

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE COMPONENTES PLÁSTICOS, BORRACHA E DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO MINERADOS EM ATERRO SANITÁRIO PARA AVALIAÇÃO DE POTENCIAL DE USO EM OBRAS GEOTÉCNICAS

Mariane Alves de Godoy Leme ¹; Cíntia Minori Takeda ²; Kennedy Gabriel Silva ³; Blendon Prendley do Nascimento ⁴; Eduardo Augusto Licco ⁵; Miriam Gonçalves Miguel ⁶

Resumo – A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a sua disposição no solo aumentam a cada ano, atingindo valores globais de bilhões de toneladas. Neste contexto, as atividades de mineração de aterros, que buscam extrair os materiais aterrados, apresentam-se como potencial ação mitigadora. Dentre os compostos de RSU aterrados nos aterros sanitários, acredita-se que os diferentes tipos de plástico, borracha e resíduos de construção e demolição (RCD) podem vir a ser reutilizados em obras geotécnicas. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi analisar a granulometria e as condições físicas de componentes de RSU aterrados há 8 anos em aterro sanitário, segregados nas categorias plástico duro, plástico mole, plástico tipo sacos e sacolas, borracha e RCD, para avaliação de seu potencial de uso em obras geotécnicas do tipo reforço de solos e pavimentação de vias de baixo tráfego. Os resultados demonstraram que os plásticos e borracha do RSU minerado apresentaram predominância de partículas do tamanho das frações matacão e pedra, em ótimas condições de resistência física, no entanto com presença de impurezas provenientes do aterramento, necessitando assim de um beneficiamento para viabilidade técnica antes de seu uso, como os processos de trituração e limpeza. Enquanto os compostos RCD minerados, obteve-se grande presença de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, no entanto na faixa de 2,0 a 20 cm de diâmetro, fazendo necessária a trituração em um moinho britador para uso como agregado reciclado destinado à pavimentação. Conclui-se que os materiais são potenciais recursos para reuso, necessitando de prévios beneficiamentos.

Abstract – The municipal solid waste (MSW) generation and its disposal on soil increase every year, reaching values of billions of tons. In this context, landfill mining activities, which seek to extract the landfilled materials, present as a potential mitigating action. Among the MSW compounds landfilled in landfills, it is possible that different types of plastic, rubber, and construction and demolition waste (CDW) can be reused in geotechnical projects. Thus, this work aimed to analyze the grain size distribution and physical conditions of MSW components landfilled during 8 years in a sanitary landfill, segregated into the categories hard plastic, soft plastic, plastic bags, rubber, and CDW, for evaluation of their potential uses in geotechnical projects such as soil reinforcement and low-traffic paving. The results showed that the plastic and rubber materials from the mined MSW present a predominance of boulder and cobble fractions particles size, in excellent physical resistance conditions, however with presence of impurities from the landfilled situation, needing beneficiation for technical feasibility before its use, such as crushing and cleaning processes. In landfilled CDW compounds there was a large presence of Portland cement and rocks fragments, in the diameter range of 2.0 to 20 cm, being necessary a crushing in a mill crusher for use as recycled aggregate for paving. It is concluded that these materials are potential resources for reuse, needing previous improvement.

Palavras-Chave – Resíduos sólidos urbanos; mineração de aterro; geotecnia ambiental; pavimentação; reforço de solos.

1 Engenheira Ambiental, Doutoranda, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, (19) 98805.0696, maryane88@hotmail.com

2 Engenheira Ambiental, Mestranda, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, (19) 99703.5658, minorio715@hotmail.com

3 Graduando-Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, (11) 95269.9162, gabrielsilva.kennedy694@gmail.com

4 Graduando-Química, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, (19) 99205.7577, b232182@dac.unicamp.br

5 Graduando-Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, (11) 99974.0296, edu10licco@gmail.com

6 Engenheira Civil, Professora Associada, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, (19) 3521.2393, mgmiguel@fec.unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos é uma consequência da urbanização, do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional, a qual pode ser fonte de contaminação para o solo, ar e água quando não bem gerenciada. Estima-se que em 2016 foram gerados 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no mundo, sendo que o destino da parcela dos RSU coletados corresponde a 37%, em massa, de disposição em algum tipo de aterro, como os aterros sanitários ou aterros controlados, 33% dispostos inadequadamente no solo, rodovias, áreas abertas, 19% destinados para a compostagem ou reciclagem e 11% incinerados (KAZA et al., 2018). Sendo assim, depreende-se que uma parcela significativa de RSU gerado atualmente não está sendo reaproveitado, mas sim descartado em aterros. Kaza et al. (2018) alertam que em 2050 a taxa global anual de geração de RSU pode chegar a 3,40 bilhões de toneladas. Desta maneira, se esta tendência se concretizar, haverá regiões com escassez de áreas para a implantação e operação de novos aterros sanitários e, conseqüentemente, disposição sanitária do RSU.

Assim, ao levar em consideração o cenário atual sobre os RSU, acredita-se que as atividades de mineração de aterros, que correspondem à tecnologia de escavação para extrair os muitos materiais, de diversas características e diferentes graus de biodegradação, como plástico, metal, borracha, isopor, tecido, vidro, solo, entre outros, aterrados em todo o planeta, por décadas, e que possuem potencial para serem reutilizados, seja na forma de energia e/ou material, é uma potencial alternativa para minimizar os problemas ocasionados pela geração de resíduos sólidos urbanos. Ressalta-se que o potencial econômico do aterro sanitário para mineração baseia em três parâmetros: a idade, o tamanho e a localização (HULL; KROGMANN; STROM, 2005; KROOK; SVENSSON; EKLUND, 2012; VAN DER ZEE; ACHTERKAMP; DE VISSER, 2004).

Dentre os compostos de RSU dispostos e aterrados nos aterros sanitários, admite-se que os diferentes tipos de plástico, a borracha e os resíduos de construção e demolição (RCD) podem vir a ser reutilizados em obras geotécnicas. Um exemplo é a possível aplicação do plástico e borrachas para o reforço de solos, visto que este reforço com fibras, como o emprego das lascas de borracha e plásticos, consiste em selecionar um material, natural ou sintético, que esteja na forma de fibras ou que passe por um tratamento, e misturar com uma massa uniforme de solo. Esta técnica proporciona aumento na resistência ao cisalhamento a partir da resistência à tensão das fibras, sem a introdução de planos contínuos de fraqueza no material, possibilitando até mesmo uma redução nos custos da obra (FEUERHARMEL, 2000; FOOSE et al., 1996; JAMSHIDI et al., 2010; LI, 2005). Já na gestão de resíduos de construção civil, dentre vários países, os RCD têm mostrado grande potencial para serem utilizados como agregados reciclados em projetos de construção de aterros, fundações, bases e sub-bases para pavimentação de vias de baixo tráfego, devido seu adequado desempenho técnico, gerando um impacto positivo ao ambiente e à economia, visto o uso e a oportunidade de mercado para aquisição de agregados reciclados (FUCALE; PROENÇA, 2014; REIS et al., 2021). Atualmente, agregados reciclados de RCD têm sido frequentemente usados em camadas do pavimento, desde em pequenos percentuais até a reposição total de materiais (CARDOSO et al., 2016; JIMÉNEZ et al., 2012; LEITE et al., 2011; REIS et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi analisar a granulometria e as condições físicas e de aparência de componentes de resíduos sólidos urbanos dispostos há 8 anos em aterro sanitário, segregados nas categorias plástico duro, plástico mole, plástico tipo sacos e sacolas, borracha, e resíduo de construção e demolição (RCD), para avaliação de seu potencial de uso em obras geotécnicas do tipo pavimentação de vias de baixo tráfego e reforço de solos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma de procedimentos para determinação granulométrica dos componentes da amostra de RSU utilizada está ilustrado na Figura 1, enquanto as descrições completas dos procedimentos são descritas nos itens 2.1 (Coleta da amostra de resíduo sólido urbano aterrado), 2.2 (Divisão da amostra em categorias) e 2.3 (Caracterização granulométrica).

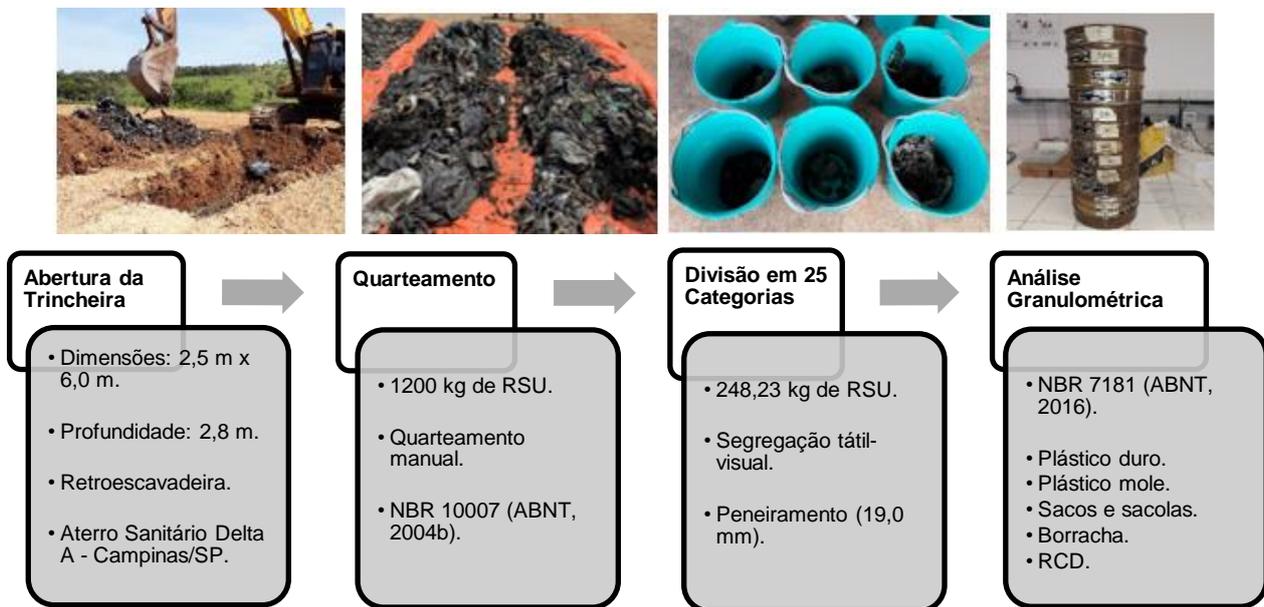


Figura 1. Procedimentos para determinação granulométrica dos componentes da amostra de RSU.

2.1 Coleta da amostra de resíduo sólido urbano aterrado

O resíduo sólido urbano estudado foi proveniente da mineração de uma célula datada com disposição de resíduos em 2012, do Aterro Sanitário Delta A, localizado na cidade de Campinas, Brasil, com coordenadas geográficas de 22°54'50''S e 47°08'41''W. Este aterro sanitário foi projetado para receber resíduos classificados como Classe IIA (Não Perigosos Não Inerte) e IIB (Não Perigosos Inertes), segundo a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004a), ou seja, resíduos de origem residencial, de serviços de poda de árvores e capinação e resíduos sólidos de serviços de saúde após tratamento por micro-ondas. Para a coleta da amostra representativa de RSU foi aberta uma trincheira com retroescavadeira, em Dezembro de 2019, com dimensão em planta de 2,5 metros x 6,0 metros e profundidade de 2,8 metros a partir da camada de cobertura (1,0 m). O RSU escavado, com cerca de 1200 kg, foi dividido em duas porções, as quais foram dispostas sobre duas lonas plásticas do tipo encerado polietileno, ao lado da trincheira, a fim de facilitar o quarteamento manual por meio do uso de enxadadas e pás. As duas porções do RSU foram homogeneizadas e quarteadas sucessivamente, seguindo procedimentos da norma brasileira NBR 10007 (ABNT, 2004b), de forma a reduzir a massa inicial de cerca de 1,2 toneladas para uma amostra final representativa de 248,23 kg, em massa úmida (LEME et al., 2021) (Figura 1).

2.2 Divisão da amostra em categorias

Após coleta, a amostra final representativa foi segregada tátil-visualmente em 25 categorias, utilizando uma bancada de separação, onde eram espalhados os RSU para melhor visualização, e baldes plásticos de 15 litros para armazenamento dos componentes já divididos em categorias, sendo elas: matéria orgânica, papel, papelão, madeira, poda, plástico duro, plástico mole, plástico tipo sacos e sacolas, borracha, vidro, isopor, resíduo de construção e demolição (RCD), compostos (materiais com duas ou mais categorias na mesma peça), couro, porcelana, espuma, solo, finos (menores que 19,0 mm), embalagens longa vida, metal magnético, metal não magnético, fralda e absorvente, tecido, perigosos (hospitalares) e diversos (materiais não identificados tátil-visualmente), as quais foram devidamente pesadas, de modo a se obter a composição gravimétrica da amostra de RSU aterrado (LEME et al., 2021) (Figura 2).

Para as amostras de metal, a divisão em categorias metal magnético e metal não magnético foi realizada utilizando um ímã de neodímio, sendo assim os componentes que se fixavam no ímã foram determinados como magnéticos e os que não fixavam ao ímã foram considerados como não magnéticos. Já os componentes da categoria dos finos foram obtidos do peneiramento dos materiais menores de difícil identificação tátil-visual, utilizando uma peneira com malha de 19,0 mm.

O material passante foi categorizado como finos (menores que 19,0 mm), também conhecidos como material tipo-solo, e o retido na peneira foi tátil-visualmente classificado nas demais 24 categorias já apresentadas seguindo o processo de separação em baldes (LEME et al., 2021) (Figura 1).

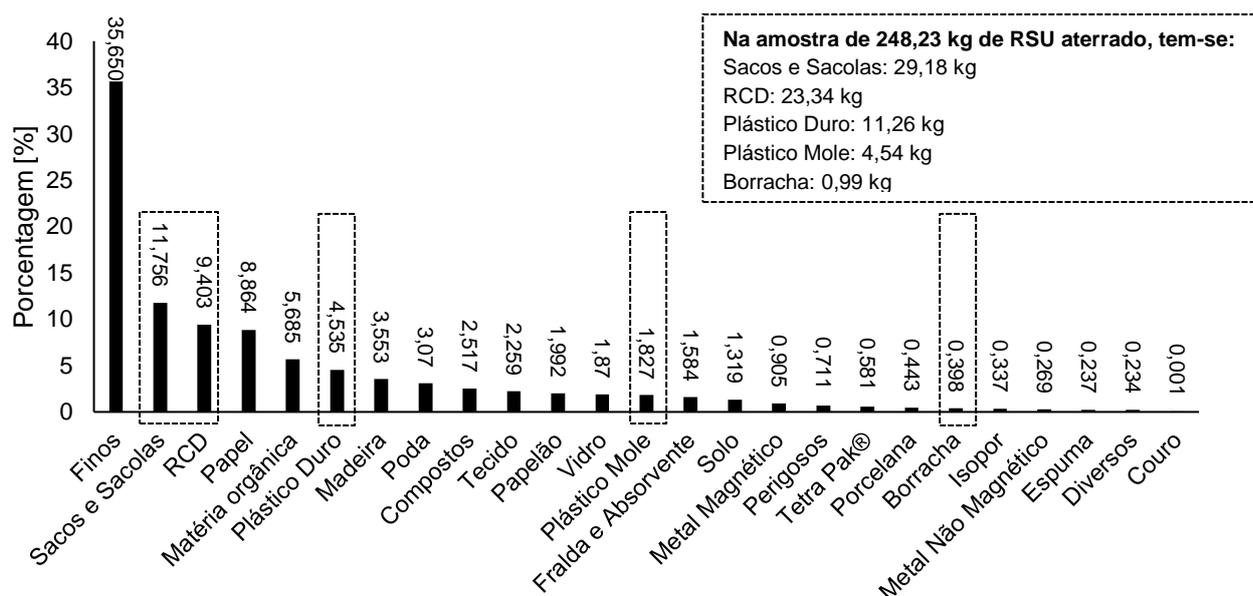


Figura 2. Caracterização gravimétrica do RSU, em massa úmida (Fonte: Adaptado de Leme et al., 2021).

2.3 Caracterização granulométrica

Feita a divisão em categorias, parte de amostra de cada categoria foi levada em estufa de temperatura constante de 60°C, por onde permaneceu até que sua massa estabilizasse, isto é, ficasse seca. O teor de umidade, em base úmida, obtido nas categorias estudadas, foi de 39,15% para Sacos e Sacolas, 8,22% para RCD, 15,60% para Plástico Duro, 18,53% para Plástico Mole e 17,29 % para Borracha (LEME et al., 2021). Os teores de umidade, em base seca e em base úmida, das 25 categorias separadas tátil-visualmente, na amostra representativa, estão apresentados em Leme et al. (2021). Ressalta-se que temperaturas de 60°C são recomendadas para secar amostras de RSU a fim de evitar perda de sólidos por volatilização e evitar que os materiais plásticos derretam na estufa, o que pode acontecer com temperaturas muito elevadas (LÓPEZ et al., 2019). Após os compostos secos, foram realizados os procedimentos para determinação da análise granulométrica para as amostras das 25 categorias, baseando-se nas recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016), pela qual se procede a análise granulométrica por peneiramento fino e grosso de solos, adaptando-a para resíduos sólidos. Para o procedimento foram utilizadas treze peneiras consecutivas (Figura 1), com diâmetros de aberturas decrescentes: 25,0 mm; 19,0 mm; 9,52 mm; 2,0 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,42 mm; 0,25 mm; 0,15 mm; 0,075 mm; 0,062 mm; 0,053 mm; e 0,044 mm, além de uma balança analítica de precisão de laboratório com resolução de 2 casas decimais. Os materiais maiores que 25,0 mm tiveram seu diâmetro equivalente medidos manualmente utilizando uma régua. Foi considerada a escala granulométrica da NBR 6502 (ABNT, 1995).

Nesta pesquisa, para análise do potencial de uso de componentes de RSU para fins geotécnicos, foram estudadas 5 categorias (plástico duro, plástico mole, plástico tipo sacos e sacolas, borracha e resíduo de construção e demolição), conforme suas curvas granulométricas obtidas, coeficiente de curvatura (C_c), coeficiente de uniformidade (C_u), frações granulométricas (matação, pedra, pedregulho, areia grossa, areia média, areia fina, silte e argila) e classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As categorias de RSU estudadas apresentaram a predominância de partículas do tamanho da fração matacão (20 cm a 1m) (plástico duro, sacos e sacolas e borracha), pedra (6,0 cm a 20 cm) (plástico mole) e/ou pedregulho (2,0 mm a 6,0 mm) (RCD). Enquanto pela classificação pelo

SUCS foram obtidas classificações GW (Pedregulho Bem Graduado), SP (Areia Mal graduada) e GP (Pedregulho Mal Graduado) (Figura 3 e Tabela 1).

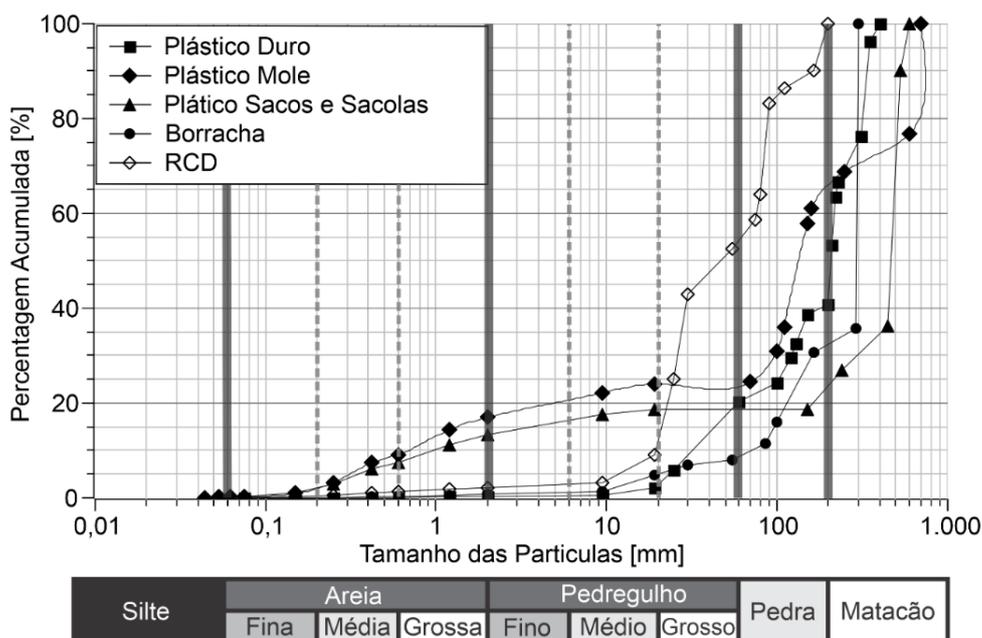


Figura 3. Curvas granulométricas da amostra de RSU minerado.

Tabela 1. Resultados das Curvas Granulométricas da amostra de RSU minerado.

Parâmetros	Faixas Granulométricas	Categoria					
		Plástico Duro	Plástico Mole	Sacos e Sacolas	Borracha	RCD	
C_c	-	2,21	94,16	272,25	1,04	0,41	
C_u	-	6,77	220,59	625,00	4,17	3,98	
Frações (%)	Matacão	20 cm a 1 m	59,00	35,00	78,00	68,00	0,00
	Pedra	6,0 cm a 20 cm	20,82	41,00	4,00	23,00	46,00
	Pedregulho	2,0 mm a 6,0 cm	19,92	7,02	4,63	8,32	51,83
	Areia grossa	0,6 mm a 2,0 mm	0,14	7,87	5,93	0,38	0,81
	Areia média	0,2 mm a 0,6 mm	0,10	7,11	5,44	0,24	0,86
	Areia fina	0,06 mm a 0,2 mm	0,02	1,81	1,74	0,06	0,50
	Silte	0,002 mm a 0,06 mm	0,00	0,19	0,26	0,00	0,00
Argila	< 0,002 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Classificação SUCS	-	GW	SP	SP	GW	GP	

Nota: C_c : Coeficiente de Curvatura; C_u : Coeficiente de Uniformidade; SUCS: Sistema Unificado de Classificação de Solos; RCD: Resíduos de Construção e Demolição; GW: Pedregulho Bem Graduado; SP: Areia Mal graduada; GP: Pedregulho Mal Graduado.

O plástico duro, o plástico mole, sacos e sacolas e borracha escavados do Aterro Sanitário Delta A foram encontrados em ótimas condições de resistência física, tal como compostos plásticos e de borracha de resíduo fresco, recém descartados, percebidas por critérios apenas tátil-visual, isto é, analisando a qualidade do material aterrado quanto à sua aparência e composição externa. No entanto, nota-se a presença de resíduos viscosos impregnados em muitos dos materiais, o que pode vir a ser restos de matéria orgânica e até mesmo solo de cobertura diária das células (Figura 4-a). Logo, percebe-se que os materiais plásticos e a borracha têm potencial de serem aplicados na área geotécnica, mais especificamente para reforçar solos, no entanto, necessitariam passar por um beneficiamento de limpeza e trituração, visto as suas “impurezas” e também o fato da necessidade de serem reduzidos os seus tamanhos, já que 59% dos compostos de plástico duro, 78% dos compostos sacos e sacolas plásticas e 68% dos compostos de borracha têm dimensões equivalentes ao matacão, enquanto 41% dos compostos de plástico mole tem a dimensão de pedra (Tabela 1). Peddaiah, Burman e Sreedeeep (2018) afirmam que tiras de plástico de politereftalato de etileno (PET) com comprimento maior que 35 mm e 15 mm de largura tendem a não apresentar

uma distribuição uniforme no solo, e, conseqüentemente, não há uma boa fixação dos grãos de solo pelos plásticos, desta forma, para melhorar as propriedades de resistência ao cisalhamento de um solo, como a coesão e o ângulo de atrito interno dos grãos, seria necessário apenas a adição de um teor de 0,4% de tiras de plástico de PET com dimensão de 15 mm x 15 mm.

É importante destacar que o reforço do solo com a adição de fibras e tiras de plástico e/ou uma manta geotêxtil não tecido é uma alternativa mais econômica em relação ao uso de cimentos Portland, cinzas e cal (PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP, 2018; SALAMI; GHAZAVI, 2019). Ademais, Peddaiah, Burman e Sreedeeep (2018) salientam que o uso de tiras de plástico de PET para reforçar o solo pode reduzir os custos de obras relacionadas a pavimentação, uma vez que os autores constataram que o valor do Índice do Suporte de Califórnia (ISC) determinado para o solo silte arenoso não reforçado e reforçado foi de 3,3% e 20,6%, respectivamente, desta forma, o aumento do valor de ISC implica em subleitos de pavimentação menos espessos. Já Salimi e Ghazavi (2019) sinalizam que o fator de segurança de taludes formados por solo arenoso pode ser melhorado com a inserção de uma manta geotêxtil produzido a partir de plástico PET reciclado com 1 cm de espessura. Logo, enfatiza-se a necessidade de conduzir estudos para analisar a viabilidade de reforçar o solo com a adição de tiras de plástico e/ou outros materiais plásticos escavados de aterros sanitários, uma vez que o tipo e o teor de plástico no solo, a dimensão do material, a superfície do plástico (liso ou ondulado) e o tipo de solo interferem nos efeitos do reforço do solo (FADHIL; AL-SOUD; KUDADAD, 2021; PEDDAIAH; BURMAN; SREEDEEP, 2018).

Segundo Akbarimehr e Fakharian (2021), os resíduos de borracha estão sendo cada vez mais utilizados em aplicações de engenharia, como por exemplo no melhoramento de propriedades geotécnicas de solos argilosos submetidos a baixas tensões de compressão, visto suas adequadas propriedades e benefícios ambientais. No entanto, dois grandes interferentes ao uso de resíduos de borracha são o formato (tiras, granular, em “pó”) e o teor da borracha na mistura com solo, a fim de se obter uma boa coesão entre os grãos de argila e borracha, bem como uma resistência e taxa de amortecimento adequadas (AKBARIMEHR; FAKHARIAN, 2021). Visto que para projetos de melhoria de solos são mais eficientes partículas de borracha pequenas, isto é, de 5,0 mm a menores que 1,0 mm, tem-se que praticamente todos os compostos de borracha minerados no aterro sanitário devem ser triturados antes de seu uso para fins geotécnicos, aceito que menos de 1% dos compostos borrachas do RSU escavado apresenta diâmetro menor que 2,0 mm (Tabela 1).

Embora, em 2012, já encontrava-se em operação a Coordenadoria Setorial de Coleta Seletiva (COSEL), a qual coordena os serviços de coleta, armazenamento, destinação e tratamento de resíduos com potencial reciclável, como o papel, plástico, vidro e metal, sob responsabilidade da municipalidade, através do Departamento de Limpeza Urbana (DLU) da Prefeitura de Campinas (PMC, 2012), as categorias plástico duro, plástico mole e plástico tipo sacos e sacolas, quando combinadas, corresponderam a 18,532% (base seca) e 18,118% (base úmida) da composição gravimétrica do RSU minerado do aterro sanitário, sendo assim um valor expressivo dentro de 25 categorias (Figura 2). Por outro lado, a quantidade úmida de borracha obtida do RSU escavado no aterro correspondeu a apenas 0,988 kg, exigindo assim a mineração de grandes quantidades para obtenção de borracha para obras geotécnicas e de engenharia (LEME et al., 2021).

A quantidade de RCD, em massa úmida, no RSU aterrado, compõe 9,403% da amostra de RSU. Esse fato deve-se, em parte, à questão de que desde 2003, Campinas/SP possui uma Unidade Recicladora de Materiais (URM) em operação, que visa o tratamento de RCD de toda a cidade, por meio de um britador com capacidade para 80,00 t/hora, e destinação do material processado como material granulado utilizado pela prefeitura em sub-base de pavimentação e de produção de blocos, tijolos e cobertura de RSU no Aterro Delta A. No entanto, esses materiais recebidos na URM são provenientes de pontos de transbordo nas administrações regionais e de particulares, dos Ecopontos, caçambas instaladas nos Pontos Verdes e das entregas diretas por caçambeiros; logo, materiais dispostos em lixeiras comuns, residenciais, são dispostos diretamente no Aterro Sanitário Delta A como resíduo domiciliar, contendo entulhos provenientes de pequenas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, tais como fragmentos de tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, metais, argamassa, telhas, entre outros (PMC, 2012).

Segundo Cardoso et al. (2016) e *Land Transport & Authority* (LTA, 2010, 2020), os agregados reciclados de RCD, para serem eficientes como materiais para uso em sub-base de pavimentos,

devem conter pelo menos 60% de agregados de concreto reciclado, conhecido no Brasil como agregado de resíduo de concreto (ARC), com no máximo 40% de resíduos reciclados de alvenaria e tijolos, e/ou não mais do que 10% de outros materiais, como madeira, vidro, plástico e metal, a fim de ter qualidade comparada aos agregados naturais. Considera-se agregado tipo ARC, o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (ABNT, 2004c). Tem-se como resíduos classe A os resíduos: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, entre outros), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, entre outros) produzidas nos canteiros de obras (BRASIL, 2002). Nos compostos de RCD escavados do Aterro Sanitário Delta A, justamente obteve-se de cerca de 85% a 90%, em massa, de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, e 10% a 15%, em massa, de fragmentos cerâmicos e outros compostos (Figura 4-b-c), o que enriquece a possibilidade de uso desses componentes escavados como agregados reciclados de RCD para serem eficientes ao uso em pavimentos, visto a elevada porcentagem de agregado de resíduo de concreto (ARC).



Figura 4. **a)** Composto plástico com “impurezas” impregnadas. **b)** e **c)** Compostos de RCD da amostra de RSU minerado (destaque para a presença de alguns fragmentos cerâmicos em meio a fragmentos de cimento Portland e rochas).

Em comparação aos compostos de RCD minerados obtidos e os requisitos gerais para agregado reciclado destinado à pavimentação, segundo a norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004c), a qual estabelece os requisitos dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e sua utilização em pavimentação, os materiais de RCD da amostra minerada não se mostra naturalmente com potencial para uso, necessitando de beneficiamentos como a trituração, visto seu alto valor de uniformidade dos grãos e dimensão máxima de 165 mm, enquanto na norma são exigidos 63 mm no máximo (Tabela 2). No entanto, se faz possível essa trituração com moinhos específicos para esse uso, necessitando avaliar o custo-benefício desta atividade.

Tabela 2. Requisitos gerais para agregado reciclado destinado à pavimentação (Adaptado de NBR 15116, ABNT, 2004c) e propriedades da amostra de RSU minerado.

Propriedades	Agregado reciclado classe A NBR 15116 (ABNT, 2004c)	Amostra de composto RCD minerado
Composição granulométrica	Não uniforme. Bem graduado. $C_u > 10$	Muito uniforme. Mal graduado. $C_u = 3,98$
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm	165 mm
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	Entre 10% e 40%	1,15%
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesma características ¹	2
	Materiais não minerais de características distintas ¹	3
	Sulfatos	2
		$\cong 2$ (pequenas frações de plástico)
		-

Nota: ¹ São exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos. C_u : Coeficiente de uniformidade.

Analisando ainda os compostos de RCD minerados obtidos e os requisitos gerais para agregado reciclado destinado à pavimentação, segundo a norma brasileira NBR 15116 (ABNT,

2004c), nota-se uma incompatibilidade nos valores de coeficiente de uniformidade (C_u) e teor de material passante na peneira de 0,42 mm comparados aos exigidos pela norma brasileira, o que reforça a necessidade de trituração deste material caso ele tenha como objetivo ser utilizado como agregado reciclado destinado à pavimentação (Tabela 2).

Ressalta-se também que os compostos de RCD minerados não apresentaram visualmente grande presença de resíduos viscosos impregnados como ocorreu nos materiais plásticos, sendo os compostos de RCD relativamente livres de “impurezas” advindas do aterramento, o que comporta um ponto positivo ao seu reuso, visto que são comprovadas as aplicações de agregado reciclado de RCD em sub-base, base ou material de superfície na construção de estradas. No entanto, faz-se necessário que esses resíduos não possuam contaminantes, principalmente os considerados perigosos (CARDOSO et al., 2016; EU WFD, 2015), que mais uma vez não é o caso de compostos RCD minerados de aterros sanitários, pois não são locais de recebimento de resíduos perigosos (Classe I), mas sim de atividades domésticas, de poda e varrição (Classes IIA e IIB). Mas vale destacar que o resíduo de RCD minerado não é igual ao resíduo RCD obtido direto do canteiro de obras, visto que ele passou por um processo de aterramento com outros compostos. Segundo Leme et al. (2021), os RCD minerados são constituídos essencialmente por concreto, pedaços de argamassa e pedregulhos de pequenas obras residenciais, nas quais os próprios moradores e/ou trabalhadores contratados para pequenos serviços terceirizados geram pequenas quantidades de resíduos, não sendo viável o aluguel de uma caçamba de entulho. Dessa forma, os RCD são descartados juntamente com os RSU gerados domesticamente e encaminhados para o aterro sanitário. Assim, tem-se que a utilização de materiais aterrados, oriundos de aterros sanitários, para uso em obras geotécnicas, possuem potencial de uso, no entanto demandam caracterização minuciosa e ensaios específicos para cada propósito, a fim de conceder a esses materiais uma oportunidade de mercado e ação benéfica ao ambiente.

4. CONCLUSÕES

Os materiais das categorias plásticos, borracha, e resíduo de construção e demolição, com idade de 8 anos de aterramento, escavados e minerados de uma célula de um aterro sanitário em Campinas, Brasil, apresentaram potencial para reuso em projetos geotécnicos, avaliados conforme sua granulometria e por critérios tátil-visual, segundo qualidade do material aterrado quanto à sua aparência e composição externa. No entanto, importantes processos prévios de beneficiamento são necessários antes do reuso, como um beneficiamento de trituração e limpeza para os plásticos e borracha com objetivo de uso no reforço de solos, visto que houve predominância de partículas do tamanho das frações matacão e pedra nestas categorias; além de presença de impurezas provenientes de restos de matéria orgânica e solo de cobertura, porém em ótimas condições de resistência física, tal como resíduo fresco, recém descartados. Da avaliação dos compostos RCD minerados, obteve-se grande presença de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, contudo na faixa de 2,0 a 20 cm de diâmetro, alto valor de uniformidade dos grãos e dimensão máxima de 165 mm, o que também exige um beneficiamento de trituração em um moinho britador, por exemplo, antes de seu uso como agregado reciclado destinado à pavimentação.

Assim, conclui-se que a necessidade de beneficiamento e os prováveis maiores custos de extração e uso dos componentes minerados de RSU de aterros sanitários, quando comparados ao uso de componentes convencionais, devem ser considerados como parte da atividade de mineração de aterros sanitários e não apenas como maiores valores, frente aos fatos de que os RSU aterrados são materiais que ocupam espaço nos aterros sanitários, considerados atualmente como um passivo ambiental, e de que áreas para a implantação e operação de novos aterros sanitários têm sido cada vez mais escassas. Neste trabalho, por exemplo, os materiais plásticos, borracha e RCD representaram 27,919% da composição gravimétrica, em massa úmida, da amostra representativa escavada, contribuindo com 69,31 kg de uma amostra de 248,23 kg totais, isto é, refletindo em uma significativa recuperação de cerca de 125 mil toneladas de materiais, caso esse valor fosse extrapolado para o RSU aterrado em células anuais de cerca de 450 mil toneladas, com semelhante composição, no aterro sanitário de Campinas, permitindo assim recuperação de materiais e ampliação de espaço útil para rejeitos. Deste modo, a atividade de mineração de aterros sanitários deve ser avaliada além dos custos-benefícios convencionais, para uso dos materiais aterrados e

minerados, devendo também ser observada sob aspecto sustentável e potencial alternativa para minimizar os problemas ocasionados pela geração de RSU.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo 305508/2018-0) pelo auxílio pesquisa e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) (Processo 2019/01559-8) pelo auxílio pesquisa e concessão da bolsa de Mestrado (Processo 2020/03040-7), ao Consórcio Renova e à Prefeitura Municipal de Campinas pelo apoio à execução da pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pela bolsa de Doutorado e ao Serviço de Apoio ao Estudante (SAE/Unicamp) pelas bolsas de Iniciação Científica e SAE.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). “NBR 6502: Rochas e Solos-Terminologia”. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004a). “NBR 10004: Resíduos Sólidos Classificação”. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004b). “NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos”. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004c). “NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos”. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). “NBR 7181: Análise Granulométrica”. Versão Corrigida 2, 28.05.2018. Rio de Janeiro.
- AKBARIMEHR, S.; FAKHARIAN, K. (2021). “Dynamic shear modulus and damping ratio of clay mixed with waste rubber using cyclic triaxial apparatus”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 140, 106435. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106435>.
- BRASIL (2002). “Resolução CONAMA nº 307”, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasil.
- CARDOSO, R.; SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. (2016). “Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review”. *Waste Manag.*, 49, 131–145, doi:10.1016/j.wasman.2015.12.021.
- EU WFD. (2015). “Guidance document on the definition and classification of hazardous waste”. *European Union Waste Framework Directive*, EU. Disponível em: <<https://www.impel.eu/guidance-document-on-the-definition-and-classification-of-hazardous-waste-published-by-the-commission/>>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- FADHIL, S. H.; AL-SOUD M. S.; KUDADAD, R. M. (2021). “Enhancing the strength of clay-sand mixture by discrete waste plastic strips”. *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 24, n. 3, p. 381-391. [http://dx.doi.org/10.6180/jase.202106_24\(3\).0013](http://dx.doi.org/10.6180/jase.202106_24(3).0013)
- FEUERHARMEL, M. R. (2000). “Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno”. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- FOOSE, G. J.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. (1996). “Sand reinforced with wastes tires”. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, n. 9, p. 760-767.
- FUCALE, S. P.; PROENÇA, F. T. (2014). “Analysis of Physical and Mechanical Properties of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste for Paving Work”. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 19, p. 3797-3806.

- HULL, R. M.; KROGMANN, U.; STROM, P. F. (2005). "Composition and characteristics of excavated materials from a New Jersey landfill". *Journal of Environmental Engineering*, v. 131, p. 478–490.
- JAMSHIDI, R. et al. (2010). "Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 30, n. 6, p. 438–446.
- JIMÉNEZ, J.R.; AYUSO, J.; AGRELA, F.; LÓPEZ, M.; GALVÍN, A.P. (2012). "Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads". *Resour. Conserv. Recycl.* 58, 88–97, doi:10.1016/j.resconrec.2011.10.012
- KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. (2018). "What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050". Urban Development; Washington, DC: World Bank. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>>. Acesso em: 17 abr. 2021.
- KROOK, J.; SVENSSON, N.; EKLUND, M. (2012). "Landfill mining: A critical review of two decades of research". *Waste Management*, v. 32, p. 513–520.
- LEITE, F.D.C.; MOTTA, R.D.S.; VASCONCELOS, K.L.; BERNUCCI, L. (2011). "Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements". *Constr. Build. Mater.*, 25, 2972–2979, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105.
- LEME, M. A. G; TAKEDA, C. M.; SILVA, K. G.; SILVA, J. C. V.; MIGUEL, M. G. (2021). "Gravimetric characterization of Brazilian municipal solid waste mined from landfill for assessment of reuse potential". *Proceedings... 18th International Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling*. Proceedings SARDINIA 2021. © 2021 CISA Publisher. 11-15 October 2021, Cagliari, Italy.
- LI, C. (2005). "Mechanical response of fiber-reinforced soil". 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineering, Civil, Architectural, And Environmental Engineering, The University Of Texas At Austin, Austin, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2152/1781>>. Acesso em: 03 mar. 2021.
- LÓPEZ, C.G.; NI, A.; PARRODI, J.C.H.; KÜPPERS, B.; RAULF, K.; PRETZ, T. (2019). "Characterization of landfill mining material after ballistic separation to evaluate material and energy recovery potential". *Detritus*, v. 08, 5-23. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2019.13780>
- LTA – Land Transport & Authority. "Materials & workmanship specification for civil & structural works". Engineering Group Document, Singapore, p. 572, 2010, 2020. Disponível em: <https://www.lta.gov.sg/content/dam/ltagov/industry_innovations/industry_matters/development_construction_resources/civil_standards/pdf/EGD09104A2-Overall.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- PEDDAIAH, S.; BURMAN, A.; SREEDEEP, S. (2018). "Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement". *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 36, n. 5, p. 2907-2920. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0512-0>
- PMC – Prefeitura de Campinas (2012). "PGIRS – Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Campinas". Prefeitura Municipal de Campinas. Secretaria Municipal de Infraestrutura. Departamento de Limpeza Urbana. Campinas. Disponível em: <https://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/dlu/audiencias/plano_municipal_residuos_solidos.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- REIS, G.S.; QUATTRONE, M.; AMBRÓS, W.M.; CAZACLIU, B.G.; SAMAPIO, C.H. (2021). "Current Applications of Recycled Aggregates from Construction and Demolition: A Review". *Materials*, 14, 1700. <https://doi.org/10.3390/ma14071700>
- SALIMI, K.; GHAZAVI, M. (2019). "Soil reinforcement and slope stabilization using recycled waste plastic sheets". *Geomechanics and Geoengineering*, p. 1-12. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1683620>
- VAN DER ZEE, D. J.; ACHTERKAMP, M. C.; DE VISSER, B. J. (2004). "Assessing the market opportunities of landfill mining". *Waste Management*, v. 24, p. 795–804.