de água em blocos de EPS para uso geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. In: <https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geors2009/2009-neto-bueno.pdf>. 6p.
- AVESANI NETO, J.O. e BUENO, B.S. (2009c). **Ensaio de permeabilidade à água em amostras de EPS para uso geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. In: <https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geors2009/2009-neto-bueno3.pdf>. 5p.
- CHURSCIAK, M. R. **Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2013.
- DE MORAIS, M.; BANDEIRA, F. O. e MENEGOTTO M. L. **Propriedades geotécnicas de misturas de solo residual de basalto com resíduos de borracha de pneus**. Lisboa, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER. PRO 003: Coleta de amostras deformadas de solos**. Rio de Janeiro, 1994a. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **DNER-ME 256/94: “Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão”, DNER/DrDTc, 1994c. 6 p.**
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994) **DNER-ME 258/94: “Solos compactados em equipamento miniatura – Mini MCV”, 1994b. 14 p.**
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - **DNIT. CLA 259: classificação de solos tropicais para finalidades viárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamentos miniatura**. São Paulo: 1996. 6 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ª edição. Rio de Janeiro/RJ. 2006, 274p.

- FERRÁNDIZ-MAS, V. e GARCÍA-ALCOCEL, E. **Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS)**. *Materiales de construcción*, 2012, 62.308: 547-566.
- FRANCO, K. L. B. **Caracterização do comportamento geotécnico de mistura de resíduo de pneus e solo laterítico**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN. 2012.
- FRANCO, K. L. B.; COSTA, Y. D. J.; SILVA JR., A. L. **Caracterização Geotécnica de Misturas de Resíduos de Pneus e Solo Laterítico**. 2011. In: VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Belo Horizonte/MG. 2011.
- GAO, H.; CHEN, Y; LIU, J. e CHU, J. **Creep behavior of EPS composite soil**. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55.11: 3070-3080.
- MÁRCIO DE SOUZA, S. A.; MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. Oficina de Textos, 2010.
- SANTOS, R. A. **Comportamento anisotrópico de um solo laterítico compactado**. 2015. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 2015.
- SILVEIRA, M. V.; CALHEIROS, A. V. e CASAGRANDE, M. D. T. **Applicability of the expanded polystyrene as a soil improvement tool**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 6, p. 06018006, 2018.
- SUÁREZ, M. J. **Avaliação da Resistência Mecânica de Material Leve Utilizando Misturas de Pedacos de Pneus com Solo do Distrito Federal**. 2016. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2016.
- TAMUT, T.; PRABHU, R.; VENKATARAMANA, K. e YARAGAL, S. C. 2014. **Partial replacement of coarse aggregates by expanded polystyrene beads in concrete**. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 3 (2): 238–241.
- TESSARI, J. **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento dos Seus Resíduos na Construção Civil**. 2006. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2006.
- ZORNBERG, J. G.; CABRAL, A. R.; VIRATJANDR, C. (2004). *Behaviour of tire shred – sand mixtures*. *Canadian Geotechnical Journal*, v.41, n.2, p.227-241.

CAPÍTULO 3

PERMEABILIDADE DE MISTURAS COMPACTADAS DE SOLOS TROPICAIS COM RESÍDUO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

RESUMO

Considerando-se as características físico-químicas (baixa densidade, inércia química, baixas suscetibilidades térmica e à umidade) do resíduo de EPS (poliestireno expandido) e as eventuais vantagens ambientais decorrentes de seu aproveitamento, este estudo visou a reutilização deste material em mistura com solos, visando o emprego do compósito em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. A pesquisa avaliou as respectivas respostas hidráulicas (permeabilidades saturadas) de misturas de solos com resíduo de EPS triturado, sendo utilizados materiais geológicos com características granulométricas distintas, sendo o solo granular, reconhecidamente inadequado para a função de barreira hidráulica, adotado exclusivamente para fins de contraste com o solo argiloso. Os solos utilizados foram provenientes de duas jazidas de empréstimo situadas no município de Viçosa, na região da Zona da Mata, estado de Minas Gerais (MG), Brasil. Os resíduos de EPS foram coletados em uma unidade de reciclagem de resíduos do município de Viçosa-MG, sendo submetidos à trituração controlada a fim de obter uma granulometria mais uniforme. Foram realizados ensaios de caracterização física dos solos e dos resíduos de EPS triturados e de compactação das misturas solo-resíduo de EPS nas proporções volumétricas de 0%, 20%, 30% e 40% de resíduo em relação ao volume aparente total da mistura, nas energias de compactação Proctor Intermediária e Modificada. Para os respectivos pontos de ótimo das curvas de compactação dos materiais investigados, foram moldados corpos de prova, visando à caracterização hidráulica por meio do ensaio de percolação em coluna, utilizando os gradientes hidráulicos de 15, 66 e 85. Para as particularidades do ensaio, os resultados mostraram a influência do tipo de solo, da energia de compactação aplicada e dos gradientes utilizados na permeabilidade saturada dos materiais investigados. Para o solo argiloso, em ambas energias de compactação analisadas, constatou-se, em geral, uma tendência de aumento da permeabilidade saturada com os incrementos da percentagem de resíduo de EPS e do gradiente hidráulico, porém em níveis que ainda asseguram seu potencial de aplicabilidade técnica em camadas de base e de cobertura de aterros sanitários. Adicionalmente à manutenção de reduzidos volumes de vazios, presume-se que a aderência interfacial entre as partículas do solo argiloso e do resíduo de EPS responda pela manutenção da permeabilidade saturada em níveis similares ao do solo argiloso compactado, viabilizando a

aplicabilidade do compósito como barreira impermeabilizante nas referidas camadas de aterro sanitário. Em caráter secundário, também foi constatada a redução da densidade seca da mistura em relação à dos solos naturais compactados, representando um eventual diferencial técnico na utilização do compósito solo-EPS como material de aterro sanitário em cenários de projeto nos quais o material de apoio da barreira hidráulica é menos rígido e para os quais a carga devida ao peso próprio do material da barreira pode ser particularmente relevante.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio hidráulico. Percolação em coluna. Poliestireno expandido. Reutilização. Resíduos. Solo argiloso. Solo arenoso.

ABSTRACT

Considering the physical-chemical characteristics (low density, chemical inertness, thermal and moisture low susceptibility) of EPS waste (expanded polystyrene) and the possible environmental advantages of its use, this study aimed the reuse of the EPS waste mixed with soil, seeking the adoption of the mixture in waterproofing layers of landfills. The research assessed the respective hydraulic responses (saturated permeabilities) of soil mixed with grinded EPS residue. It was used geological materials with different granulometric characteristics. The granular soil, known for its inadequacy as a hydraulic barrier, was adopted solely for comparison purposes with clayey soil. The soils used came from two soil deposits located in the city of Viçosa, in the Zona da Mata region, state of Minas Gerais (MG), Brazil. The EPS waste was collected in a waste recycling unit in the city of Viçosa-MG. The EPS waste went through a controlled grinding to obtain a more uniform granulometry. It was performed tests of physical characterization of the soil and grinded EPS waste. It was also performed a compaction test of soil-EPS mixtures, with Intermediate and Modified Proctor compaction energies. The soil-EPS mixtures volumetric proportions were 0%, 20%, 30% and 40% of EPS waste regarding the mixture total apparent volume. For the respective optimal points of the compaction curves from the investigated materials, specimens were made, aiming their hydraulic characterization through the column percolation test. It was used the hydraulic gradients of 15, 66 and 85. For the test particularities, the results of the investigated materials showed the influence of the soil type, the applied compaction energy as well as the gradients used in the saturated permeability. The clayey soil, for both analyzed compaction energies, had, in general, a tendency to increase the saturated permeability with higher percentages of EPS waste and greater hydraulic gradient, but at levels that still ensure the potential of its technical use at the bottom and cover liners of landfills. In addition to maintaining low void volumes, it is assumed that the interfacial adhesion between the clay soil particles and the EPS waste accounts for keeping the saturated permeability at levels close to compacted clay soil. It enables the applicability of the EPS waste as a waterproofing barrier in the liners of the landfill. Secondly, it was found a reduction in the dry density of the EPS-soil mixture compared to compacted natural soils. It represents an eventual technical differential for the use of the soil-EPS mixture as a landfill material for design scenarios in which the support material of the hydraulic barrier is less rigid and also for which the load due to the barrier material own weight might be particularly relevant.

KEYWORDS: Hydraulic testing. Column percolation. Expanded polystyrene. Reuse. Waste. Clayey soil. Sandy soil.

3.1. INTRODUÇÃO

O problema da gestão de resíduos sólidos é preocupante não apenas pelo volume que é gerado, mas também pela possibilidade de contaminação do solo e das águas da área de disposição e de seu entorno. A disposição inadequada de resíduos sólidos no solo é prejudicial ao ambiente, sobretudo pelo potencial poluidor do lixiviado, líquido proveniente da decomposição anaeróbia dos resíduos acrescido de águas pluviais (LANGE et al., 2009).

Buscando minimizar este impacto ambiental, barreiras impermeabilizantes são projetadas para impedir a percolação dos líquidos gerados. A impermeabilização do aterro pode ser feita por meio de geossintéticos e/ou de barreiras selantes constituídas por solo compactado (BOSCOV, 2008).

O solo utilizado para a construção de barreiras selantes é normalmente um material de granulometria fina, de baixo coeficiente de condutividade hidráulica ou permeabilidade (LUKIANCHUKI, 2007; WILLIAMS et al., 2011). Deste modo, dada as dimensões consideráveis dos aterros sanitários e, conseqüentemente, das barreiras hidráulicas que os constituem, pode haver limitações quanto ao volume de materiais destinados ao emprego em barreiras selantes, o que deflagra, portanto, o interesse em se estudar materiais alternativos para suprir essa eventual demanda.

O EPS é um polímero termoplástico espumado com estrutura celular fechada, biologicamente inerte e não tóxico. Além disto, ele apresenta propriedades interessantes, como baixa densidade, comportamento hidrofóbico e resistência química a ácidos e álcalis (FERRÁNDIZ-MAS e GARCÍA ALCOCEL, 2012).

O EPS é a sigla internacional do poliestireno expandido, que é um termoplástico derivado do petróleo. Trata-se de um material constituído por um polímero de hidrocarboneto de estireno (poliestireno), que é submetido à expansão por meio da utilização de gás pentano (outro hidrocarboneto). Portanto, o EPS é um material quimicamente constituído por apenas dois elementos: carbono e hidrogênio. Um grânulo de EPS é composto, em massa, por 98% de ar e 2% de matéria-prima (TAMUT PRABHU, VENKATARAMANA e YARAGAL, 2014).

Preliminarmente, a justificativa de utilização do EPS como material de construção alternativo para emprego em camadas selantes de aterros sanitários se enquadra no âmbito da perspectiva ambiental desse aproveitamento. O grande volume gerado de resíduos de poliestireno expandido (EPS), material popularmente conhecido no Brasil como Isopor®, decorrentes de sobras advindas de embalagens de equipamentos, máquinas, eletrodomésticos, dentre outros, constitui um preocupante problema ambiental, visto que, além de provocar uma

poluição visual na estética urbana das cidades quando dispostos em locais inadequados, eles possuem aspecto negativo referente ao longo período de tempo para a sua degradação, sendo considerado um material não biodegradável (TESSARI, 2006). Além disto, o EPS é considerado um dos vilões do lixo por ocupar muito espaço nos aterros sanitários, dificultar a compactação do aterro e prejudicar a degradação dos materiais presentes (SILVEIRA, CALHEIROS e CASAGRANDE, 2018).

Neste contexto, a presente pesquisa visa avaliar a viabilidade técnica do emprego do resíduo de EPS triturado como material de substituição parcial de solos para emprego em camadas selantes em aterros sanitários, através de ensaios experimentais de laboratório. Portanto, da condição de resíduo destinado à disposição nas células de contenção de aterros sanitários, vislumbra-se o cenário de aproveitamento do resíduo de EPS como material de construção destinado a compor elementos funcionais de tais estruturas de engenharia.

Deste modo, o uso de EPS triturado em aterros sanitários contribuiria com o menor consumo de material natural (solo) e a conseqüente redução dos custos de transporte e do volume de material geológico mobilizado, além de possibilitar uma nova aplicação do resíduo, permitindo uma maior vida útil dos aterros sanitários decorrente da redução do volume desse material depositado.

Salienta-se que, em consulta à literatura técnico-científica sobre o tema, não foi encontrada nenhuma abordagem envolvendo ensaios hidráulicos em misturas solo-EPS compactadas, com vistas a sua aplicação em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, ressaltando, assim, a inovação deste trabalho.

O objetivo desta pesquisa foi, portanto, de avaliar a viabilidade técnica do emprego do resíduo de EPS triturado como material de construção em mistura com solo, para aplicação em camadas selantes de aterro sanitário. Tal avaliação foi realizada por meio de ensaios de quantificação da permeabilidade saturada do compósito solo-EPS. Buscou-se, também, explicar os mecanismos de interação entre as partículas de solo e de resíduo de EPS responsáveis pela mobilização da permeabilidade saturada, considerando-se três gradientes hidráulicos distintos e duas energias de compactação distintas.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

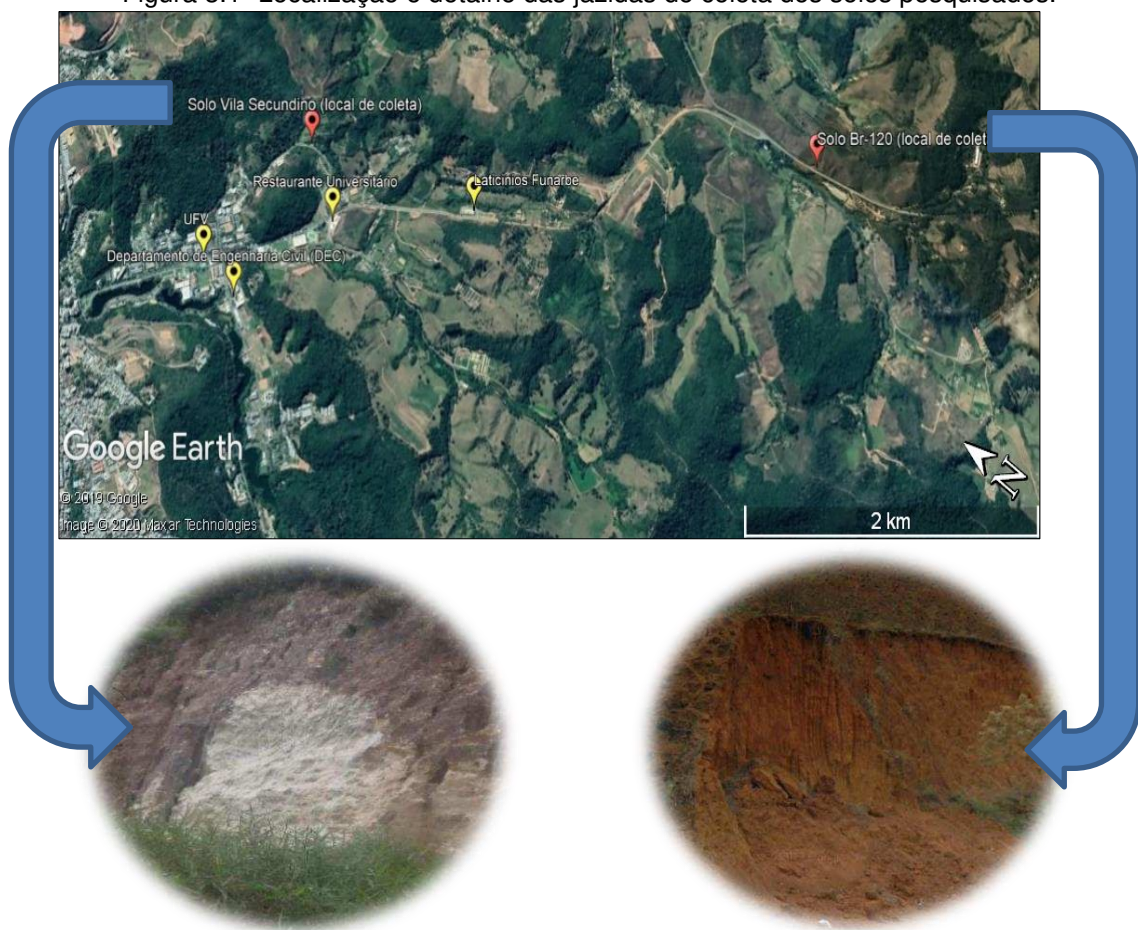
3.2.1. Materiais

3.2.1.1 Solo

As amostras de solo utilizadas nesta pesquisa foram coletadas de duas jazidas de empréstimo, uma da qual foi extraída uma amostra de solo residual jovem de gnaise (chamado de solo Vila Secundino) e uma outra da qual foi extraída uma amostra de solo residual maduro de gnaise (chamado de solo BR-120), representativos, respectivamente, dos horizontes C e B dos perfis de intemperismo das respectivas jazidas.

As jazidas de empréstimo de onde foram coletadas as amostras de solos situam-se na microrregião de Viçosa, na região da Zona da Mata, estado de Minas Gerais (MG), Brasil, cujas coordenadas de localização são 20°45'48" S; 42°51'29,50" O e 20°47'30" S; 42°50'17,50" O, respectivamente (Figura 3.1).

Figura 3.1- Localização e detalhe das jazidas de coleta dos solos pesquisados.



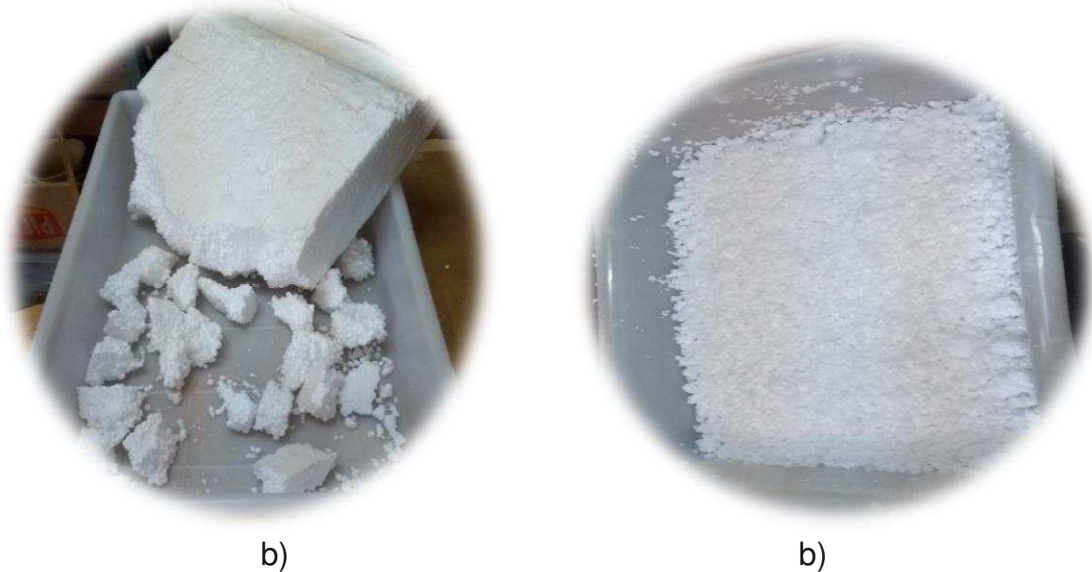
Fonte: Próprio autor.

As referidas amostras de solos foram coletadas segundo os procedimentos previstos na norma PRO 003 (DNER, 1994a). As amostras coletadas foram armazenadas e transportadas em sacos plásticos adequadamente vedados. Os procedimentos de redução e preparação das amostras de solo para os ensaios seguiram, respectivamente, as orientações prescritas pelas normas técnicas NBR NM 27(ABNT, 2001) e NBR 6457 (ABNT, 2016a).

3.2.1.2 Resíduos de EPS

Os resíduos de EPS foram coletados, sob a forma de blocos prismáticos, em uma unidade de reciclagem de resíduos do município de Viçosa-MG, sendo posteriormente triturados e conformados a uma granulometria padrão (conforme item 2.2.2) (Figura 3.2), visando garantir a uniformidade geométrica dos mesmos nas misturas solo-resíduo de EPS, daqui pra frente designadas misturas solo-EPS.

Figura 3.2-Detalhes do resíduo de EPS coletado (a) e após o processo de trituração (b).



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.3 Misturas solo-EPS

A pesquisa contemplou a análise de propriedades mecânicas de misturas solo-EPS (Figura 3.3) compactadas, nas seguintes proporções volumétricas (solo-resíduo): 100%-0%, 80%-20%, 70%-30% e 60%-40%.

Figura 3.3-Detalhes das misturas do resíduo de EPS triturado com amostras de solo BR-120 (a) e de solo Vila Secundino (b).



Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica dos solos

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica dos solos pesquisados foram os que seguem:

- iv) Análise granulométrica conjunta segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018);
- v) Limites de *Atterberg* segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016c) e a NBR 7180 (ABNT, 2016d);
- vi) Massa específica dos grãos do solo segundo a NBR 6508 (ABNT, 2016e).

3.2.2.2 Classificação dos solos

As amostras de solos foram classificadas segundo os sistemas *Unified Soil Classification* (USC) e *Transportation Research Board* (TRB), conforme as orientações constantes no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). Os solos também foram classificados segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical). Para isto, foram realizados os ensaios de Mini-MCV e de Perda de massa por imersão, conforme os procedimentos prescritos no método CLA 259 (DNIT, 1996), com necessárias consultas complementares aos métodos de ensaio ME 258 (DNER, 1994b) e ME 256 (DNER, 1994c).

3.2.2.3 Ensaio de análise granulométrica do resíduo de EPS triturado

Este ensaio foi necessário para determinar a granulometria dos grãos de resíduo de EPS obtidos após a sua trituração. Os procedimentos para este ensaio foram os mesmos aplicáveis à caracterização granulométrica de agregados, realizados de acordo com a NM 248 (ABNT,

2003). Para se avaliar a eventual variabilidade geométrica do resíduo de EPS triturado, foram realizados ensaios sobre amostras trituradas oriundas de cinco processos sequenciais de trituração, dos quais resultou todo o material empregado na pesquisa.

3.2.2.4 Ensaio de determinação das massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado

O ensaio de massa unitária foi realizado nos solos e no resíduo de EPS triturado de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), para que fossem determinados os traços em massa correspondentes às proporções em volume consideradas neste estudo para as misturas solo-EPS. Assim, na preparação das misturas solo-EPS para os ensaios subsequentes, utilizaram-se os valores obtidos neste ensaio para realizar a correta proporção da mistura solo-EPS em volume aparente desejado.

3.2.2.5 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação dos solos e das misturas solo-EPS foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016f), empregando-se as energias de compactação Proctor Intermediária e Modificada, visando à determinação dos respectivos parâmetros de ótimo de compactação (peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo).

3.2.2.6 Ensaio de permeabilidade saturada

O ensaio de permeabilidade saturada com carga constante foi realizado através de equipamento de percolação em coluna (Caneschi, 2012), que opera em conformidade com os sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de determinação da condutividade hidráulica saturada em laboratório. Foram consideradas as prescrições constantes nas normas NBR 14545 (ABNT, 2000) e NBR 13292 (ABNT, 1995).

Os ensaios foram realizados em corpos de prova (CPs) cilíndricos, com dimensões de 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro, moldados nas respectivas umidades ótimas das curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada, admitindo-se uma tolerância de $\pm 1\%$ do teor de umidade de moldagem em relação ao teor de umidade ótimo e de $\pm 3\%$ no grau de compactação (GC) do CP moldado em relação ao valor pré-definido (GC= 100%).

Duas repetições de ensaio foram realizadas visando à quantificação do coeficiente de permeabilidade saturada médio dos materiais investigados, admitindo-se um coeficiente de variação (CV) máximo de 10%. Água deaerada e deionizada foi empregada como líquido percolante.

Foram empregados os gradientes hidráulicos de 15, 66 e 85 na realização dos ensaios de permeabilidade, considerando-se aqueles adotados em pesquisas similares envolvendo solos compactados destinados a barreiras impermeabilizantes (ASTM, 1995; BOFF, 1999; LEITE, 2001; YONG, 2001; BASSO, 2003; PACHECO E SILVA, 2005; ALVES, 2005).

Testes prévios foram realizados para verificar e garantir a completa vedação do CP em seu entorno, a fim de impedir o eventual fluxo preferencial de água pelas paredes do molde no qual se encontrava confinado. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}), foi empregada a Equação 1, com correção da viscosidade da água correspondente à temperatura do ensaio para a temperatura de referência de 20°C. O ensaio de permeabilidade foi executado em sala com temperatura mantida constante em 22 °C ± 1 °C.

$$k_{20} = \left(\frac{V \cdot L}{A \cdot \Delta h \cdot t} \right) \cdot \frac{\eta_t}{\eta_{20}} \quad (1)$$

em que:

- k_{20} é o coeficiente de permeabilidade saturada a 20°C;
- V é o volume percolado;
- L é o comprimento do corpo de prova;
- A é a área de seção transversal do corpo de prova;
- Δh é a perda de carga;
- t é o tempo de percolação;
- η_t é o coeficiente de viscosidade da água na temperatura do ensaio;
- η_{20} é o coeficiente de viscosidade da água na temperatura de 20°C.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1. Caracterização geotécnica dos solos

Na Tabela 3.1, apresentam-se os resultados da caracterização geotécnica dos dois solos estudados. A Figura 2.4 apresenta as curvas granulométricas dos mesmos.

Tabela 3.1-Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.

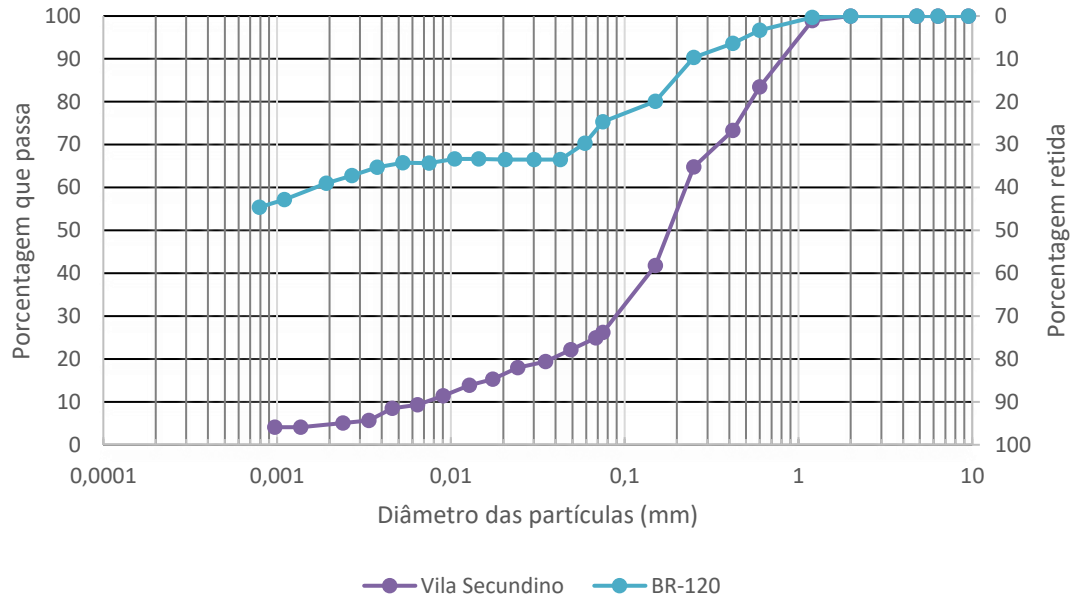
Solo	Análise Granulométrica (%)					Limites de Consistência (%)			Peso Específico dos Grãos Sólidos (kN/m ³)
	Areia ¹			Silte ¹	Argila ¹	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
	Grossa ¹	Média ¹	Fina ¹						
BR-120	0	12	18	9	61	70	42	28	27,09
Vila Secundino	15	43	17	20	5	25	18	7	26,03

¹ Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

A partir da análise granulométrica, é possível verificar que o solo BR-120 apresenta grande porcentagem de finos, predominando a fração argila. Texturalmente, esta amostra foi

classificada como argila areno-siltosa. Já o solo Vila Secundino apresenta predominância da fração areia, preponderando a areia média, sendo considerado uma areia silto-argilosa.

Figura 3.4-Curvas de distribuição granulométrica dos solos.



Fonte: Próprio autor.

Com base nos dados da Tabela 3.1, referente aos resultados da caracterização geotécnica dos solos analisados, e da Tabela 3.2, referente a requisitos geotécnicos mínimos prescritos por órgãos regulamentadores para solos destinados à aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, conclui-se que apenas o solo BR-120 (solo argiloso) possui potencial aplicação em tais camadas.

Tabela 3.2-Requisitos mínimos para solo de impermeabilização de aterros sanitários.

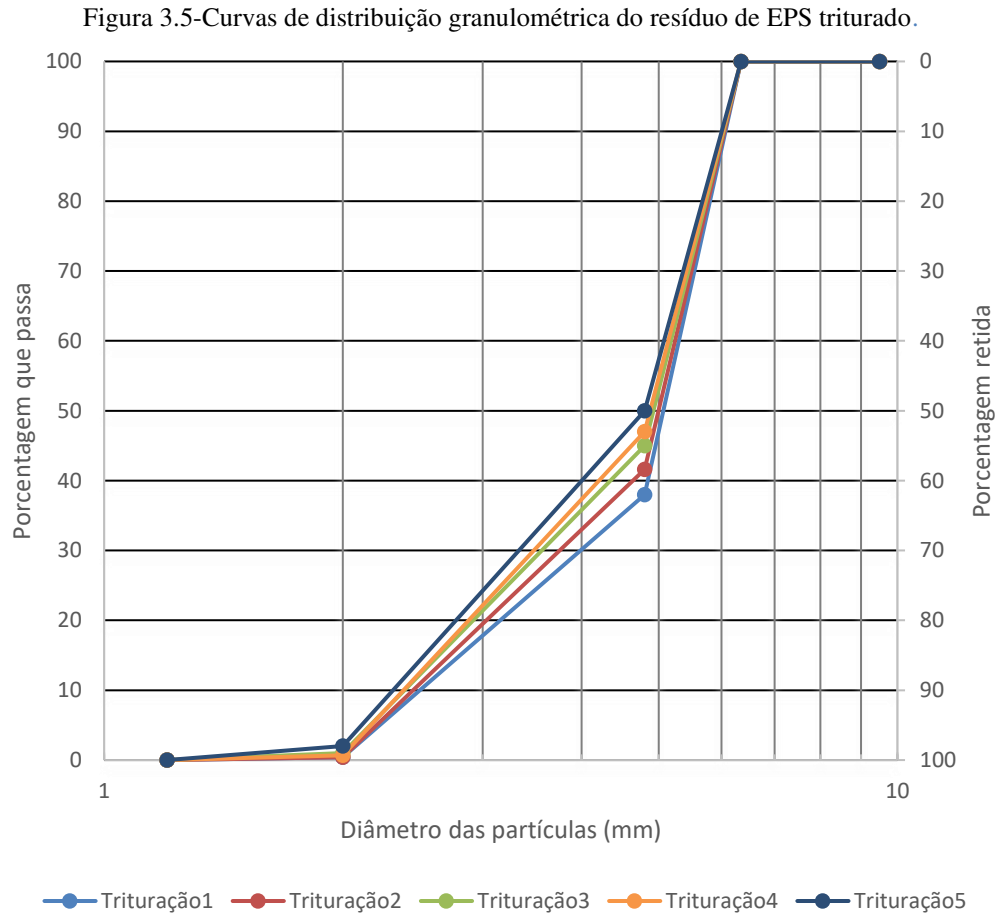
Características	EPA (1989)	CETESB (1993)	OMAFRA (2003)
Limite de Liquidez-LL (%)		≥30	≥30
Índice de Plasticidade-IP (%)	≥10	≥15	11≤IP≤30
Finos $\Phi \leq 0,075$ mm (%)	≥20	≥30	≥50
Fração Argila $\Phi \leq 0,002$ mm (%)			≥20
Fração Areia $0,075 \text{ mm} < \Phi \leq 4,8$ mm (%)			≤45

Fonte: adaptado de Boscov (2008).

3.3.2 Análise granulométrica do resíduo de EPS

A partir da análise granulométrica do resíduo de EPS obtido após a sua trituração, foi possível verificar que os grãos de EPS possuem dimensões maiores que 1,2 mm (Figura 3.5), ou seja, ele apresenta dimensão granular acima das dimensões dos grãos presentes nos solos. Neste ensaio, foi possível identificar que, para a peneira 4,8 mm, cada amostra apresentou percentagens distintas umas das outras, com valores oscilando entre 38% a 51% passantes.

Assim, faz-se necessário um maior controle da etapa de trituração dos blocos de EPS para obtenção do resíduo triturado, o que seria possível em uma operação de trituração e peneiramento em escala industrial, tal como se faz com os agregados para construção civil por exemplo.



Fonte: Próprio autor.

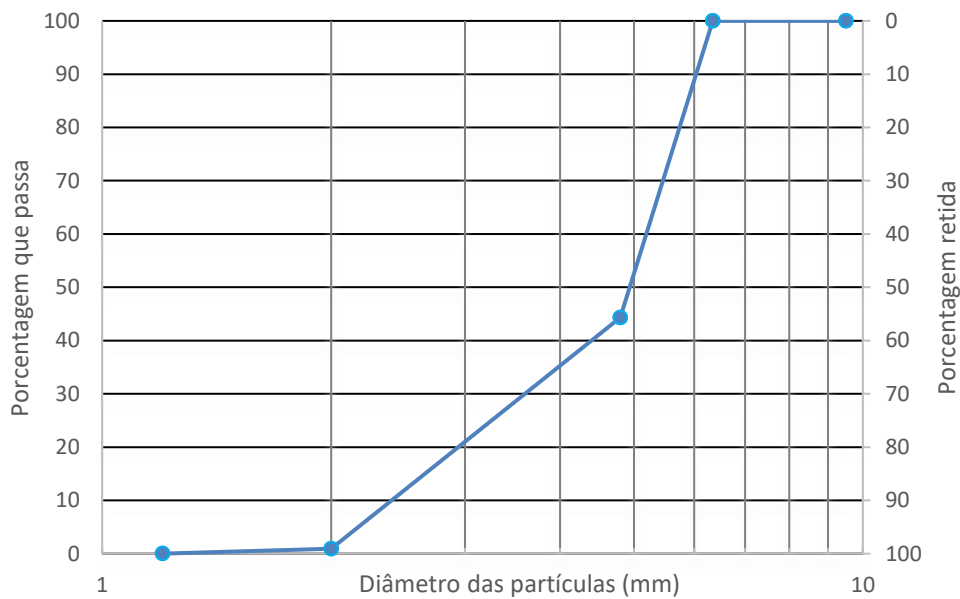
A seguir, está representada a Tabela 3.3, com as porcentagens médias das frações (tamanhos areia e pedregulho) em relação ao resíduo de EPS triturado, além da curva que expressa a média das cinco distribuições granulométricas obtidas (Figura 3.6).

Tabela 3.3- Granulometria média do resíduo de EPS

EPS triturado	Análise Granulométrica (%)			
	Tamanho Pedregulho ¹	Tamanho Areia ¹		
		Grossa ¹	Média ¹	Fina ¹
Média das curvas	99	1	0	0

¹ Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Figura 3.6-Curva média de distribuição granulométrica do resíduo de EPS.



Fonte: Próprio autor.

3.3.3 Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado

Na Tabela 3.4, apresentam-se os resultados de massa unitária dos solos e do resíduo de EPS triturado.

Tabela 3.4- Massas unitárias dos solos e do resíduo de EPS triturado

MATERIAL	Massa unitária (kg/m ³)
Solo BR-120	955,20
Solo Vila Secundino	1210,81
Resíduo de EPS triturado	7,77

As equações pelas quais foram feitas as conversões de volume aparente (V_{EPS}) para massa seca de EPS ($Massa_{EPS}$) em função da massa de solo seco ($Massa_{solo\ seco}$) estão descritas a seguir:

- Equação exemplo

$$V_{EPS=A\%} \rightarrow Massa_{EPS} = \left(\frac{A}{(100-A)} \times \frac{\gamma_{aparente\ do\ EPS}}{\gamma_{aparente\ do\ solo}} \right) \times Massa_{solo\ seco} \quad (2)$$

- Solo BR-120

$$V_{EPS=20\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 1,999 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (3)$$

$$V_{EPS=30\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 3,427 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (4)$$

$$V_{EPS=40\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 5,332 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (5)$$

- Solo Vila Secundino

$$V_{EPS=20\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 1,604 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (6)$$

$$V_{EPS=30\%} \rightarrow Massa_{EPS} = 2,750 \times 10^{-3} \times Massa_{solo\ seco} \quad (7)$$

$$V_{\text{EPS}}=40\% \rightarrow \text{Massa}_{\text{EPS}} = 4,278 \times 10^{-3} \times \text{Massa}_{\text{solo seco}} \quad (8)$$

A seguir está apresentada na Tabela 3.12, as conversões das proporções volumétricas do EPS em relação aos solos, para as proporções em massa.

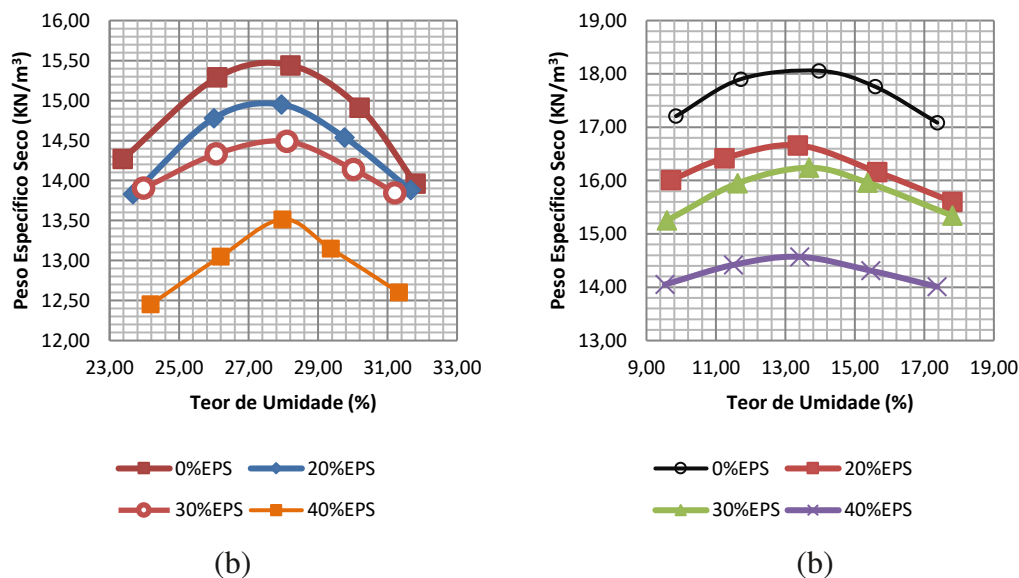
Tabela 3.12-Dados dos valores das proporções em volume e em massa.

CONVERSÃO DAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA PROPORÇÕES EM MASSA		
Proporções Volumétricas do EPS	Proporções em massa do EPS com Solo BR-120	Proporções em massa do EPS com Solo Vila Secundino
20%	0,20%	0,16%
30%	0,34%	0,28%
40%	0,53%	0,43%

3.3.4 Ensaios de compactação

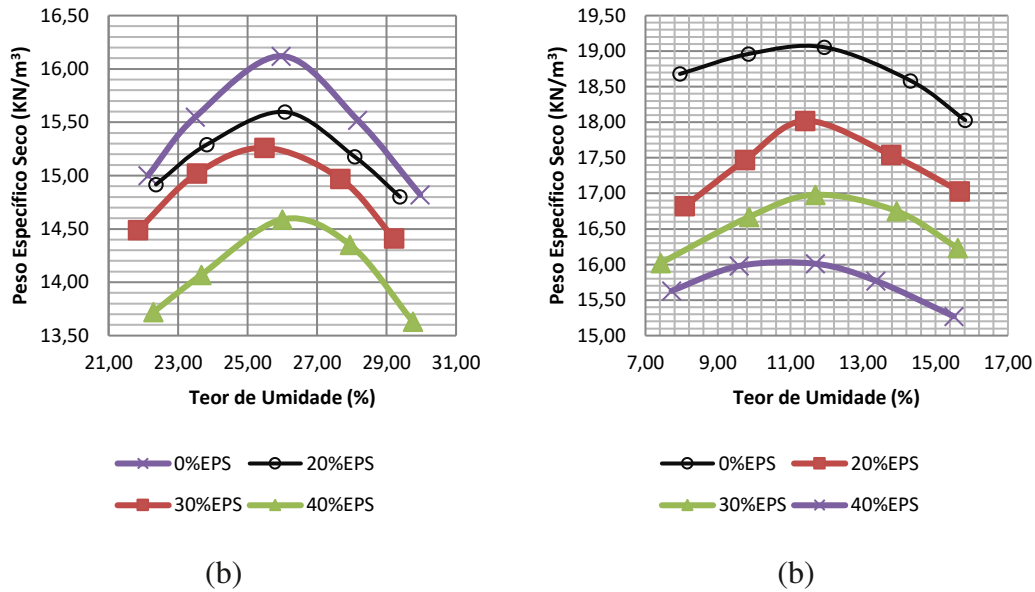
Nas Figuras 3.7 e 3.8, apresentam-se as curvas de compactação para os solos BR-120 e Vila Secundino, tanto em estado natural (0% em volume aparente de resíduo de EPS) quanto em misturas de 20%, 30% e 40% em volume aparente de EPS triturado, utilizando as energias Proctor Intermediária e Modificada. Os respectivos parâmetros ótimos de compactação (peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótimo) são apresentados nas Figuras 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12.

Figura 3.7-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Intermediária: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



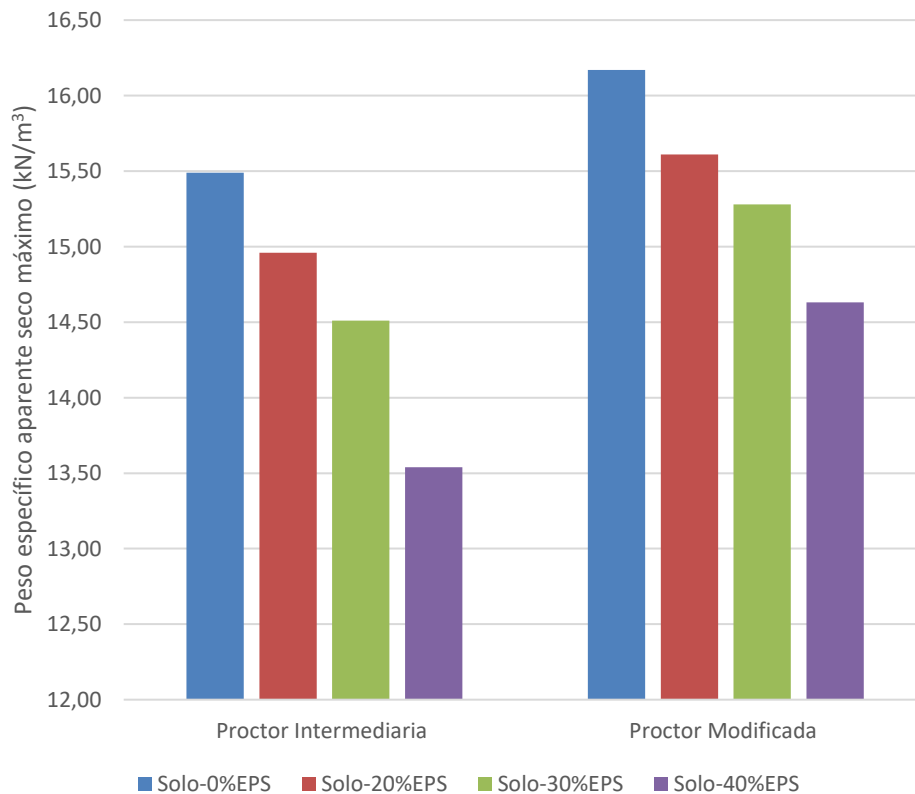
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.8-Curvas de compactação dos solos e das misturas solo-EPS na energia Proctor Modificada: (a) BR-120; (b) Vila Secundino.



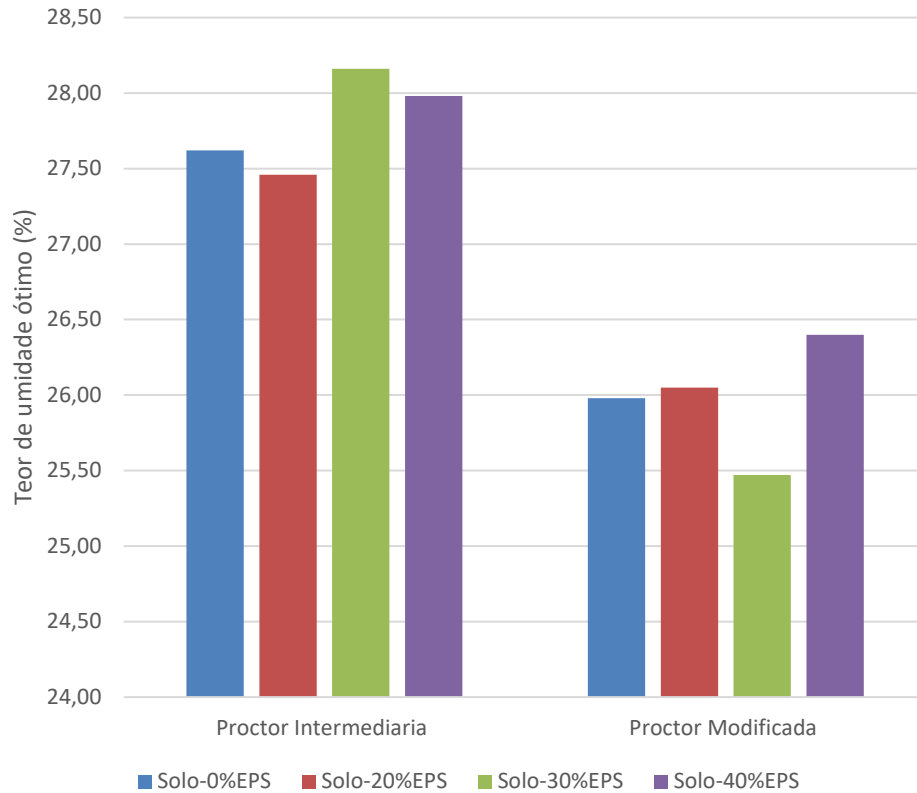
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.9-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.



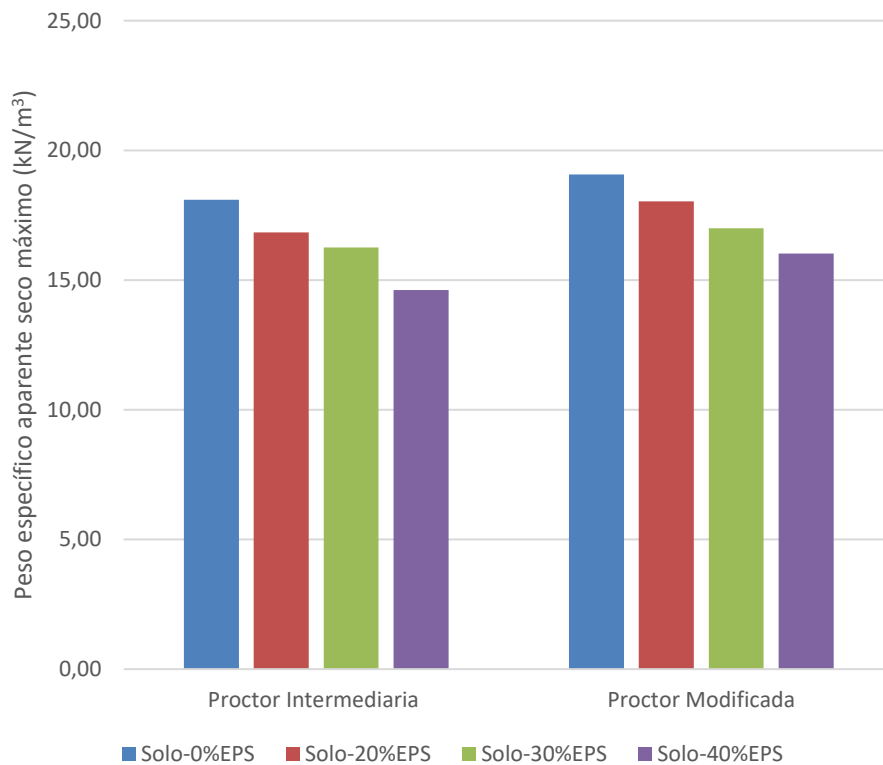
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.10-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo BR-120 e respectivas misturas com EPS.



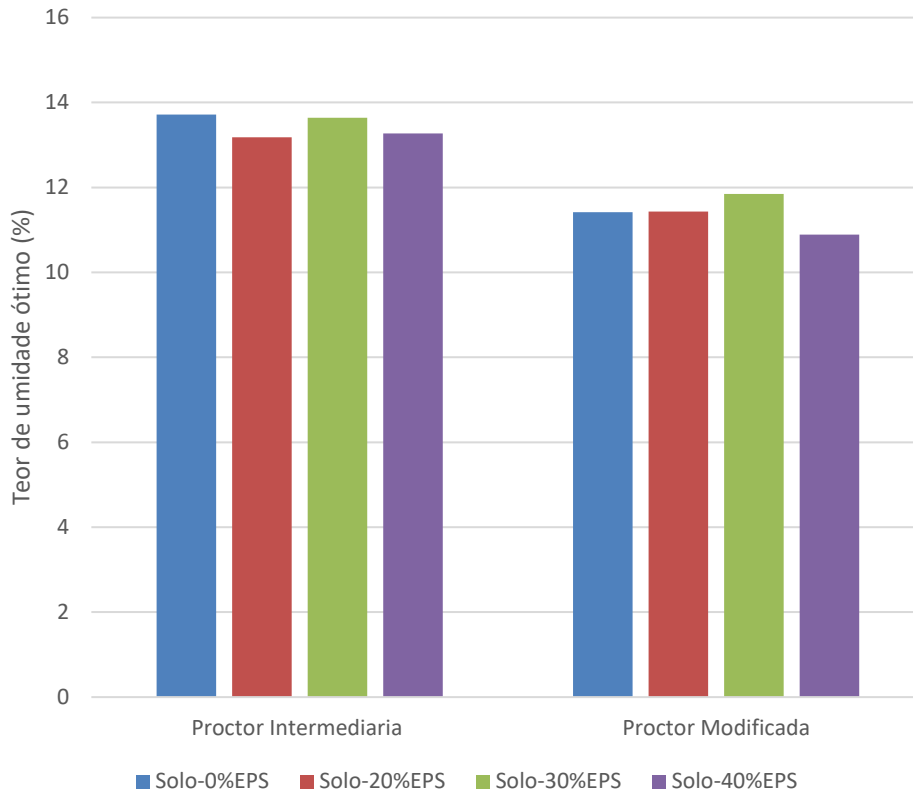
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.11-Resultados do peso específico aparente seco máximo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.12-Resultados do teor de umidade ótimo derivados do ensaio de compactação do solo Vila Secundino e respectivas misturas com EPS.



Fonte: Próprio autor.

Para ambos os solos analisados, independente da energia de compactação, verificou-se que a inclusão do resíduo de EPS triturado implicou em redução do peso específico aparente seco (γ_d) em geral, evidenciada pelo posicionamento gradativamente inferior da curva de compactação, comparativamente à curva do solo natural, com o incremento da percentagem volumétrica do resíduo na mistura. Isso se justifica pela gradativa substituição do solo mais denso pelo resíduo mais leve, resultando em uma menor massa seca por unidade de volume compactado.

Como consequência direta dessa tendência, o peso específico aparente seco máximo também tem sua magnitude reduzida com os sucessivos acréscimos percentuais de resíduo. Essa característica pode ser importante, pois, desse modo, barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, constituídas pelo compósito solo-EPS, que forem assentadas sobre materiais com maior deformabilidade poderão obter vantagem técnica decorrente da utilização de um material mais leve, pois as mesmas solicitarão menos o material de fundação, restringindo, assim, os recalques decorrentes do peso próprio das barreiras.

Salienta-se, porém, que, comparativamente às elevadas tensões verticais que serão geradas pelo aterramento do resíduo compactado na célula de contenção de um aterro sanitário,

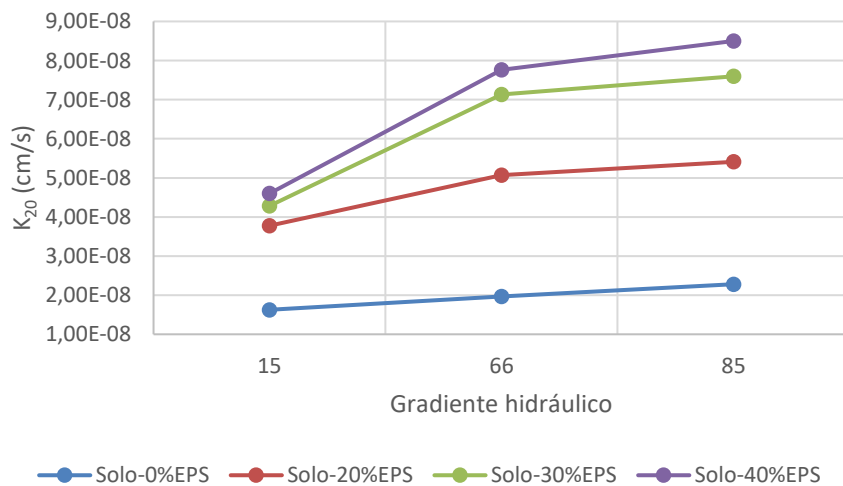
o alívio de tensão vertical promovido por barreiras impermeabilizantes mais leves do tipo solo-EPS, executadas na base do aterro sanitário, não aparenta ser significativo, ainda que efetivamente ocorra. Essa vantagem técnica pode ser mais efetiva para as barreiras impermeabilizantes executadas na cobertura de aterros sanitários.

A tendência de variação verificada para o parâmetro γ_d não foi constatada para o teor de umidade ótimo de compactação, o qual se mostrou menos sensível ao efeito da incorporação do resíduo, sofrendo variações pouco significativas. Conclui-se que a incorporação do resíduo de EPS não modificou a demanda hídrica do sistema submetido à compactação, de modo que a necessidade de água para promover o rearranjo das partículas do sistema solo-EPS mostrou-se essencialmente a mesma das partículas do solo. Este comportamento também foi verificado por outros trabalhos envolvendo misturas solo-EPS (ABDELRAHMAN *et al.*, 2013; SILVEIRA e CALHEIROS, 2018).

3.3.5 Ensaio de permeabilidade

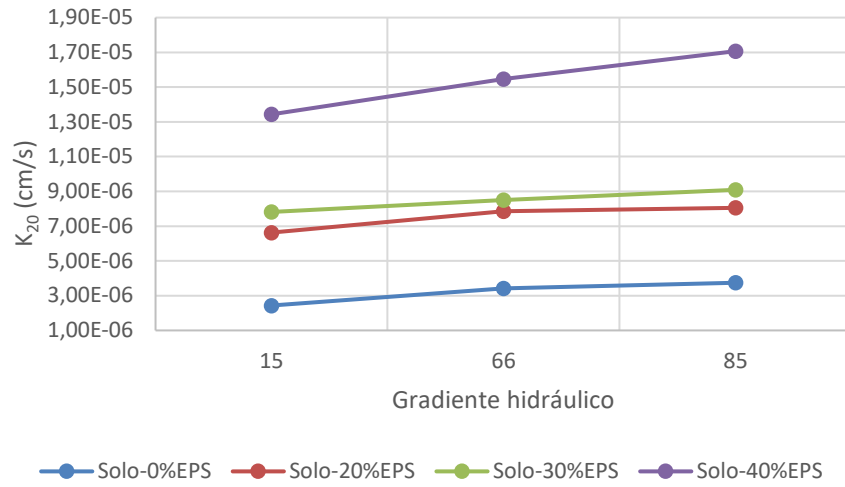
Os valores de permeabilidade saturada (k_{20}) dos solos BR-120 e Vila Secundino e das respectivas misturas solo-EPS, nas energias Proctor Intermediária e Modificada, são apresentados nas Figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16, respectivamente. Os valores do teor de umidade variaram entre -0,8% e +0,3% em torno do teor ótimo; já o grau de compactação variou entre 97,2% e 102,4%. Assim, os CPs ensaiados se encontraram dentro dos limites pré-estabelecidos para o teor de umidade ($\pm 1\%$ em torno do teor ótimo) e grau de compactação ($100\% \pm 3\%$). Os valores de CV das repetições variaram entre 4,4% e 8,1%, portanto dentro do limite pré-estabelecido (até 10%).

Figura 3.13- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo BR-120 e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Intermediária.



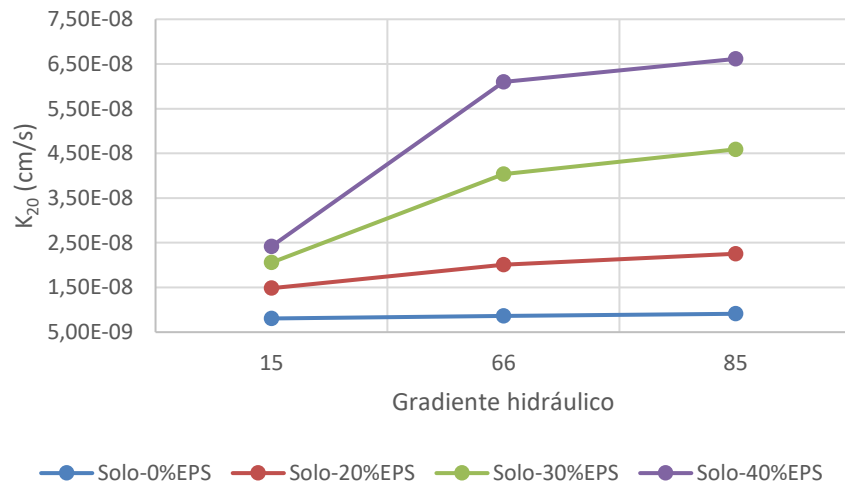
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.14- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo Vila Secundino e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Intermediária.



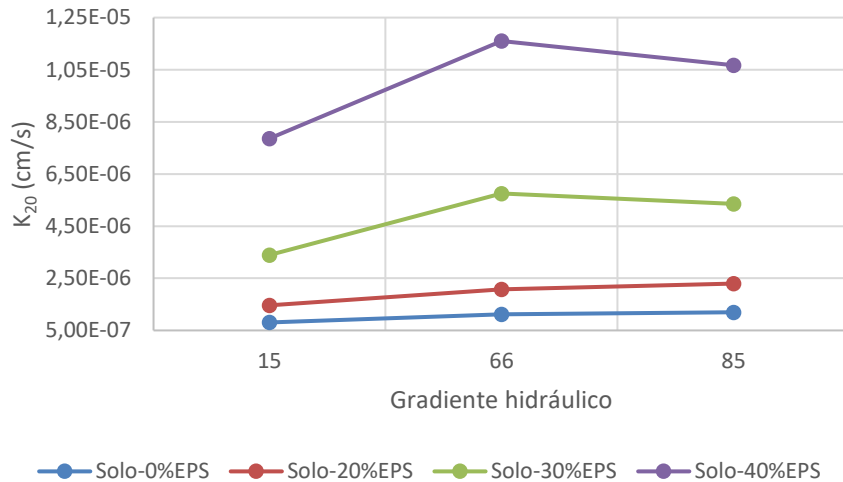
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.15- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo BR-120 e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Modificada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.16- Coeficiente de permeabilidade saturada (k_{20}) em função do gradiente hidráulico para o solo Vila Secundino e respectivas misturas solo-EPS, compactados na energia Proctor Modificada.



Fonte: Próprio autor.

O solo BR-120 e seus compósitos apresentaram menores coeficientes de permeabilidade saturada (k_{20}) que o solo Vila Secundino e seus compósitos. Para os materiais constituídos por solo argiloso, os valores de k_{20} se encontram na faixa de 10^{-9} - 10^{-8} cm/s; para os materiais constituídos por solo arenoso, os valores de k_{20} se encontram na faixa de 10^{-6} - 10^{-5} cm/s.

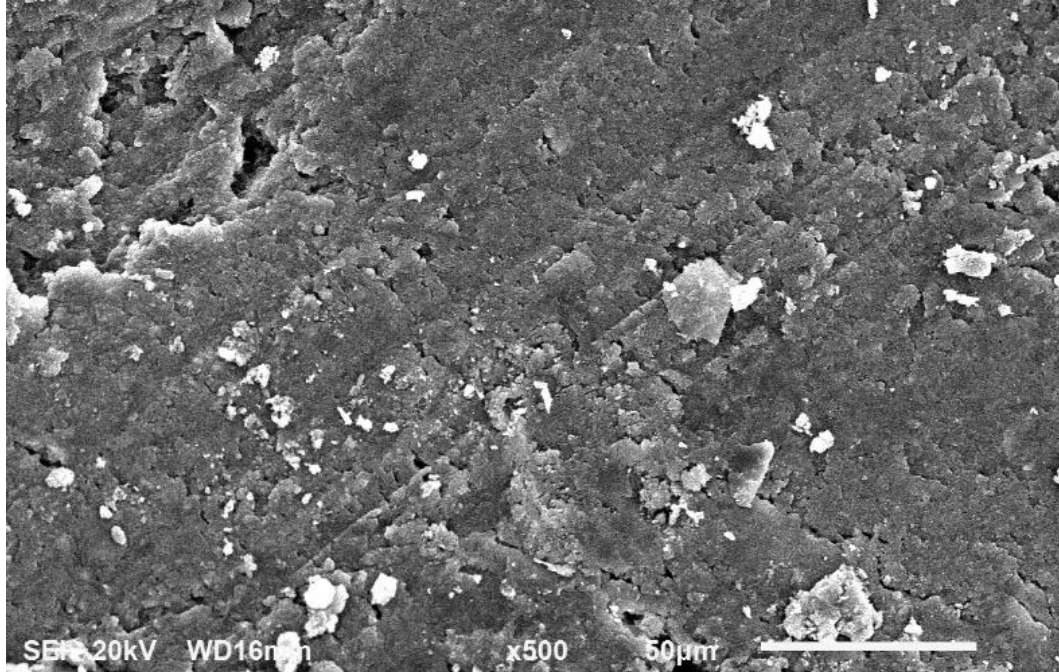
Sabe-se que a granulometria de um solo tem influência marcante sobre o seu volume de poros na condição compactada, sendo comum que em solos granulares compactados prevaleçam os macroporos, diferentemente dos solos coesivos, nos quais os microporos prevalecem em sua estrutura interna compactada (MESQUITA e MORAES, 2004; DE ALMEIDA e SCHALCH, 2008). Sob essa perspectiva, Sampaio *et al.* (2006) ressaltam que solos que apresentam elevado teor de microporos conduzem a uma menor permeabilidade saturada, enquanto que solos com elevada porcentagem de macroporos são mais permeáveis.

Na literatura existem algumas propostas de classificação dos poros devido ao seu tamanho, geralmente esta classificação está dividida dois grupos, uma por microporos e outra por macroporos. Deste modo os macroporos são poros de diâmetro maior que 0,05 mm ou 50 μ m e microporos são poros com diâmetro menor que 0,05 mm ou 50 μ m (KLEIN e LIBARDI, 2002; FARIAS, 2012; LOPERA, 2016).

A granulometria fina do solo BR-120, predominantemente argiloso, proporciona à estrutura interna dos materiais compactados por ele constituído uma quantidade maior de microporos comparativamente às de macroporos, como mostra a imagem do Ensaio Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do solo BR-120 na Energia Proctor Modificada (Figura 3.17). Deste modo, esta característica implica em uma maior dificuldade de percolação da água nos poros de menor tamanho. Adicionalmente, a dupla camada difusa, característica

das partículas da fração argila de solos coesivos, propicia ao solo argiloso e seus compósitos uma adsorção da água aos grãos do solo, contribuindo, assim, para a redução do volume de água livre que percola o material compactado, também respondendo pela sua menor permeabilidade (DA SILVEIRA, 2016).

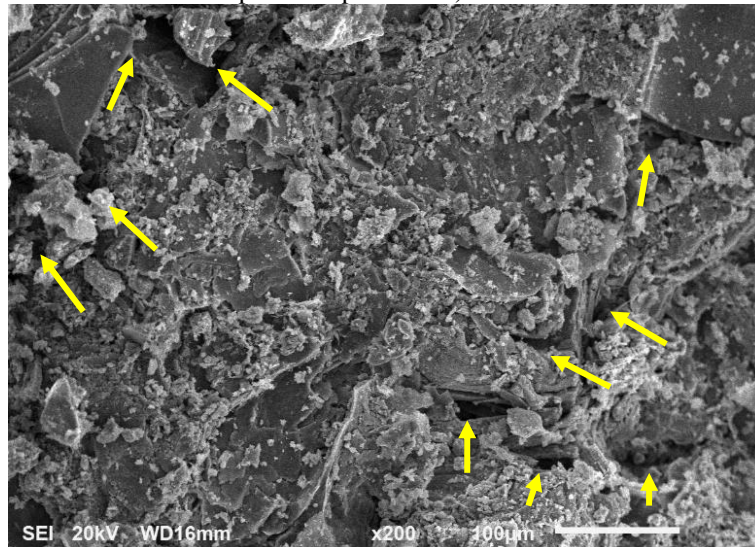
Figura 3.17-Imagem do Ensaio MEV do solo BR-120 puro (ausência das estruturas de macroporos).



Fonte: Próprio autor.

Para o solo Vila Secundino e seus compósitos, dado o seu caráter intrinsecamente granular, há a predominância de macroporos em sua estrutura interna compactada o que é comprovada pela imagem do Ensaio MEV do solo Vila Secundino na Energia Proctor Modificada (Figura 3.18), implicando assim em uma maior facilidade de percolação da água através dos poros de maior tamanho. Diferentemente da interação entre a água percolante e as superfícies das partículas da fração argila, regida pela dupla camada difusa, não há, no caso do solo arenoso e seus compósitos, a adsorção de água pelas superfícies das partículas, estando a mesma livre para percolar a estrutura interna do material compactado através de seus macroporos.

Figura 3.18-Imagem do Ensaio MEV do solo Vila Secundino puro (presença das estruturas de macroporos, apontados pelas setas).



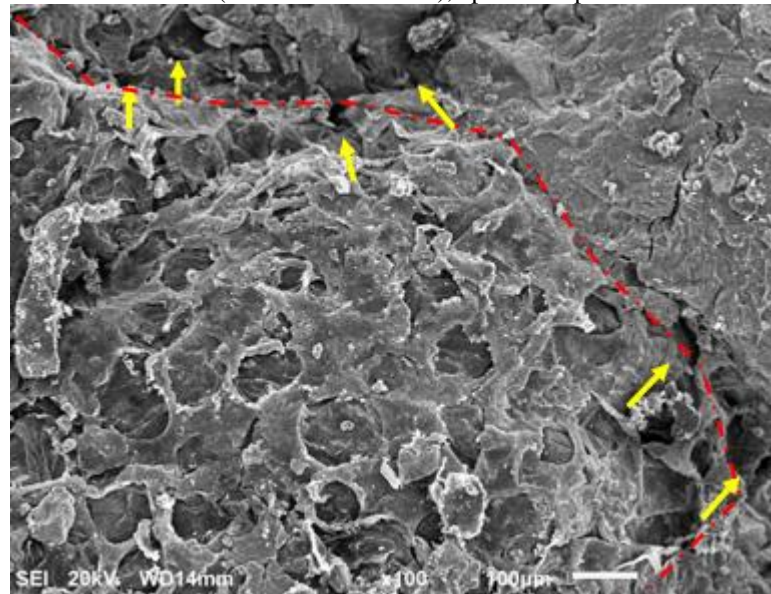
Fonte: Próprio autor.

Particularmente para os compósitos, a inserção do resíduo de EPS em mistura com os solos, independentemente de sua granulometria original, é equivalente à inserção de um material granular, implicando fisicamente em redução dos pontos de contato entre as partículas, propiciando um aumento da porosidade interna por aumento do número de macroporos. Porém, presume-se que tais fenômenos se dêem de formas distintas nos solos argiloso e arenoso.

Para os compósitos do solo BR-120, de granulometria argilosa e, portanto, constituído predominantemente por partículas de menor tamanho, ainda que o número de contatos entre as partículas tenha diminuído pela substituição parcial de partículas de menor tamanho (presentes no solo removido mais fino) por partículas de maior tamanho (presentes no resíduo de EPS mais granular), resultando na formação de macroporos até então inexistentes como mostra a imagem do ensaio MEV do solo BR-120 com 30% de EPS na energia modificada (Figura 3.19), mesmo assim supõe-se que houve a manutenção de um número ainda significativo de contatos entre as partículas constituintes dos compósitos solo-EPS e, portanto, a manutenção de volumes de vazios ainda reduzidos, a despeito da formação dos macroporos decorrentes da adição do resíduo granular ao solo argiloso.

Justifica-se, dessa forma, para um mesmo gradiente hidráulico, a tendência de incremento da permeabilidade saturada (k_{20}) com o incremento da percentagem de resíduo de EPS (devido ao sucessivo aumento do quantitativo de macroporos), assim como a manutenção de k_{20} em magnitudes similares à do solo puro compactado (devido ao predomínio do reduzido volume de vazios nos compósitos).

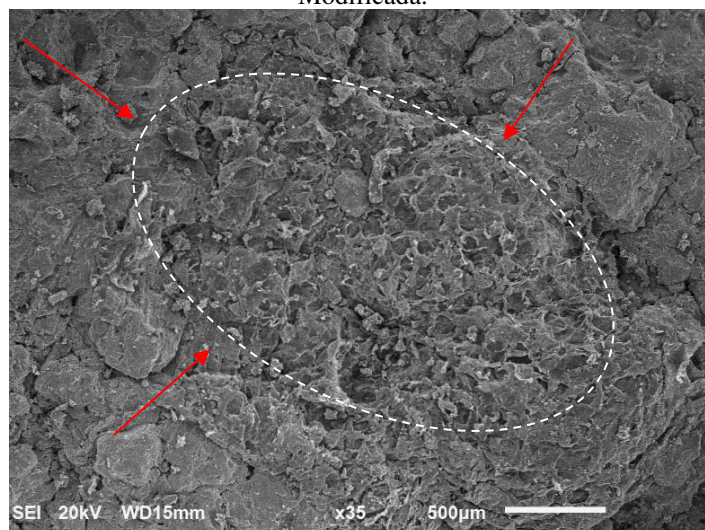
Figura 3.19-Imagem do Ensaio MEV mostra o surgimento das estruturas de macroporos na interface do solo BR-120 e EPS (textura mais fibrosa), apontados pelas setas.



Fonte: Próprio autor.

Para os compósitos do solo argiloso, a adesão interfacial entre as partículas da fração argila e as partículas de resíduo de EPS é fundamental para a manutenção dos baixos valores de k_{20} , em magnitudes similares à do solo argiloso puro, está boa adesão entre as partículas do EPS e o solo BR-120, pode ser comprovada pela imagem do Ensaio MEV, onde demonstra o grão de EPS aprisionado no interior da massa do solo (Figura 3.20). Isto é importante salientar pois, deficiências nesse mecanismo de aderência poderiam converter essa interface em caminho preferencial para a percolação de água na estrutura interna do compósito, com eventuais aumentos significativos nos valores de k_{20} .

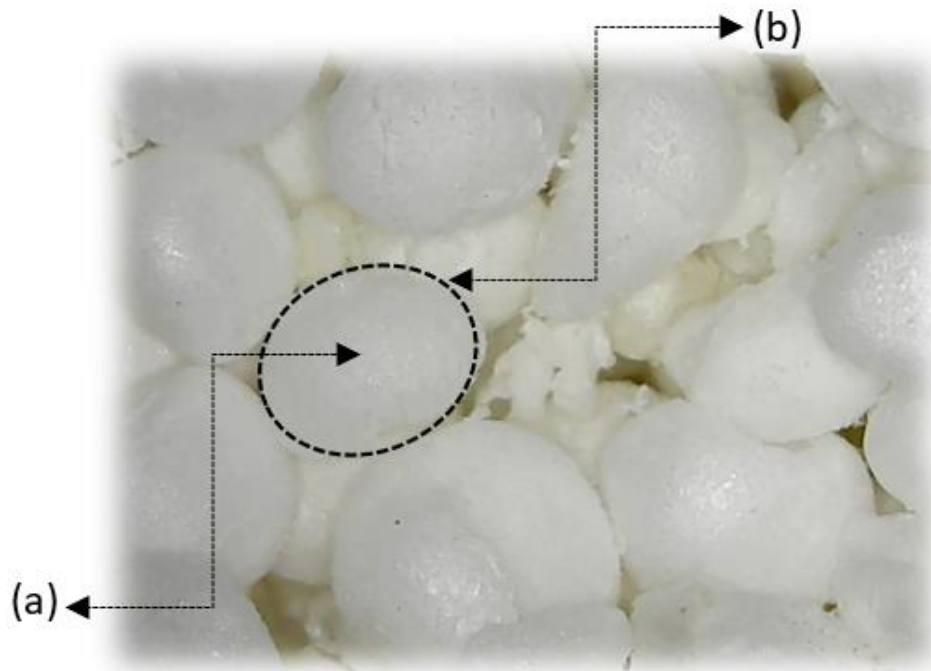
Figura 3.20- Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS com textura mais fibrosa indicado por setas vermelhas, envolvido pela massa do solo na amostra com proporção volumétrica de 30% EPS na Energia Proctor Modificada.



Fonte: Próprio autor.

Os maiores graus de arredondamento e de lisura superficial das partículas de EPS (Figura 3.21) e o caráter intrinsecamente coesivo das partículas de argila favorecem a adesão interfacial entre tais partículas, adesão essa que se multiplica nos diversos pontos de contato interpartículas previamente mencionados.

Figura 3.21-Imagem de amostra de resíduos de EPS triturados obtida por microscopia óptica: textura superficial lisa (a) e morfologia arredondada (b) de partícula representativa.

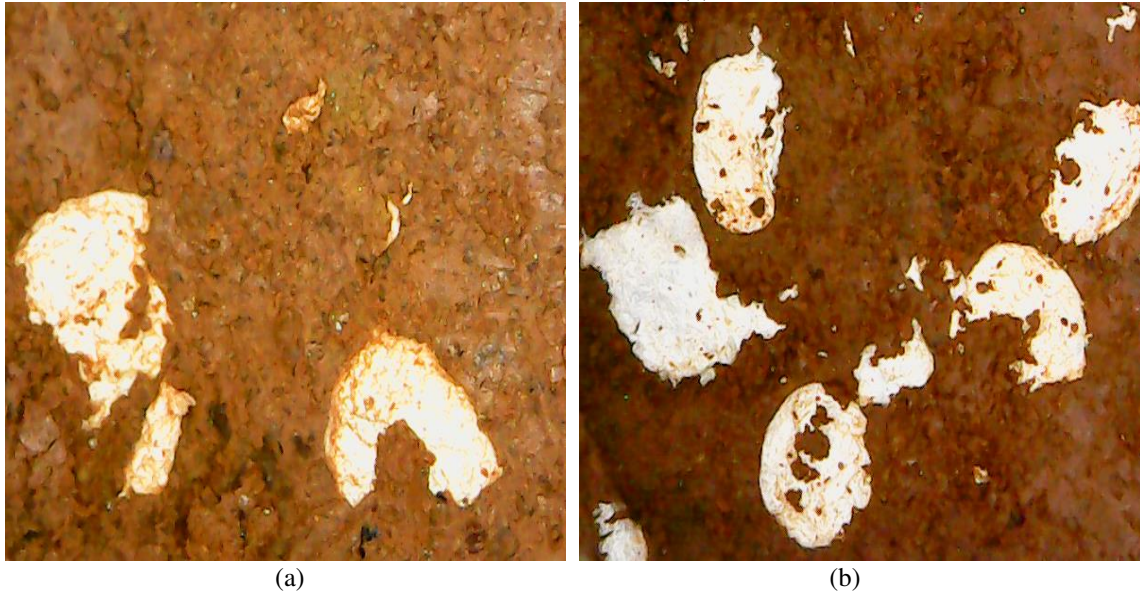


Fonte: Próprio autor.

Constata-se experimentalmente que as partículas de EPS estão “aprisionadas” na massa de solo compactada em decorrência do caráter coesivo do material geológico constituinte do compósito (Figura 3.22).

Figura 3.22- Imagens de amostras do compósito solo argiloso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes do “aprisionamento”, por adesão interfacial, das partículas de EPS na massa de

solo coesivo. Solo BR-120 com 30% em proporção volumétrica de EPS na Energia Proctor Modificada (a) e Proctor Intermediária (b).

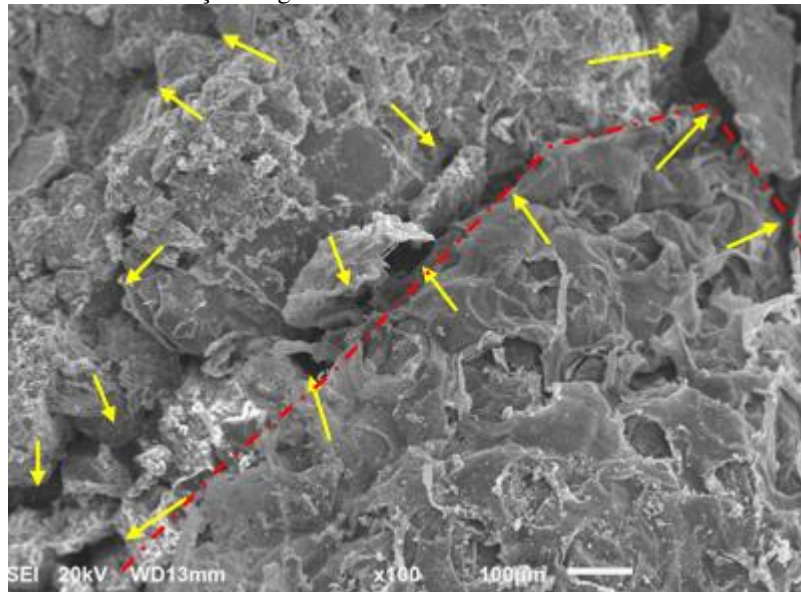


Fonte: Próprio autor.

Há de se destacar, porém, que a amplitude dos valores de k_{20} para um mesmo gradiente hidráulico (GH) tende a aumentar com o incremento desse gradiente (Figura 3.24). Supõe-se que, para gradientes hidráulicos mais baixos (GH=15), a força de percolação da água no interior do compósito não comprometa a adesão interfacial solo-EPS, a qual porém torna-se menos eficiente com o aumento do gradiente (GH=66 e GH=85), implicando em possíveis descolamentos parciais das partículas nessa interface e formação de caminhos preferenciais de percolação da água, contribuindo para o aumento de k_{20} , ainda que de forma não significativa.

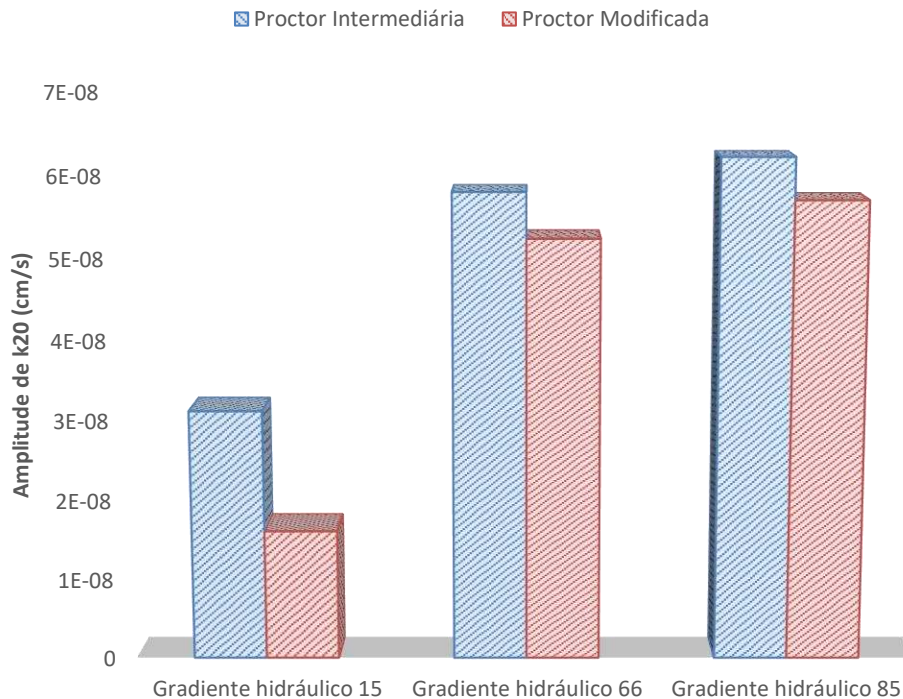
Para os compósitos do solo Vila Secundino, de granulometria arenosa, considerando-se as características granulométricas de ambos materiais, essencialmente granulares, e considerando-se que houve substituição parcial de um material granular “mais fino” (solo arenoso) por um material granular “mais grosso” (resíduo de EPS), estima-se, para essa configuração, a existência de um menor número de contatos entre as suas respectivas partículas, resultando na formação de novos macroporos que incrementam a permeabilidade do compósito compactado. A formação de novos macroporos, formado principalmente na interface entre solo e o grão de EPS (na imagem do MEV, com textura mais fibrosa), esta apresentada pela imagem do Ensaio MEV, do solo Vila Secundino com proporção de 30% de EPS na Energia Proctor Modificada.

Figura 3.23- Imagem do Ensaio MEV mostra a formação de novos macroporos (indicadas por setas) pela inserção do grão de EPS no solo Vila Secundino.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.24- Amplitude dos valores de k_{20} dos materiais investigados (solo argiloso e correspondentes compósitos) para um dado valor de gradiente hidráulico.

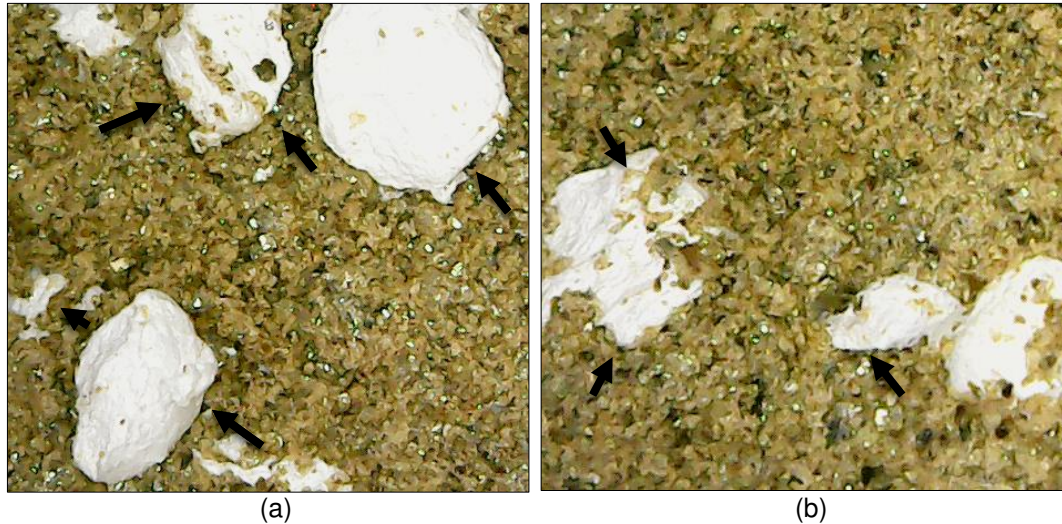


Fonte: Próprio autor.

Também em função de seu caráter granular, não há expectativa de que a interação entre as suas partículas possa implicar em adesão e, conseqüentemente, em contribuição desse mecanismo na redução da permeabilidade saturada do compósito. Consta-se

experimentalmente que as partículas de EPS “flutuam” na massa de solo granular compactada, estando soltas nessa massa em decorrência da aludida falta de interação (Figura 3.25).

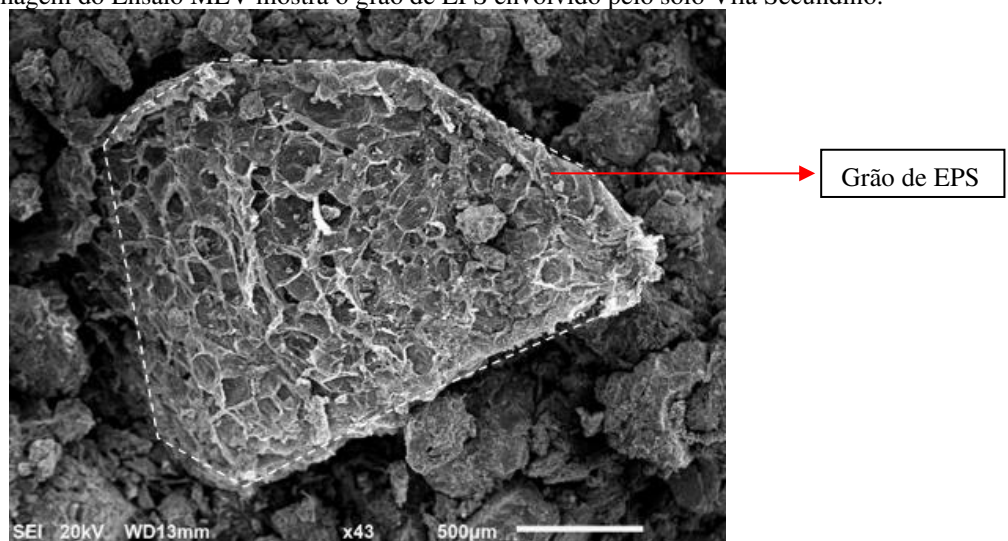
Figura 3.25 - Imagens de amostras do compósito solo arenoso-resíduo de EPS na condição compactada obtidas por microscopia óptica: detalhes da “flutuação” das partículas de EPS na massa de solo granular. Solo Vila Secundino com 30% em proporção volumétrica de EPS na Energia Proctor Intermediária (a) e Proctor Modificada (b).



Fonte: Próprio autor.

A deficiência na aderência na interface do solo Vila Secundino com o resíduo EPS, também pode ser comprovada pela imagem do Ensaio MEV (Figura 3.26), no solo Vila Secundino com proporção volumétrica de 30% de EPS na Energia Proctor Modificada. Na imagem fica evidente a separação física entre o solo e grão do EPS (textura mais fibrosa), isto é devido como dito anteriormente as características granulares presentes nos dois materiais (solo e EPS), que promove assim uma deficiência no contato interfacial entre os materiais.

Figura 3.26-Imagem do Ensaio MEV mostra o grão de EPS envolvido pelo solo Vila Secundino.

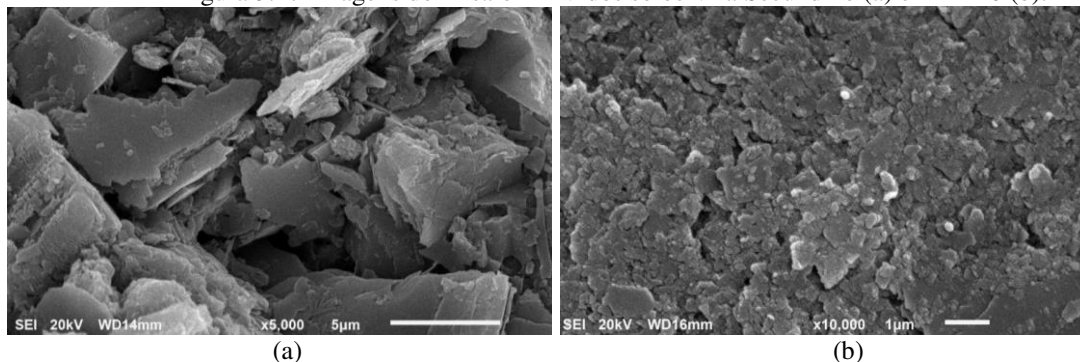


Fonte: Próprio autor.

Os solos que apresentam grãos com geometria mais angular formam estruturas com o índice de vazios mais alto, se comparada com solos que não possui esta característica. Deste modo, este maior índice de vazios, tem como consequência uma maior permeabilidade do material (PINTO, 2006).

Nas imagens do ensaio MEV realizadas no solo BR-120 e solo Vila Secundino (Figura 3.27), ficou evidente que o solo Vila Secundino possui a geometria dos seus grãos mais angular, o que promoveu para os compósitos compostos por este solo tenha resultado em uma maior permeabilidade, além de outras características citadas anteriormente.

Figura 3.27-Imagens do Ensaio MEV dos solos Vila Secundino (a) e BR-120 (b).



Fonte: Próprio autor.

Para os materiais compactados envolvendo ambos os solos, o aumento do gradiente hidráulico proporcionou, em geral, uma tendência de aumento da permeabilidade saturada, o que também foi constatado em outros trabalhos que envolveram solos compactados (AYADAT *et al.*, 1998; KAOSER *et al.*, 2006; COSTA, 2016). De acordo com Pinto (2006), Ke e Takahashi (2012) e Al-taie *et al.* (2014), sob gradientes hidráulicos mais elevados, o aumento da força de percolação ou de arraste na direção do fluxo pode promover o carreamento de partículas finas do solo e, conseqüentemente, o aumento dos vazios e da permeabilidade.

No caso dos compósitos argilosos, a tal mecanismo de arraste pode ser acrescido o previamente mencionado mecanismo de redução da adesão interfacial pelo descolamento parcial entre as partículas de solo e de resíduo de EPS sob gradientes hidráulicos mais elevados. Não se presume que tal descolamento seja relevante nos compósitos arenosos dada a hipótese de inexistência dessa componente de adesão.

O emprego de uma maior energia de compactação em ambos os solos e suas misturas com EPS proporcionou uma redução da permeabilidade saturada, devida à redução dos vazios, promovida pela expulsão de maior volume de ar durante o processo de compactação. Adicionalmente, presume-se que a compactação a uma energia mais elevada tenha promovido a redução da deficiência de aderência entre as partículas de solo e de resíduo de EPS,

contribuindo com a aproximação entre os grãos, reduzindo assim a permeabilidade saturada do compósito.

De acordo com Boscov (2008) e Catapreta (2008), as camadas de cobertura e de base de aterros sanitários são construídas com materiais de baixa condutividade hidráulica ou permeabilidade saturada (tipicamente menor que 10^{-7} cm/s). Deste modo, o solo BR-120, tanto no estado puro quanto em misturas com resíduo de EPS, em ambas energias de compactação, apresenta aplicabilidade para camadas impermeabilizantes destas obras de proteção ambiental. Para tal solo, o acréscimo de resíduo de EPS mostrou-se tecnicamente viável no que concerne a tais aplicações.

3.4 CONCLUSÕES

Após o programa experimental de pesquisa realizado, pode-se concluir que:

- ✓ Para o solo argiloso e seus compósitos compactados, presume-se que a predominância de microporos e o mecanismo de adsorção de água em sua estrutura interna respondem pela maior dificuldade de percolação da água nos poros e, conseqüentemente, pela baixa permeabilidade saturada;
- ✓ Para o solo arenoso e seus compósitos compactados, dado o seu caráter intrinsecamente granular, presume-se a predominância de macroporos em sua estrutura interna, implicando em maior facilidade de percolação da água através dos poros de maior tamanho;
- ✓ Para as particularidades da pesquisa (energias de compactação e gradientes hidráulicos variáveis), os compósitos solo argiloso-EPS mostraram-se tecnicamente viáveis no que concerne a sua potencial aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários;
- ✓ Para os compósitos do solo argiloso, a adesão interfacial entre as partículas da fração argila e as partículas de resíduo de EPS apresenta-se como mecanismo fundamental para a manutenção dos baixos valores de permeabilidade saturada, em magnitudes similares à do solo argiloso puro compactado;
- ✓ A inclusão do resíduo de EPS aos solos proporcionou uma redução da densidade seca das misturas comparativamente aos solos puros, sugerindo, assim, uma possível vantagem técnica do compósito em sua utilização na composição de barreiras hidráulicas de aterros sanitários assentadas sobre materiais de baixa rigidez.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, G. E.; MOHAMED, H. K.; AHMED, H. M. **New replacement formations on expansive soils using recycled EPS beads.** Proc. 18th ICSMGE, 2013.
- AL-TAIE, L., PUSCH, R., KNUTSSON, S. **Hydraulic properties of smectite rich clay controlled by hydraulic gradients and filter types.** Applied Clay Science. 87, 73-80, 2014.
- ALVES, G. P. M. **Capacidade de atenuação do solo de fundo da lagoa anaeróbia da ETE de Passo Fundo/RS.** 2005. Dissertação, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo/RS. 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4874: Standard test method for leaching solid material in a column apparatus.** Philadelphia, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995). **NBR 13292/95: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante.** Rio de Janeiro, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995). **NBR 6502/95: Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2000). **NBR 14545/00: Solo-Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2001). **NBR NM 27/01: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório.** Rio de Janeiro, 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2003). **NBR NM 248/03: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2006). **NBR NM 45/06: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016a). **NBR 6457/16: Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016b). **NBR 6459/16: Solo - Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro, 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016c). **NBR 7180/16: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 3p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016d). **NBR 6508/16: Solo - Determinação da Massa Específica Aparente**. Rio de Janeiro, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016e). **NBR 7182/16: Solo - ensaio de compactação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2018). **NBR 7181/18: Análise Granulométrica – Solos - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 9p.
- AYADAT, T., BELOUAHRI, B., AIT-AMMAR, R. **La migration des particules fines comme approche d’explication du mecanisme de l’effondrement des sols**. Revue Francaise de Geotechnique 83(2), 1998. p. 73–82.
- BASSO, J. B. **Transporte e retenção de K⁺, Cu⁺² e Cl⁻ em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: procedimento de homogeneização da mistura e adaptações em equipamento de percolação em colunas**. 2003. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 2003.
- BOFF, F. E. **Avaliação do comportamento de uma mistura compactada de solos lateríticos frente a soluções de Cu⁺², k⁺ e Cl⁻¹ em colunas de percolação**. 1999. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP. 1999.
- BOSCOV, M. E.G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. 248p.
- CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. 2012. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 2012.
- CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG.2008.
- CETESB - Companhia de tecnologia e de saneamento ambiental de São Paulo. **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo/SP. 1993.
- COSTA, W. G. S. **Efeito da variação do gradiente hidráulico na estrutura de um solo compactado**. 2016. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 2016.
- DA SILVEIRA, L. R. **Considerações sobre o fluxo de água e contaminantes em solos**. Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, v. 13, n. 2, 2016
- DE ALMEIDA, T. L.; SCHALCH, V. **Avaliação da movimentação de líquidos contaminantes percolados nos poros do solo em locais de disposição de resíduos sólidos**. Águas Subterrâneas, 2008.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER. PRO 003: Coleta de amostras deformadas de solos**. Rio de Janeiro, 1994a. 4p.

- FARIAS, W. M. **Processos evolutivos de intemperismo químico e sua ação do comportamento dos solos do planalto central**. 2012. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2012.
- FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. **Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS)**. *Materiales de construcción*, 2012, 62.308: 547-566.
- KAOSER, S.; BARRINGTON, S.; ELEKTOROWICZ, M.; AYADAT, T. **The influence of hydraulic gradient and rate of erosion on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures**. *Journal of Soil & Sediment Contamination*, 15:481–496, 2006.
- KE, L.; TAKAHASHI, A. **Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow**. *Soils and Foundations*, 2012, 52(4): 698-711.
- KLEIN, V. A; LIPBARDI, P. L. **Condutividade hidráulica de um latossolo roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. *Ciência Rural*, 32 (6), pp. 945-953.
- LANGE, L.C.; AMARAL, M.C.S. **Geração e características do lixiviado**. In: Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras. Luciana Paulo Gomes (coordenadora). Rio de Janeiro: ABES, 2009. 360p.
- LEITE, A. L. **Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular**. 2001. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 2001.
- LOPERA, J. F. B. **Influência da microestrutura do comportamento mecânico dos solos tropicais e compactados**. 2016. Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2016.
- LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 2007.
- MESQUITA, M. G. B.; MORAES, S. O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo**. *Ciência Rural*, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.
- OMAFRA, Staff; WALL, G. **Soil Erosion, Causes and Effects**. *Ridge Town and College of Agricultural Technology, Ontario Institute of Pedology*. [http://www. search. gov. on. ca](http://www.search.gov.on.ca), v. 8002, 2003.
- PACHECO e SILVA, D. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners**. 2005. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 2005.
- PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

- SAMPAIO, F. M. T.; MENEZES, S. M.; FURTINI, M. B.; RIBEIRO, K. D. **Correlações entre a permeabilidade e os atributos físicos do solo da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras-MG.** Ciência e Agrotecnologia, v. 30, n. 4, p. 798-803, 2006.
- SILVEIRA, M. V.; CALHEIROS, A. V.; CASAGRANDE, M. D. T. **Applicability of the expanded polystyrene as a soil improvement tool.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 30, n. 6, p. 06018006, 2018.
- TAMUT, T. R.; PRABHU, K.; VENKATARAMANA, S. C.; YARAGAL. 2014. **Partial replacement of coarse aggregates by expanded polystyrene beads in concrete.** Int. J. Res. Eng. Technol. 3 (2): 238–241.
- TESSARI, J. **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento dos Seus Resíduos na Construção Civil.** 2006. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2006.
- UNITED STATES. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. OFFICE OF SOLID WASTE; EMERGENCY RESPONSE; RISK REDUCTION ENGINEERING LABORATORY (US). **Final covers on hazardous waste landfills and surface impoundments.** Office of Solid Waste and Emergency Response, US Environmental Protection Agency, 1989.
- WILLIAMS, L.; HOYT, D.; DWYER, S.; HARGREAVES, G.; ZORNBERG, J.G. (2011). **Design Criteria and Construction of a Capillary Barrier Cover System: The Rocky Mountain Arsenal Experience.** GeoFrontiers 2011 Conference, Geo-Institute of ASCE, Dallas, Texas, p. 996-1005.
- YONG, R. N. **Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation.** Boca Raton, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO GERAL

Nessa pesquisa, foram realizadas diversas análises mecânicas (compressão, puncionamento e cisalhamento) e hidráulicas (permeabilidade saturada) em misturas compactadas de solo e EPS, de modo a (1) avaliar o eventual benefício de utilizar o resíduo de EPS em misturas com solos de distintas características granulométricas (argiloso e arenoso) e (2) aferir as respectivas sensibilidades mecânica e hidráulica das misturas solo-EPS compactadas, visando o emprego deste compósito em obras geotécnicas. Após a realização desta pesquisa, as principais conclusões são:

- ✓ As respostas mecânicas e hidráulicas do compósito solo-EPS mostraram-se essencialmente dependentes das características granulométricas do solo: o solo argiloso apresentou, em geral, melhores respostas mecânicas e hidráulicas à ação do resíduo de EPS que o solo arenoso;
- ✓ Para o solo argiloso, a aderência com o resíduo de EPS foi importante para mobilizar as respostas mecânicas e hidráulicas do compósito, permitindo, assim, identificar este solo como o mais adequado para viabilizar geotecnicamente misturas com resíduo de EPS compactadas;
- ✓ Para os compósitos constituídos por solo arenoso, a deficiência na aderência e no atrito interfaciais entre as partículas de solo e de resíduo de EPS foi primordial para que este solo não apresentasse comportamento geotécnico adequado face às solicitações mecânicas e hidráulicas contempladas na pesquisa;
- ✓ A inclusão do resíduo de EPS aos solos proporcionou uma redução da densidade seca das misturas comparativamente aos solos puros, sugerindo, uma possível vantagem técnica do compósito em sua utilização na composição de obras geotécnicas que serão assentadas sobre materiais de baixa rigidez.