



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS DE CABOS ELÉTRICOS EM
APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

MARIANNA DIAS PRESOTI VICENTINI

JUIZ DE FORA

2026

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS DE CABOS ELÉTRICOS EM APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Juiz de Fora, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Geotecnia

Orientador (a): Júlia Righi de Almeida

Coorientador (a): Cátia de Paula Martins

JUIZ DE FORA

2026

REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS DE CABOS ELÉTRICOS EM APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS

MARIANNA DIAS PRESOTI VICENTINI

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 29 de maio de 2026

Por:

Documento assinado digitalmente
 JULIA RIGHI DE ALMEIDA
Data: 13/07/2026 12:03:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Júlia Righi de Almeida, D.Sc.. (Orientadora)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 CATIA DE PAULA MARTINS
Data: 14/07/2026 18:39:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Cátia de Paula Martins, D.Sc.. (Coorientadora)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 TATIANA TAVARES RODRIGUEZ
Data: 15/07/2026 11:38:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Tatiana Tavares Rodriguez, D.Sc.. (Examinadora 01)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 THIAGO WILLIAM DA CUNHA
Data: 13/07/2026 17:13:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Thiago William Cunha. (Examinador 02)

Empresa E-ambiental

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, aos anjos e santos que me cercam, e ao universo, que, em sua harmonia silenciosa, me colocou no lugar certo, na hora certa, guiando meus passos e entrelaçando caminhos para que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, que me ensinaram a voar alto e a amar os horizontes que conquisto e aqueles que ainda busco alcançar, mas, acima de tudo, me mostraram que posso sempre voltar ao horizonte mais seguro de todos, que é ao lado deles. À minha mãe, Glauce, meu escudo no visível e no invisível, presença que me envolve, me protege, me fortalece, mesmo quando não vejo, e nunca deixa de acreditar em mim. Ao meu pai, Lúcio, que transforma cuidado em caminho e amor em direção, sempre me lembrando de quem sou e de quem ainda posso ser. Tenho a certeza de que vocês desejam para mim mais do que desejam para si mesmos. Esta conquista não é só minha, é, acima de tudo, nossa.

Ao Thiago, hoje meu namorado, que me viu iniciar essa jornada quando ainda éramos mais jovens e o caminho parecia apenas um horizonte distante. Que escolheu permanecer, mesmo quando a estrada era incerta. Que foi abrigo nas tempestades e serenidade nos dias de dúvida. Que esteve presente não apenas nos momentos leves, mas, sobretudo, quando tudo parecia pesado demais. Dedico esta conquista ao nosso hoje e, principalmente, a tudo aquilo que ainda construiremos no nosso amanhã.

Aos meus familiares e àqueles que a vida transformou em família, agradeço pelo cuidado, pela presença, mesmo que distante, e pela torcida silenciosa que, ainda assim, fez barulho no meu coração e me sustentou em tantos momentos sem que eu percebesse.

Aos amigos que a vida colocou no mesmo caminho que o meu, obrigada por dividirem não só os passos, mas também os pesos e as levezas de cada etapa. Por transformarem as subidas em companhia, os desafios em aprendizado e as conquistas em memórias que levarei comigo. Que este caminho não se encerre aqui, mas se desdobre em muitos outros que ainda teremos a sorte de trilhar juntos.

Aos animais que fizeram e sempre farão parte da minha vida, alguns seguiram outros caminhos antes de mim, mas nunca deixaram de estar comigo. Hoje, mais do que nunca, sinto falta da presença deles aqui, dividindo este momento. Ainda assim, o amor que deixaram permaneceu, silencioso, fiel e constante, me sustentando em momentos que nem eu sabia que precisava. A ausência deles nunca foi vazio, mas presença transformada. Não se foram por

completo, apenas passaram a existir de outro jeito, mais leve, mas ainda profundamente presente. As marcas que deixaram em mim também constroem esta conquista.

Agradeço à persistência que, em silêncio, sustentou cada passo ao longo deste caminho. Não pela ausência de dúvidas, mas pela coragem de seguir mesmo quando o fim parecia distante demais para ser alcançado. Houve noites turbulentas, caminhos incertos e instantes em que a chegada se desenhava como algo quase inalcançável. Ainda assim, entre passos hesitantes e continuidades inesperadas, o caminho foi sendo trilhado. Hoje, ao olhar para trás, há uma surpresa serena em reconhecer a chegada. Este trabalho carrega tudo isso, não como um fim, mas como o reflexo de um percurso que, mesmo difícil, encontrou sua forma de acontecer.

E, por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo grande privilégio de ser aluna e pela oportunidade de conviver com professores que transformaram suas aulas em partes vivas da minha formação. Tomo este momento como uma despedida, mas não necessariamente permanente, pois a vida ainda pode me trazer de volta a este lugar que tanto me marcou. Levo comigo o sentimento de pertencimento a esta universidade, que hoje reconheço como casa, e ao curso de Engenharia Civil, que, a cada etapa, ajudou a construir não apenas minha trajetória, mas também quem me tornei.

RESUMO

O crescimento acelerado do consumo de equipamentos elétricos e eletrônicos tem impulsionado a geração destes resíduos em escala global, impondo desafios crescentes à destinação adequada da fração polimérica proveniente de cabos elétricos, material de baixo valor econômico e difícil reaproveitamento. No Brasil, esse cenário é agravado pelas limitações estruturais do sistema de gestão de resíduos, ainda que a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Decreto nº 10.240/2020 estabeleça diretrizes para a logística reversa de produtos eletroeletrônicos. Motivado por uma demanda real identificada pela empresa E-Ambiental, de Juiz de Fora, que acumula a fração plástica triturada resultante da separação de cabos elétricos, este trabalho teve como objetivo investigar o potencial de reaproveitamento geotécnico desse resíduo por meio de revisão bibliográfica e estudo experimental exploratório. A revisão bibliográfica evidenciou que o reaproveitamento de resíduos plásticos na engenharia civil é um tema de interesse mundial, com estudos em diferentes países com aplicações como reforço e estabilização de solos e produção de concreto e argamassa sustentável. De modo geral, os trabalhos indicaram que o comportamento das misturas é fortemente influenciado pelo tipo, formato e teor de resíduo incorporado. Para o estudo experimental preliminar, foi utilizado um solo residual coletado no campus da UFJF, ao qual foi incorporado 1% de resíduo plástico triturado. Foram realizados ensaios de granulometria no resíduo e de compactação Proctor e resistência à compressão simples para a mistura. A caracterização granulométrica revelou predominância de partículas na faixa de areia grossa e média e os ensaios de compactação indicaram alterações discretas em relação ao solo puro, com aumento da massa específica seca máxima, de 1,515 g/cm³ para 1,53 g/cm³, e do teor de umidade ótimo, de 27,0% para 25%, comportamento consistente com tendências da literatura. Por outro lado, os ensaios de resistência à compressão simples evidenciaram uma redução moderada, de 0,152 MPa para 0,111 MPa, correspondendo a uma queda de 27%, sendo coerente com muitos autores na literatura também. Os resultados obtidos indicam que, no teor e formato estudados, a incorporação do resíduo contribuiu para uma queda moderada da resistência mecânica do solo, evidenciando a necessidade de investigações complementares para avaliar outros teores, bem como sua combinação com agentes estabilizantes, a fim de identificar configurações tecnicamente mais favoráveis.

Palavras-chave: resíduo plástico; cabos elétricos; geotecnia; reaproveitamento de resíduos; logística reversa.

ABSTRACT

The rapid growth in the consumption of electrical and electronic equipment has driven the generation of this type of waste on a global scale, imposing increasing challenges to the proper disposal of the polymeric fraction derived from electrical cables, a material of low economic value and difficult to reuse. In Brazil, this scenario is aggravated by structural limitations of the waste management system, even though the National Solid Waste Policy and Decree No. 10,240/2020 establish guidelines for the reverse logistics of electronic products. Motivated by a real demand identified by the company E-Ambiental, from Juiz de Fora, which accumulates the shredded plastic fraction resulting from the separation of electrical cables, this study aimed to investigate the geotechnical reuse potential of this waste through a literature review and an exploratory experimental study. The literature review showed that the reuse of plastic waste in civil engineering is a topic of worldwide interest, with studies from different countries addressing applications such as soil reinforcement and stabilization and the production of sustainable concrete and mortar. In general, the studies indicated that the behavior of the mixtures is strongly influenced by the type, shape, and content of the incorporated waste. For the preliminary experimental study, a residual soil collected on the UFJF campus was used, into which 1% of shredded plastic waste was incorporated. Particle size distribution tests were performed on the waste, along with Proctor compaction and unconfined compressive strength tests on the mixture. The particle size characterization revealed a predominance of particles in the medium to coarse sand range, and the compaction tests indicated slight changes relative to the pure soil, with an increase in maximum dry density from 1.515 g/cm³ to 1.53 g/cm³, and a decrease in optimum moisture content from 27.0% to 25%, behavior consistent with trends found in the literature. On the other hand, the unconfined compressive strength tests showed a moderate reduction, from 0.152 MPa to 0.111 MPa, corresponding to a 27% decrease, which is also consistent with many authors in the literature. The results obtained indicate that, at the content and shape studied, the incorporation of the waste contributed to a moderate decrease in the soil's mechanical strength, highlighting the need for further investigations to evaluate other contents, as well as their combination with stabilizing agents, in order to identify technically more favorable configurations.

Keywords: plastic waste; electrical cables; geotechnics; waste reuse; reverse logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um cabo elétrico.....	16
Figura 2: Perfil de um solo residual.....	23
Figura 3: Resíduo plástico triturado dos cabos elétricos.....	31
Figura 4: Bombonas de armazenamento de solo.....	33
Figura 5: Preparação: (a) Solo em processo de secagem ao ar; (b) Destorroamento com mão de gral e almofariz.....	33
Figura 6: Mistura solo e resíduo.....	34
Figura 7: Resíduo retido em cada peneira.....	35
Figura 8: Corpo de prova da mistura solo-resíduo submetido ao ensaio de resistência à compressão simples.....	38
Figura 9: Países de origem dos estudos realizados.....	50
Figura 10: Gráfico comparativo em relação a densidade seca máxima da mistura solo-resíduo.....	53
Figura 11: Gráfico comparativo em relação a Resistência ao Cisalhamento da Mistura.....	56
Figura 12: Curva granulométrica do resíduo plástico e solo puro.....	58
Figura 13: Curva de compactação da mistura solo - resíduo plástico.....	60
Figura 14: Comparação das curvas de compactação do solo puro (Barletta, 2021) e da mistura solo - resíduo.....	60
Figura 15: Curvas de tensão de compressão por deformação axial específica dos corpos de prova da mistura solo-resíduo.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos países e objetivos dos trabalhos analisados.....	49
Quadro 2 – Resumo dos tipos de resíduos, formatos e porcentagem utilizadas nos trabalhos analisados.....	51
Quadro 3 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação trazidos nos trabalhos analisados.....	53
Quadro 4 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples trazidos nos trabalhos analisados.....	55
Quadro 5 – Resumo dos resultados dos três corpos de prova do solo.....	57
Quadro 6 – Resumo dos resultados dos dois corpos de prova da mistura solo-resíduo com CV<15%.....	62
Quadro 7 – Resumo dos resultados de Resistência à Compressão Simples.....	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio
CP	Corpo de Prova
Cu / Cc	Coeficientes de Uniformidade e Curvatura
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno Monômero
ISO	International Organization for Standardization
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade
NBR	Norma Brasileira
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Tereftalato de Polietileno
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PROINFRA	Pró-Reitoria de Infraestrutura
PVC	Policloreto de Vinila
RCS	Resistência à Compressão Simples
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Motivação e relevância da pesquisa.....	12
1.2. Objetivos.....	13
1.3. Estrutura do trabalho.....	13
2. RESÍDUO PLÁSTICO, PROBLEMÁTICA AMBIENTAL E GEOTECNIA.....	15
2.1. Resíduo Plástico de Cabos Elétricos.....	15
2.1.1. Definições.....	15
2.1.2. Funções Principais.....	15
2.1.3. Estrutura e composição.....	16
2.1.4. Aspectos ambientais e reciclagem.....	17
2.2. Problemática Ambiental dos Resíduos Eletrônicos e Plásticos.....	18
2.2.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	18
2.2.2. Problemas com descarte de equipamentos eletrônicos.....	19
2.2.3. O cenário do Brasil.....	20
2.3. Geotecnia.....	22
3. METODOLOGIA.....	28
3.1. Pesquisa bibliográfica.....	28
3.2. Pesquisa Experimental Exploratória.....	28
3.2.1. Materiais.....	29
3.2.1.1. Solo.....	29
3.2.1.2. Resíduo.....	30
3.2.1.3. Mistura.....	31
3.2.2. Ensaio laboratoriais.....	32
3.2.2.1. Preparação de Amostras.....	32
3.2.2.2. Ensaio de Granulometria.....	34
3.2.2.3. Ensaio de Compactação.....	35
3.2.2.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	38
4. PESQUISAS SOBRE O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	40
4.1. Reforço de solo.....	40
4.2. Estabilização de solo.....	44
4.3. Concreto / Argamassa Sustentável.....	47
4.4. Análise dos trabalhos estudados.....	48
5. RESULTADO DA PESQUISA EXPERIMENTAL.....	57
5.1. Caracterização Física.....	57
5.1.1. Solo.....	57
5.1.1.1. Ensaio de Resistência à Compressão Simples do solo.....	57
5.1.2. Resíduo Plástico.....	57
5.1.3. Mistura.....	59

5.1.3.1. Ensaio de Compactação.....	59
5.1.3.2. Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	62
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e relevância da pesquisa

O crescimento tecnológico acelerado das últimas décadas impulsionou o consumo de equipamentos elétricos e eletrônicos em grande escala por todo o mundo. Esse consumo gera consequências, pois resulta na produção crescente de resíduos, aumentando continuamente os volumes gerados e os desafios relacionados ao seu gerenciamento e destinação adequada (Baldé *et al.*, 2024).

Entre os componentes descartados, os cabos elétricos se destacam por sua ampla presença em instalações residenciais, industriais e veiculares, bem como pela sua composição, que reúne simultaneamente uma fração metálica, com um valor econômico considerável, e uma fração polimérica de difícil destinação. Essa dualidade confere aos resíduos de cabos um caráter ambientalmente desafiador, especialmente no que diz respeito à fração plástica, que, por apresentar baixo valor de mercado, e não ser reutilizada de forma abrangente, é descartada de maneira inadequada (Suresh; Mohanty; Nayak, 2017).

No Brasil, esse cenário é agravado por limitações estruturais no sistema de gestão de resíduos. Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabeleça diretrizes para a hierarquia de tratamento dos resíduos, priorizando a não geração, a reutilização, a reciclagem e o tratamento antes da disposição final, e o Decreto nº 10.240/2020 regulamente a logística reversa de produtos eletroeletrônicos, a implementação efetiva dessas políticas ainda enfrenta obstáculos consideráveis. A infraestrutura de coleta seletiva é insuficiente, a conscientização da população sobre o descarte correto é baixa e os incentivos econômicos para o reaproveitamento da fração polimérica são escassos, resultando em um sistema de gestão que, na prática, ainda não se encontra plenamente consolidado.

Diante desse cenário, a busca por alternativas técnicas capazes de conferir destinação ambientalmente adequada aos resíduos plásticos torna-se não apenas desejável, mas necessária. Com isso, muitos estudos em diversos países vêm sendo realizados e uma das possibilidades investigadas é a incorporação desses materiais na engenharia civil como um todo, mas especialmente em aplicações geotécnicas, campo no qual os resíduos plásticos têm demonstrado potencial como agentes de reforço de solos ou como forma de descarte segura

(Sai e Srinivas, 2019; Akshat Mehrotra *et al.*, 2014; Amena, 2022 e Suthar *et al.*, 2024). A incorporação de resíduos plásticos em matrizes de solo pode contribuir para a melhoria de propriedades mecânicas, como resistência ao cisalhamento e capacidade de suporte, além de representar uma alternativa sustentável ao descarte convencional, alinhada aos princípios da economia circular (Abukhettala; Fall, 2021; Amena, 2022; Bansal *et al.*, 2025).

A relevância da presente pesquisa exploratória decorre, portanto, da convergência entre uma demanda ambiental urgente, a destinação adequada dos resíduos plásticos oriundos de cabos elétricos, e uma oportunidade técnica, representada pela possibilidade de reaproveitamento desse material em obras de engenharia geotécnica, um tema de crescente interesse científico. O estudo é motivado, ainda, por uma demanda real identificada pela empresa E-Ambiental, com sede em Juiz de Fora (MG), que atua no gerenciamento de resíduos eletrônicos e que, diante do acúmulo da fração plástica triturada resultante do processo de separação dos cabos, contatou as professoras do departamento de Transportes e Geotecnia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Júlia Righi e Cátia Martins, orientadora e co-orientadora desta pesquisa, em busca de suporte técnico para investigar possibilidades de caracterização, avaliação e potencial de reaproveitamento desse material sob a perspectiva geotécnica e ambiental.

1.2. Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo geral investigar o potencial de reaproveitamento geotécnico do resíduo plástico proveniente da trituração do revestimento de cabos elétricos, disponibilizado pela empresa E-Ambiental. Para isso, adotou-se uma abordagem exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica e em um estudo experimental preliminar, com o propósito de avaliar a influência da incorporação desse resíduo nas propriedades de um solo residual.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos, incluindo esta Introdução, estruturados de forma a apresentar a fundamentação teórica, a metodologia adotada, os resultados obtidos e as considerações finais.

O Capítulo 2 apresenta o embasamento teórico abordando três eixos principais: a caracterização dos resíduos plásticos provenientes de cabos elétricos, a problemática ambiental envolvida e os conceitos fundamentais de Geotecnia.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, composta pelas etapas de pesquisa bibliográfica e pesquisa experimental exploratória.

No Capítulo 4 foram reunidas e analisadas as pesquisas identificadas na literatura científica sobre o aproveitamento de resíduos plásticos, tanto em diferentes aplicações na construção civil quanto especificamente na área de Geotecnia.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da pesquisa experimental exploratória, acompanhados de discussão e comparação com os dados do solo puro e da literatura.

Por fim, o Capítulo 6 apresentou as considerações finais do trabalho, sintetizando as principais conclusões e indicando sugestões para estudos futuros que possam aprofundar e ampliar os resultados obtidos.

2. RESÍDUO PLÁSTICO, PROBLEMÁTICA AMBIENTAL E GEOTECNIA

2.1. Resíduo Plástico de Cabos Elétricos

2.1.1. Definições

Com base na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004-1 (2024), o resíduo plástico é classificado de acordo com a sua periculosidade e potencial de impacto ao meio ambiente, sendo geralmente enquadrado como não Perigoso. Dependendo da sua estabilidade química, ele pode ser subdividido em Não Inerte e Inerte, quando, ao ser submetido a testes de solubilização, não libera constituintes que excedam os padrões de potabilidade da água (ABNT, 2024). No contexto de resíduos eletroeletrônicos, principalmente dos cabos elétricos, essa classificação é fundamental para determinar a viabilidade e segurança ambiental de sua reutilização, sendo muito importante entender a origem do resíduo.

De acordo com a ABNT NBR 5471 (1986), o cabo é definido como um conjunto de fios encordoados, isolados ou não entre si, podendo o conjunto ser isolado ou não. São normalmente constituídos por filamentos metálicos, em geral de cobre, envolvidos por camadas de materiais poliméricos isolantes. Tais camadas conferem isolamento elétrico, flexibilidade, proteção mecânica e resistência ao desgaste, características indispensáveis ao funcionamento seguro e eficiente dos dispositivos eletroeletrônicos.

2.1.2. Funções Principais

De acordo com a ABNT NBR 5471 (1986), os cabos elétricos exercem como funções principais a condução de corrente elétrica ou sinais por meio do condutor interno, a isolamento elétrica entre os elementos condutores e a proteção mecânica proporcionada pela cobertura externa. Esta última, geralmente constituída por materiais poliméricos, é responsável por conferir resistência ao desgaste, flexibilidade e proteção ao cabo, representando uma fração significativa do resíduo gerado após o descarte.

Os cabos elétricos são compostos por diferentes elementos, cada um com função específica. O condutor interno é responsável pela condução da corrente elétrica, enquanto a isolamento promove a separação elétrica e a segurança contra fugas de corrente. Externamente, a cobertura atua na proteção mecânica do conjunto, conferindo resistência ao desgaste, à umidade e à abrasão. Em alguns casos, o cabo pode ainda apresentar blindagem, destinada à

redução de interferências eletromagnéticas e à preservação da qualidade do sinal transmitido. (ABNT, 1986)

2.1.3. Estrutura e composição

Os cabos de equipamentos eletrônicos apresentam uma estrutura heterogênea composta, predominantemente, por um núcleo condutor de cobre, responsável pela transmissão de energia e dados, e por camadas isolantes formadas por materiais poliméricos, como o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno (PE). A camada externa, geralmente constituída por PVC, desempenha função de proteção mecânica e isolamento elétrico. Esses polímeros podem conter aditivos, como plastificantes, que aumentam a flexibilidade do material. Em termos de composição, os cabos são formados, em média, por 58,3% de cobre, 19,9% de PVC e 16% de polietileno, evidenciando o predomínio de materiais metálicos e poliméricos em sua constituição (Suresh; Mohanty; Nayak, 2017).

Segundo Wędrychowicz *et al.* (2023), a composição dos cabos elétricos apresentam uma composição estrutural formada, no mínimo, por duas camadas principais: um núcleo condutor metálico e uma camada de isolamento e/ou blindagem, assim como descrito por Suresh, Mohanty e Nayak (2017). Embora a configuração dos cabos varie conforme a aplicação, sua estrutura básica permanece semelhante, como mostra a Figura 1, podendo incluir ainda blindagens metálicas, capas externas de proteção, enchimentos internos e componentes auxiliares destinados a aumentar a durabilidade e a resistência mecânica.

Figura 1: Estrutura de um cabo elétrico



Fonte: Adaptado de Wędrychowicz *et al.* (2023)

Mais especificamente, os cabos de ignição, também presentes na mistura, segundo a norma ISO 3808 2002, seguem a estrutura geral dos cabos elétricos anteriormente citada. Mas, por serem condutores de alta tensão utilizados em veículos rodoviários e serem responsáveis por transmitir a energia elétrica da bobina de ignição até as velas, devem atender a requisitos específicos de desempenho, isolamento e resistência a condições operacionais. A norma estabelece que os materiais utilizados no revestimento dos cabos de ignição devem atender a rigorosos requisitos de desempenho, uma vez que operam sob condições severas de temperatura, tensão elétrica e exposição a agentes químicos. Devem ser constituídos por um núcleo condutor formado por cobre, ligas resistivas como níquel-cromo ou materiais à base de carbono, enquanto a isolação interna e o revestimento externo são predominantemente produzidos com elastômeros, como silicone e Etileno-Propileno-Dieno Monômero (EPDM), podendo também incluir polietileno clorado ou, em aplicações mais simples, PVC.

Diante dessa estrutura, os cabos elétricos geram resíduos que apresentam uma constituição heterogênea, reunindo simultaneamente uma fração metálica de alto valor econômico e uma fração polimérica complexa, cuja destinação adequada ainda representa um desafio importante (Wędrychowicz *et al.*, 2023).

2.1.4. Aspectos ambientais e reciclagem

No que se refere à problemática ambiental dos resíduos de cabos elétricos, Wędrychowicz *et al.* (2023) relacionam diretamente o aumento da geração ao crescimento da demanda energética, à expansão das redes de transmissão, ao avanço das tecnologias da informação e à substituição frequente de equipamentos e instalações elétricas.

O desenvolvimento econômico e urbano impulsiona a produção contínua de cabos, os quais, após um período relativamente curto de uso, tornam-se resíduos. Nesse cenário, enquanto os metais presentes nesses resíduos, especialmente cobre e alumínio, costumam ser recuperados com relativa eficiência, a fração polimérica do isolamento frequentemente é tratada como rejeito e encaminhada para aterros sanitários, agravando a pressão ambiental sobre esses sistemas de disposição final. Dessa forma, a questão ambiental dos cabos elétricos não está apenas relacionada ao volume crescente do resíduo, mas também à complexidade química dos materiais poliméricos e aos riscos associados à sua destinação incorreta. (Wędrychowicz *et al.*, 2023).

Em relação ao cenário da reciclagem, Wędrychowicz *et al.* (2023) demonstra que a reciclagem de cabos elétricos é um campo em expansão, porém cercado por dificuldades técnicas e operacionais. Segundo os autores, o processo normalmente se inicia com a desmontagem ou decapagem, permitindo a separação inicial entre o núcleo metálico e o revestimento polimérico. Em seguida, cabos de maiores dimensões passam por processos de trituração, britagem ou moagem. Após essa etapa, são aplicadas técnicas de separação física e físico-química, como separação gravimétrica e separação magnética. Apesar da diversidade de métodos disponíveis, a principal dificuldade da reciclagem está na mistura complexa de materiais presentes nos cabos, que combina metais, diversos tipos de polímeros, fibras e outros constituintes. Além disso, a eficiência da reciclagem depende fortemente do tamanho das partículas geradas após a moagem, uma vez que a granulometria influencia diretamente a qualidade da separação entre as frações metálica e não metálica.

2.2. Problemática Ambiental dos Resíduos Eletrônicos e Plásticos

2.2.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos

No Brasil, a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010) institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e representa um grande avanço para a regulamentação de gestão de resíduos no país, ao estabelecer princípios, diretrizes e instrumentos voltados à proteção da saúde pública e do meio ambiente. A lei contempla todas as etapas do ciclo de vida dos produtos, desde a geração até a destinação final dos resíduos, evidenciando uma abordagem que não os considera lixo e sim bens de valor econômico e social passíveis de reaproveitamento.

Em complemento a Lei nº 12.305/2010, no Brasil também está em vigor o Decreto nº 10.240/2020 (Brasil, 2010), que regulamenta a logística reversa obrigatória de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico no Brasil.

Um dos principais fundamentos da lei (Brasil, 2010) é a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que envolve desde fabricantes a consumidores e o poder público. Esse princípio estabelece a corresponsabilidade de todos os agentes nas diferentes etapas, desde a concepção e produção até o consumo e destinação final dos resíduos, atribuindo deveres específicos a cada um na minimização dos impactos ambientais causados. Nesse contexto e seguindo o objetivo deste trabalho, reforça-se a necessidade de implementação e ampliação de sistemas de logística reversa, de modo a promover o retorno

dos resíduos eletroeletrônicos ao ciclo produtivo, incentivando o reaproveitamento de materiais, a redução da geração de rejeitos e o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis.

A lei (Brasil, 2010) também demonstra a priorização no que diz respeito aos resíduos, seguindo a hierarquia de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Essa diretriz evidencia que a simples destinação em aterros sanitários deve ser a última alternativa, principalmente para resíduos eletroeletrônicos, sendo fundamental adotar estratégias que reduzam a quantidade de resíduos gerados e incentivem sua reinserção nos ciclos produtivos.

2.2.2. Problemas com descarte de equipamentos eletrônicos

O avanço tecnológico e a intensificação da digitalização têm provocado um crescimento expressivo na geração de resíduos eletrônicos (*e-waste*) em escala global. Equipamentos elétricos e eletrônicos, como celulares, computadores, eletrodomésticos e cabos, apresentam ciclos de vida cada vez mais curtos, o que acelera seu descarte (Baldé *et al.*, 2024).

Segundo Baldé *et al.* (2024) a problemática dos resíduos eletrônicos intensificou-se a partir da década de 2010, acompanhando o crescimento do consumo de equipamentos eletrônicos e o avanço tecnológico. Fatores como a obsolescência programada, a redução da vida útil dos produtos, a dificuldade de reparo e a expansão do acesso à tecnologia contribuem diretamente para o aumento da geração de resíduos. Estima-se que o mundo tenha gerado cerca de 62 bilhões de quilogramas de resíduos eletrônicos em 2022, valor significativamente superior ao registrado em 2010, que foi de 34 bilhões de quilogramas, evidenciando um crescimento contínuo e acelerado.

De acordo com o relatório produzido em parceria com o *United Nations Institute for Training and Research* e a *International Telecommunication Union* (Baldé *et al.*, 2024), apesar do aumento expressivo de 82% em 12 anos, a gestão adequada desses resíduos não acompanha o mesmo ritmo. Apenas 22% do total gerado é formalmente coletado e reciclado de maneira ambientalmente adequada, enquanto a maior parte é descartada de forma incorreta, seja em aterros comuns, lixões ou por meio de sistemas informais. Esse cenário evidencia uma falha estrutural nos sistemas de gerenciamento de resíduos, especialmente em países em desenvolvimento.

A complexidade dos resíduos eletrônicos está diretamente relacionada à sua composição. Em grande parte, os resíduos são formados por uma mistura heterogênea de materiais, que incluem na maior parcela metais e plásticos e outros materiais, como vidro e compostos minerais em menor parte. Essa diversidade de materiais dificulta os processos de reciclagem e influencia diretamente o valor econômico associado a cada fração (Wędrychowicz *et al.*, 2023).

Tanto Baldé *et al.* (2024), quanto Wędrychowicz *et al.* (2023) observam uma clara distinção entre os materiais quanto ao seu valor econômico. Os metais presentes nos resíduos eletrônicos possuem alto valor de mercado, destacando-se o cobre, o ferro e metais preciosos como ouro, que podem ser recuperados e reinseridos na cadeia produtiva, se tornando os principais alvos das atividades de reciclagem.

Por outro lado, os plásticos presentes nos resíduos eletrônicos possuem baixo valor econômico e, frequentemente, contêm substâncias tóxicas que dificultam sua reciclagem. Como consequência, esses materiais são pouco aproveitados e muitas vezes descartados de forma inadequada. Essa lógica é particularmente evidente no caso dos cabos elétricos, que possuem grande relevância na geração de resíduos. Esses componentes são constituídos principalmente por metais de alto valor, como o cobre, revestidos por materiais plásticos de baixo valor econômico, geralmente PVC (Wędrychowicz *et al.*, 2023).

2.2.3. O cenário do Brasil

No Brasil, a gestão de resíduos eletrônicos enfrenta desafios estruturais semelhantes aos observados em outros países de renda média. Apesar da existência da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece diretrizes para a gestão adequada e a implementação da logística reversa, sua aplicação ainda é limitada. A infraestrutura de coleta seletiva mostra-se insuficiente, havendo baixa cobertura de sistemas formais de reciclagem (Baldé *et al.*, 2024).

Estudos sobre a temática apontam um cenário convergente como o apresentado por Baldé *et al.* (2024), evidenciando um crescimento significativo na geração de resíduos eletrônicos, cuja destinação, no Brasil, ainda ocorre majoritariamente de forma inadequada. Segundo Monteiro *et al.* (2025), esses materiais são frequentemente descartados juntamente com resíduos recicláveis comuns ou até mesmo com o lixo doméstico, sendo posteriormente encaminhados para aterros sanitários. Esse tipo de descarte representa um risco expressivo ao

meio ambiente e à saúde pública, uma vez que os equipamentos eletrônicos contêm substâncias tóxicas capazes de contaminar o solo e a água, além de afetar organismos vivos.

Esse contexto evidencia outro fator relevante: a baixa conscientização da população quanto ao descarte adequado de resíduos eletrônicos. Monteiro *et al.* (2025) destacam que apenas 9% das residências realizam o descarte correto, enquanto uma parcela significativa dos equipamentos é armazenada nas próprias residências ou descartada junto ao lixo comum, dificultando sua coleta e posterior reciclagem.

Entre os principais entraves, destacam-se os elevados custos associados à logística reversa, a ineficiência nos processos de separação de materiais, a falta de transparência nas cadeias produtivas, as questões relacionadas à segurança de dados e a ausência de incentivos econômicos adequados (Monteiro *et al.*, 2025). Embora o Brasil possua um arcabouço legal relevante, como a Lei nº 12.305/2010 e o Decreto nº 10.240/2020, observa-se que o sistema de logística reversa ainda não se encontra plenamente consolidado.

Adicionalmente, destaca-se a atuação do setor informal, responsável por uma parcela significativa da coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos no país. Apesar de sua relevância, esse setor frequentemente opera de forma desarticulada em relação aos sistemas formais, o que pode comprometer a eficiência da gestão e intensificar impactos ambientais e sociais (Monteiro *et al.*, 2025).

Um ponto de partida promissor reside no potencial de valorização desses resíduos por meio de sua reinserção estratégica em cadeias produtivas. Nesse cenário, a construção civil consolida-se como um setor fundamental para a absorção desses materiais, mitigando o descarte inadequado e impulsionando a sustentabilidade setorial. Contudo, tal avanço técnico exige a articulação entre políticas públicas eficazes, desenvolvimento tecnológico e infraestrutura adequada, além da participação ativa da sociedade (Monteiro *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a Geotecnia apresenta potencial para o reaproveitamento de resíduos plásticos, especialmente em aplicações como camadas de pavimentação, reforço, melhoramento de solos e material de enchimento (aterros rodoviários, reaterros ou cavas) desde que atendidos critérios de desempenho mecânico e ambiental. A investigação desses materiais, quando incorporados a solos ou utilizados como materiais substitutos, justifica-se

pela possibilidade de reduzir impactos ambientais e desenvolver soluções tecnicamente viáveis e economicamente competitivas, alinhadas aos princípios da economia circular.

2.3. Geotecnia

A Geotecnia é uma área da engenharia que, desde sua origem, está associada à investigação das condições subsuperficiais e ao comportamento de solos e rochas. Sua atuação abrange projetos relacionados a fundações para diferentes tipos de obras, estudos de movimentação de terra, técnicas de estabilização e reforço de solos, controle de fluidos em estruturas como barragens, estradas e aterros, além de obras subterrâneas, como túneis e minas. A área também tem incorporado pesquisas voltadas ao uso de materiais alternativos em aplicações geotécnicas, seja para aprimorar o comportamento geomecânico de maciços terrosos, seja para promover formas ambientalmente adequadas de destinação desses materiais. Dessa forma, a Geotecnia configura-se como um campo multidisciplinar que integra conhecimentos da geologia, da mecânica das rochas e da mecânica dos solos, sendo esta última fundamental para a compreensão da formação, classificação e propriedades dos solos, aspectos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho (Zuquette, 2015).

Nesse contexto, torna-se necessário compreender o conceito de solo sob a ótica da engenharia geotécnica. Do ponto de vista técnico, o termo solo está associado aos materiais da crosta terrestre que servem de suporte e são amplamente utilizados em diversos tipos de obras de engenharia (Marangon, 2018).

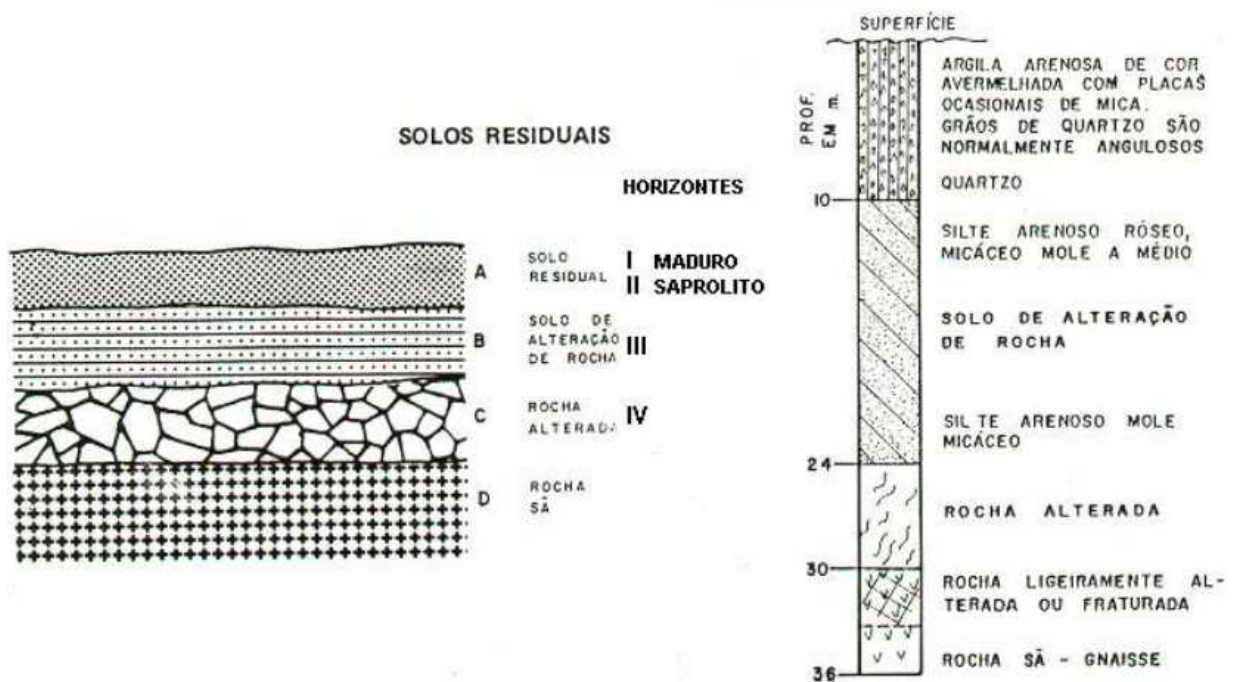
A formação dos solos, em geral, segue um mesmo processo, iniciando-se por ações físico-químicas atuando nas rochas até sua fragmentação e decomposição. Em seguida, pode ocorrer o transporte de parte do material pela gravidade ou por agentes naturais, como o vento, e, por fim, a evolução pedogenética (Marangon, 2018; Pinto, 2006).

Segundo Pinto (2006), na classificação geral dos solos, existem dois grandes grupos: os residuais e os sedimentares. Quando o solo, produto do processo de decomposição das rochas, permanece no próprio local, ele é denominado residual. Quando é transportado por algum agente natural, como enxurradas ou pela ação da gravidade, ele é classificado como solo transportado ou sedimentar.

Os solos residuais podem ser classificados conforme o grau de alteração da rocha de origem. O solo residual maduro é mais superficial e apresenta-se homogêneo, pois perdeu completamente a estrutura da rocha-mãe. Já o solo de alteração de rocha encontra-se em estágio avançado de desintegração, mas ainda mantém a estrutura original, sendo heterogêneo e podendo conter blocos de rocha parcialmente intactos. Por sua vez, o solo residual jovem preserva as características estruturais da rocha de origem, porém perdeu sua consistência, podendo se desagregar facilmente, apesar de ainda se assemelhar visualmente à rocha (Marangon, 2018; Pinto, 2006).

Segundo Marangon (2018), em relação às obras de engenharia, o solo residual apresenta maior previsibilidade de comportamento, uma vez que não sofre processos de transporte, reduzindo a ocorrência de misturas com materiais de diferentes origens. Dessa forma, seus horizontes apresentam uma organização em camadas como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Perfil de um solo residual



Fonte: Marangon (2018)

No contexto da utilização de solos em obras de engenharia, verifica-se que nem sempre os materiais disponíveis naturalmente apresentam propriedades geotécnicas adequadas às exigências de desempenho, segurança e durabilidade requeridas pelos projetos. Nesses casos, torna-se necessário o emprego de técnicas de melhoria do solo, como estabilização e reforço, capazes de modificar ou aprimorar suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas, viabilizando sua utilização em diferentes aplicações geotécnicas (Marangon, 2018; Pinto, 2006).

A estabilização de solos consiste em um conjunto de técnicas e tratamentos utilizados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, tornando-o adequado para aplicação em obras de engenharia, como pavimentação, aterros, barragens e fundações. Segundo Caputo (2015) e Bernucci *et al.* (2006), a estabilização corresponde a qualquer processo capaz de aumentar a estabilidade de um maciço terroso ou rochoso, tendo como principal objetivo elevar a resistência do solo por meio da alteração do ângulo de atrito interno, da coesão ou de ambos. Os autores destacam ainda que o comportamento do solo está diretamente relacionado a fatores como granulometria, compactidade e umidade, sendo a compactação um importante processo para melhorar características como resistência, permeabilidade e compressibilidade. Os métodos de estabilização podem ser classificados em estabilização mecânica, realizada pela correção granulométrica e compactação do solo, e estabilização por adição de aglutinantes, que utiliza materiais como cimento, cal e produtos betuminosos para aumentar a coesão e reduzir os efeitos da água sobre a resistência do material (Caputo, 2015; Bernucci et al, 2006).

Já o reforço de solo, consiste em uma técnica geotécnica empregada para aumentar a estabilidade e a capacidade resistente à tração de estruturas de terra, fundamentando-se na baixa resistência à tração apresentada pelos solos (Barnes; Tibana, 2016). Dessa forma, a incorporação de elementos resistentes à tração no interior da massa terrosa, geralmente dispostos horizontalmente, permite melhorar seu desempenho mecânico e promover maior estabilidade. A técnica evoluiu do uso de materiais fibrosos naturais para modernos reforços sintéticos (geossintéticos) e metálicos, sendo valorizada pela rapidez construtiva, flexibilidade de execução, capacidade de acomodar recalques e possibilidade de utilização de solos de menor qualidade (Palmeira, 2018; Barnes; Tibana, 2016). Os autores destacam, ainda, que essa técnica possui ampla aplicação em obras como estradas não pavimentadas, aterros

armados, taludes, encontros de pontes, plataformas viárias, devido à sua capacidade de aumentar a estabilidade, reduzir deformações e melhorar o desempenho mecânico de solos com baixa capacidade resistente.

Diante desse cenário, a incorporação de resíduos plásticos de cabo elétrico em misturas com solos para fins geotécnicos demanda uma avaliação criteriosa de suas propriedades, a fim de verificar se o material composto apresenta desempenho compatível com as exigências técnicas, mecânicas, hidráulicas, ambientais e executivas requeridas para sua aplicação segura e eficiente em obras de engenharia. Para essa verificação inicial, torna-se fundamental a realização de estudos exploratórios capazes de caracterizar tecnicamente os materiais envolvidos e analisar o comportamento preliminar da mistura proposta. Nesse sentido, destacam-se, como etapa exploratória e preliminar, os estudos de caracterização física e compactação do solo natural, resíduo plástico de cabo elétrico e da mistura solo-resíduo. Este último ensaio permite compreender a influência da incorporação do resíduo nos parâmetros de compactação que estão diretamente relacionados à estabilidade e ao desempenho dos materiais. Complementarmente, o ensaio de resistência à compressão simples mostra-se essencial para avaliar a capacidade de suporte e deformação do solo e da mistura, fornecendo indicativos iniciais sobre a viabilidade de aplicações geotécnicas. Assim, a análise conjunta desses ensaios constitui um suporte técnico para a investigação do potencial de reaproveitamento de resíduos plásticos de cabos elétricos em aplicações geotécnicas.

A caracterização física envolve a realização dos ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de consistência do solo natural e do resíduo plástico. A análise granulométrica está diretamente relacionada ao entendimento da distribuição das partículas em função de seus tamanhos, permitindo a classificação e melhor compreensão do comportamento do material. Já a densidade real dos grãos corresponde à relação entre a massa e o volume dos sólidos que compõem o material, sendo um importante parâmetro físico obtido em laboratório, geralmente por meio do ensaio com picnômetro, e utilizado em diversos cálculos geotécnicos. Por sua vez, os limites de consistência, também conhecidos como limites de Atterberg, definem os teores de umidade nos quais o solo muda de estado físico, passando do estado líquido para o plástico e, posteriormente, para o estado semissólido, sendo fundamentais para a avaliação da plasticidade, da compressibilidade e do comportamento mecânico dos solos finos (Pinto, 2006)

O ensaio de granulometria é um dos principais ensaios de caracterização física, uma vez que a distribuição granulométrica influencia diretamente diversas propriedades geotécnicas do material. É regulamentado pela ABNT NBR 7181 (2018), que estabelece que pode ser dividido em dois processos principais: peneiramento e sedimentação, sendo o primeiro aplicado às partículas de maior dimensão como areias e pedregulhos e o segundo às partículas mais finas, siltes e argilas. De acordo com Caputo (2015), a partir dos resultados obtidos, constrói-se a curva granulométrica, que relaciona o diâmetro das partículas ao percentual passante, permitindo determinar parâmetros como diâmetros característicos, coeficientes de uniformidade e curvatura, além de avaliar as frações finas e grossas e a classificação do solo quanto à graduação. Essas características influenciam diretamente o comportamento do material, afetando propriedades como permeabilidade, resistência ao cisalhamento, compressibilidade e capacidade de compactação (Caputo, 2015). No que se refere aos ensaios de densidade real dos grãos e aos limites de consistência, compreendendo os limites de liquidez e de plasticidade, estes são regulamentados pelas normas ABNT NBR 6508:2025, ABNT NBR 6459:2025 e ABNT NBR 7180:2025, respectivamente.

Como aborda Pinto (2006), a compactação é empregada em diversas obras de engenharia, como na execução de aterros. O processo de compactação de solos visa a sua densificação, e o método a ser adotado depende diretamente do tipo de obra, do solo utilizado e do objetivo pretendido, como a redução de recalques, o aumento da resistência do solo, entre outros.

Diante dessas necessidades de avaliação, destaca-se o ensaio de compactação. Essa técnica foi consolidada a partir de estudos do engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de solos, demonstrando que, ao se aplicar uma determinada energia de compactação, a massa específica obtida passa a depender da umidade do solo. O ensaio é regulamentado pela norma ABNT NBR 7182 (2025). Os resultados desse ensaio incluem a obtenção da curva de compactação, que relaciona o teor de umidade com a massa específica seca. A partir dessa curva, é possível determinar parâmetros fundamentais, como o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima do solo ou da mistura analisada (Pinto, 2006).

Segundo Caputo (2015), a resistência dos solos está diretamente associada à sua capacidade de suportar tensões cisalhantes sem sofrer ruptura, sendo o ensaio de resistência à

compressão simples (RCS) empregado para determinar a tensão axial máxima suportada por um corpo de prova submetido a carregamento axial crescente, sem confinamento lateral, até a ocorrência da ruptura. No caso de solos compactados, a RCS resulta da interação entre massa específica seca, índice de vazios, teor de umidade, composição granulométrica, mineralogia e estrutura interna decorrente do processo de compactação, incluindo a orientação e o arranjo das partículas, sendo esses fatores importantes para a compreensão do comportamento geotécnico sob carregamento axial (Pinto, 2006; Caputo 2015). No Brasil, o ensaio é regulamentado pela norma da ABNT NBR 12770 (2022), que estabelece os procedimentos para preparação da amostra, execução do ensaio e interpretação dos resultados. A partir dos resultados obtidos, é possível estimar a resistência à compressão não confinada e o módulo de elasticidade inicial, permitindo avaliar o comportamento do material ensaiado, seja em sua condição pura ou composto, em caso da adição de resíduos.

3. METODOLOGIA

3.1. Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi conduzida de forma sistemática, com base em consultas à plataforma Web of Science, ao acervo físico e digital da Biblioteca da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e a periódicos científicos indexados. Foram também consultados livros técnicos de mecânica dos solos e geotecnia, legislações brasileiras pertinentes à gestão de resíduos sólidos e normas técnicas nacionais e internacionais relacionadas ao tema. Não foi estabelecido filtro de recorte temporal, de modo a contemplar tanto produções científicas consolidadas quanto publicações recentes sobre o aproveitamento de resíduos plásticos provenientes de cabos elétricos e eletrônicos em aplicações geotécnicas.

As buscas foram realizadas por meio de combinações de termos da língua portuguesa e inglesa, estruturados em torno de três eixos temáticos principais. O primeiro associou os termos relativos aos resíduos de cabos e isolamentos plásticos como, “*cable plastic waste*” e “*wire insulation plastic*”, a termos de destinação, como “*recycling*” e “*reuse*”, combinados com “*soil*” e “*soil stabilization*”. O segundo eixo ampliou o escopo para resíduos eletrônicos, incorporando o termo “*e-waste plastic*”, cruzado com termos geotécnicos como “*geotechnical*”, “*soil reinforcement*” e “*soil stabilization*”. O terceiro eixo abrangeu variações mais amplas dos resíduos plásticos de cabos, incluindo “*cable insulation*”, “*PVC cable*” e “*plastic cable waste*”, associadas a termos como “*soil mixture*”, “*soil reinforcement*” e “*soil stabilization*”. Em todos os eixos, os descritores foram combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR, de forma a ampliar a abrangência dos resultados sem perder a especificidade temática.

3.2. Pesquisa Experimental Exploratória

O estudo experimental deste trabalho teve como objetivo analisar, em caráter exploratório e preliminar, a influência da adição de resíduos plásticos granulares provenientes de cabos elétricos, obtidos por processos de trituração e moagem, nos parâmetros de compactação e resistência de um solo residual. Por meio de ensaios laboratoriais, buscou-se comparar o desempenho da mistura com o comportamento do solo puro, visando quantificar as alterações em propriedades geotécnicas selecionadas. Essa análise comparativa permite avaliar se a incorporação do resíduo plástico contribui para o reforço ou estabilização do

material, se acarreta prejuízos ao seu desempenho geotécnico ou se apresenta efeito tecnicamente pouco significativo, fornecendo indicativos iniciais sobre a viabilidade dessa prática como alternativa para a destinação sustentável do resíduo.

3.2.1. Materiais

3.2.1.1. Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora, em um talude localizado nas proximidades da Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFRA). Após a coleta, o solo foi acondicionado em recipientes do tipo bombona e armazenado na sala de preparação de amostras.

Trata-se de um solo residual previamente investigado em pesquisas anteriores, como as desenvolvidas por Cândido (2023) e Barletta (2021), cujos resultados de caracterização foram adotados como base técnica para o presente estudo. Essas informações, apresentadas na sequência, subsidiam a compreensão das características físicas e químicas, bem como dos parâmetros de compactação do solo estudado, além de possibilitar análises comparativas quanto aos efeitos da incorporação de resíduo plástico. Ressalta-se, ainda, que a coleta foi realizada no mesmo local estudado pelos autores, fator que contribui para maior confiabilidade e coerência das comparações realizadas.

Segundo Barletta (2021), o solo apresenta predominância da fração fina, conforme indicado pela análise granulométrica realizada de acordo com a ABNT NBR 7181 (2018). Os resultados mostraram que 57,1% do material corresponde à fração argila, 8,4% à fração silte e 33,6% à fração areia (sendo 15,6% de areia fina, 13,9% média e 4,1% grossa), além de 0,9% de pedregulho, caracterizando-o como um solo argiloso. Já a massa específica dos grãos, determinada por meio do ensaio do Picnômetro (ABNT NBR 6458:2025), foi de 2,81 g/cm³.

Ainda conforme Barletta (2021), em relação aos limites de consistência, o solo apresenta limite de plasticidade de 29% pelo método do gabarito cilíndrico (ABNT NBR 7180:2025) e limite de liquidez de 52% pelo método de Casagrande (ABNT NBR 6459:2025), evidenciando o comportamento plástico.

Já a caracterização química do solo, de acordo com Cândido (2023), indicou predominância de óxido de alumínio (43,5%), seguido por óxido de ferro (26,5%) e óxido de

silício (25,2%). Em relação à composição mineralógica, observaram-se picos predominantes de caulinita, quartzo e feldspato, além da presença de ilita e mica.

No que diz respeito aos resultados do ensaio de compactação, no cilindro Proctor e na energia normal, estes indicaram massa específica seca máxima de 1,515 g/cm³, associada a uma umidade ótima de 27% (Barletta, 2021). Em sequência, o ensaio de resistência à compressão simples foi realizado nesse estudo para seguir com as comparações necessárias.

Dessa forma, os resultados apresentados nesse trabalho em conjunto com os de Barletta (2021) e Cândido (2023) constituem uma base sólida para agregar no desenvolvimento deste trabalho, permitindo avaliar, de forma comparativa, as alterações nas propriedades do solo decorrentes da incorporação do resíduo plástico proveniente de cabos elétricos e realizar ensaios complementares.

3.2.1.2. Resíduo

O resíduo plástico utilizado na presente pesquisa é proveniente de cabos elétricos. Esse material foi destinado à Universidade Federal de Juiz de Fora pela empresa E-Ambiental, com sede em Juiz de Fora, Minas Gerais. A empresa tem como objetivo o gerenciamento de resíduos eletrônicos, seguindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos e promovendo a destinação ambientalmente adequada desses materiais. Segundo dados fornecidos pelos responsáveis da E-ambiental, semanalmente chegam na empresa uma média de 6 toneladas de fios para serem trabalhados, sendo 70% resíduo plástico e 30% de resíduo de cobre.

Diante do acúmulo desse resíduo, a empresa entrou em contato com as professoras do Departamento de Transportes e Geotecnia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Júlia Righi e Cátia Martins, orientadora e co-orientadora desta pesquisa, com o objetivo de buscar suporte técnico para investigar possibilidades de caracterização, avaliação e potencial de reaproveitamento desse material sob a perspectiva geotécnica e ambiental. Por se tratar de uma empresa alinhada às diretrizes ambientais, busca-se uma solução que não agride o meio ambiente e que esteja em conformidade com as normas vigentes.

No processo realizado pela empresa, ocorre a separação dos resíduos eletrônicos, com a retirada da fração metálica da fração plástica. A parte metálica, por apresentar maior valor

agregado, é comercializada, enquanto a fração plástica é triturada, originando um material granular com diâmetros reduzidos como mostrado na Figura 3 (E-ambiental, s.d.) .

Figura 3: Resíduo plástico triturado dos cabos elétricos



Fonte: Autora, 2026

3.2.1.3. Mistura

A definição da proporção da mistura solo–resíduo foi realizada com base nas características previamente determinadas para o solo puro por Cândido (2023) e Barletta (2021), os ensaios complementares realizados nesse estudo, bem como em referências da literatura científica. Assim, para fins exploratórios, optou-se pela adoção de um teor inicial de 1% de resíduo em relação à massa seca da mistura solo-resíduo.

A escolha desse valor foi fundamentada em revisão bibliográfica de estudos semelhantes que investigaram a adição de resíduos plásticos em matrizes de solo, nos quais foram avaliados diferentes teores de incorporação. Sai e Srinivas (2019) indicam que baixos teores, geralmente entre 0,5% e 2%, já são suficientes para promover alterações nas propriedades físicas e mecânicas do solo. O cálculo para obtenção da massa de resíduo a ser adicionada foi realizado com base na relação entre a massa seca do solo e o teor de incorporação adotado, como mostra a Equação 1.

$$M_R = 1\% * M_S \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

M_S - Massa seca da mistura solo-resíduo;

M_R - Massa de resíduo seco;

Nesse contexto, o teor de 1% foi considerado adequado por representar um valor intermediário, capaz de proporcionar uma avaliação inicial dos efeitos da adição do resíduo no comportamento do solo quanto à compactação e resistência à compressão simples, sem promover substituição significativa da massa de solo.

Cabe destacar que essa escolha confere à pesquisa caráter exploratório, servindo como base para estudos futuros que avaliem diferentes teores de resíduo e aprofundem a análise do comportamento da mistura, visando à identificação de proporções de incorporação mais adequadas. Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para a compreensão preliminar do comportamento da mistura solo-resíduo em comparação ao solo puro.

3.2.2. Ensaios laboratoriais

Os ensaios deste trabalho foram realizados utilizando o solo, o resíduo plástico triturado e a mistura solo-resíduo, além de utilizar os resultados dos parâmetros de compactação do solo puro determinados por Barletta (2021). Diante disso, procedeu-se o ensaio de resistência à compressão simples do solo puro, a determinação da distribuição granulométrica do resíduo e a execução dos ensaios com a mistura de solo acrescida de 1% de resíduo, com o objetivo de determinar os parâmetros de compactação e a resistência à compressão simples da mistura, permitindo a obtenção de resultados para comparação com os valores do solo puro.

3.2.2.1. Preparação de Amostras

No preparo de amostras, para prosseguir com os ensaios, foi utilizado o solo já coletado, com origem no talude próximo à PROINFRA, na Universidade Federal de Juiz de

Fora. O material coletado foi armazenado em bombonas fechadas, como mostrado na Figura 4. Após isso, foi seco ao ar para seguir com o processo de preparação, como mostrado na Figura 5 (a).

O preparo foi iniciado com o destorroamento do solo de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 6457 (2024), utilizando o almofariz e a mão de gral, mostrado na Figura 5 (b). O solo destorroado também foi armazenado em bombonas.

Figura 4: Bombonas de armazenamento de solo



Fonte: Autora, 2026

Figura 5: Preparação: (a) Solo em processo de secagem ao ar; (b) Destorroamento com mão de gral e almofariz



Fonte: Autora, 2026

Deu-se seguimento à determinação da umidade higroscópica, inicialmente, para separar as amostras destinadas ao ensaio de resistência à compressão simples do solo puro. Paralelamente, realizou-se a preparação da mistura de solo e resíduo que seria utilizada nos

demais ensaios experimentais. Para isso, determinou-se a massa de resíduo a ser incorporada, correspondente a 1% da massa seca do solo, conforme descrito no subtópico 3.2.1.3. Com a umidade higroscópica previamente conhecida e a proporção de resíduo estabelecida, foi possível realizar a homogeneização da mistura, garantindo sua adequada preparação para os ensaios subsequentes. A Figura 6 apresenta o aspecto visual da mistura de solo e resíduo após a homogeneização.

Figura 6: Mistura solo e resíduo



Fonte: Autora, 2026

3.2.2.2. Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria do resíduo foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 7181 (2018), por meio do processo de peneiramento, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas padronizadas, dispostas em ordem decrescente de diâmetro, compreendendo as seguintes malhas: 4,8 mm (peneira nº 4), 2,0 mm (peneira nº 10), 1,18 mm (peneira nº 16), 0,85 mm (peneira nº 20), 0,60 mm (peneira nº 30), 0,425 mm (peneira nº 40), 0,30 mm (peneira nº 50), 0,15 mm (peneira nº 100) e 0,075 mm (peneira nº 200).

Após o peneiramento mecânico, procedeu-se à pesagem do material retido em cada peneira, como mostra a Figura 7, permitindo a determinação das massas retidas simples e acumuladas, bem como o cálculo das porcentagens retidas e passantes. A partir desses dados, foi possível traçar a curva granulométrica do resíduo.

Figura 7: Resíduo retido em cada peneira



Fonte: Autora, 2026

Para compatibilizar os resultados com a escala granulométrica da ABNT NBR 6502, identificaram-se as frações de cada abertura de peneira utilizada, permitindo associar os percentuais passantes de resíduo plástico às frações de argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e pedregulho. A partir da curva obtida, foram determinados por interpolação logarítmica os diâmetros correspondentes a D10, D30 e D60 os resultados foram, respectivamente, 0,235 mm, 0,499 mm e 0,740 mm. Com esses valores, calcularam-se o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de graduação, como mostrado na Equação 2 e 3.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Equação 2})$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (\text{Equação 3})$$

3.2.2.3. Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7182 (2025) que tem como objetivo determinar a relação entre a massa específica aparente seca ($\rho d_{m\acute{a}x}$) e

o teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$) de um solo compactado a uma determinada energia. Neste trabalho, a mistura de solo com resíduo plástico proveniente de cabos elétricos foi compactada em cilindro Proctor sob energia normal, cuja escolha se fundamenta em sua ampla aplicação na prática geotécnica e nas referências científicas que serviram de base para esta pesquisa.

Como já se tinham os valores do teor de umidade ótimo do solo puro, igual a 27%, de acordo com Barletta (2021), optou-se por usar esse dado como referência para estimar os demais teores de umidade para o ensaio. Assim, cinco teores de umidade foram definidos para a moldagem de cinco corpos de prova, com o objetivo de elaborar a curva de compactação. Cada teor foi estabelecido com incremento de 2% em relação ao anterior, sendo o teor de umidade ótimo posicionado entre os pontos intermediários, aproximadamente 1% acima e 1% abaixo dos valores de w_3 e w_4 , respectivamente.

Para a moldagem de cada corpo de prova, foram utilizados 3 kg de solo seco ao ar, previamente preparado conforme os procedimentos de amostragem e preparação estabelecidos. Inicialmente, determinou-se a umidade higroscópica do material pelo método da estufa, de acordo com a ABNT NBR 6457 (2024). Esse procedimento foi necessário para quantificar a quantidade de água naturalmente retida nas partículas de solo devido às condições ambientais, permitindo, assim, a determinação da umidade inicial do solo puro e servindo como base para os cálculos posteriores de adição de água.

Após a definição dos teores de umidade a serem empregados em cada mistura, realizaram-se os cálculos necessários para a preparação dos corpos de prova. Foram determinadas a massa seca do solo, por meio da Equação 4, e a massa de água a ser adicionada, calculada pela Equação 5, considerando tanto o teor de umidade higroscópico previamente obtido quanto o teor de umidade estabelecido para cada ponto de ensaio. Além disso, calculou-se a massa de resíduo a ser incorporada à mistura, utilizando a Equação 1, sendo esta correspondente a 1% da massa seca da mistura solo-resíduo.

$$M_s = \frac{M_{solo}}{(1+w_f)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\Delta M_w = (w_i - w_f) * M_s \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

M_s - Massa seca da mistura solo-resíduo;

M_{solo} - Massa total do solo seco ao ar ;

w_f - Teor de umidade final (estimado);

w_i - Teor de umidade inicial (determinado);

ΔM_w - Massa de água que deve ser acrescentada ao solo seco ao ar;

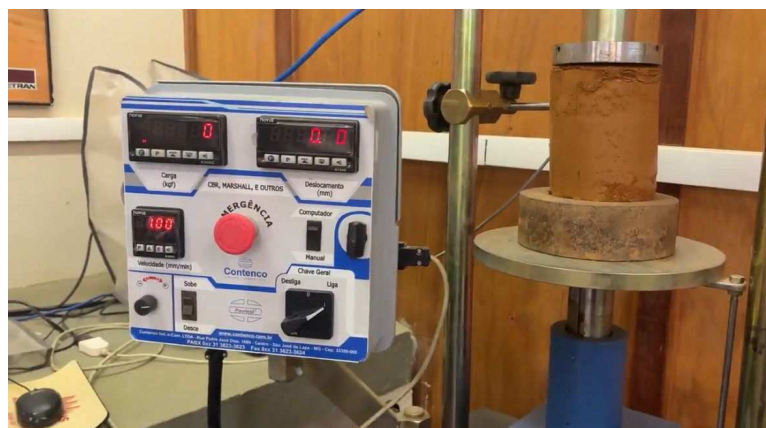
Após a realização dos cálculos para cada corpo de prova, foi feita a homogeneização dos materiais e a execução do ensaio de compactação da mistura solo-resíduo. Ao final da compactação, foram determinados os pares de valores de massa específica aparente seca e teor de umidade para cada corpo de prova, possibilitando a construção da curva de compactação por meio do método do Excel, utilizando uma polinomial. A partir dela, foram determinados os parâmetros de compactação, massa específica aparente seca máxima ($\rho d_{máx}$) e o teor de umidade ótimo ($w_{ótimo}$). A fim de garantir uma melhor definição da curva tanto no ramo seco quanto no ramo úmido foram ensaiados nove pontos experimentais.

3.2.2.4. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado tanto para o solo puro quanto para a mistura solo-resíduo, com o objetivo de comparar os resultados obtidos e avaliar a influência da incorporação do resíduo no comportamento mecânico do material. Para ambos os materiais, o procedimento experimental adotado foi o mesmo, garantindo a comparabilidade dos resultados.

Após a obtenção dos parâmetros de compactação da mistura solo-resíduo, massa específica aparente seca máxima ($\rho d_{máx}$) e o teor de umidade ótimo ($w_{ótimo}$), iniciou-se a preparação das amostras para os ensaios de resistência à compressão simples seguindo a norma ABNT NBR 12770 (2022). Para a realização dos ensaios, foram preparados três corpos de prova tanto com o solo quando da mistura solo-resíduo. Nesse procedimento, utilizaram-se amostras de solo seco ao ar com massa total de 3 kg, previamente homogeneizadas na umidade ótima ($w_{ótimo}$) obtida no ensaio de compactação. Em seguida, procedeu-se com a compactação das amostras no cilindro Proctor (10,15 x 12,30), na energia normal. Ao final de cada compactação, foi feita a extração do corpo de prova do cilindro, para ser levado à ruptura na prensa de resistência à compressão simples, programada com velocidade igual a 1 mm/min. A partir dos dados obtidos foi possível calcular a deformação axial e a tensão e traçar as curvas para a obtenção dos valores de resistência à compressão simples. A Figura 8 mostra um corpo de prova (CP) da mistura submetido ao referido ensaio.

Figura 8: Corpo de prova da mistura solo-resíduo submetido ao ensaio de resistência à compressão simples



Fonte: Autora, 2026

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{H_0} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo:

ε_a - Deformação axial (%);

σ - Tensão axial (MPa) ;

Δh - Deslocamento (mm);

H_0 - Altura inicial (mm);

P - Carga (Kgf);

A - Área corpo de prova;

4. PESQUISAS SOBRE O APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

A investigação de pesquisas em escala global revela que a busca por soluções para a retirada de resíduos plásticos do meio ambiente e sua reintegração técnica consolidou-se como prioridade estratégica em diversos países. Embora o aproveitamento desses resíduos seja amplamente explorado na construção civil de modo geral, sua aplicação na engenharia geotécnica ocorre de forma mais específica. Nesse campo, o plástico é incorporado aos solos tanto como elemento de reforço e/ou estabilização mecânica quanto como uma alternativa de descarte controlado, visando mitigar danos ambientais e promover o reaproveitamento sustentável de materiais (Abukhettala; Fall, 2021; Amena, 2022; Bansal *et al.*, 2025; Erdağ *et al.*, 2022; Georgei *et al.*, 2026; Hasan *et al.*, 2025; Khalid; Alshawmar, 2024; Obianyo *et al.*, 2024; Roustaei *et al.*, 2022; Sai; Srinivas, 2019; Suthar *et al.*, 2024; Vidales-Barriguete *et al.*, 2026).

A seguir serão apresentados trabalhos encontrados a partir de buscas em bases científicas relacionadas ao tema de reaproveitamento de resíduos plásticos na engenharia civil como um todo, mas com ênfase na engenharia geotécnica. Os artigos foram organizados em três grupos: reforço de solo, estabilização de solo e concreto/argamassa sustentável. De modo geral, apresenta-se um resumo de cada trabalho, contemplando objetivo, material utilizado, porcentagens empregadas e uma visão geral dos resultados obtidos por cada autor.

4.1. Reforço de solo

Os autores Suthar *et al.* (2024) desenvolveram, na Índia, um estudo com foco na utilização de resíduos de garrafas de tereftalato de polietileno (PET) como reforço em solos arenosos de baixa qualidade, com o objetivo principal de avaliar a melhoria das propriedades mecânicas do solo e sua aplicabilidade em obras geotécnicas e rodoviárias sustentáveis. Os autores investigaram compósitos de solo arenoso com diferentes teores de PET triturado (5%, 10% e 15%), realizando ensaios laboratoriais como compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e cisalhamento direto. Os resultados mostraram que a adição de PET altera significativamente o comportamento do solo, como nos parâmetros da compactação, em que a densidade seca máxima e o teor de umidade diminuem à medida que aumenta o teor de plástico, tornando o material mais leve. O valor de CBR apresentou melhora até cerca de 10% de PET, atingindo a melhor performance nessa dosagem, mas reduziu quando o teor foi maior

(15%). No ensaio de cisalhamento, observou-se aumento do ângulo de atrito em teores intermediários, seguido de redução desse parâmetro em excesso de PET, devido à baixa coesão e à superfície lisa do plástico. De forma geral, o estudo conclui que o uso de PET triturado pode ser uma alternativa sustentável para melhoria de solos, com desempenho ótimo em torno de 10% de substituição, contribuindo tanto para o aumento da resistência quanto para a redução de resíduos plásticos no meio ambiente.

Já os autores Erdağ *et al.* (2022) realizaram um estudo na Turquia, com o objetivo principal de avaliar o comportamento de resistência e deformação de um solo utilizado como subleito de pavimentos quando reforçado com resíduos plásticos de polietileno de baixa densidade (LDPE), visando sua reutilização sustentável e melhoria das propriedades geotécnicas. Os autores investigaram o efeito da adição de tiras de LDPE em diferentes geometrias (15×15 mm e 15×30 mm) e teores (0,3%, 0,5% e 0,7%) em um solo de subleito. Foram realizados ensaios de engenharia, incluindo compactação e CBR, tanto em condições secas quanto saturadas. Os resultados mostraram que o comportamento do solo reforçado depende diretamente do teor de plástico e do tipo de reforço utilizado. O valor de CBR atingiu seu máximo com 0,7% de LDPE, indicando maior capacidade de suporte. No entanto, a densidade seca máxima foi obtida com 0,5% de plástico, sendo este considerado o teor mais adequado, pois acima disso há perda de densidade e eficiência de compactação. De forma geral, o estudo conclui que o uso de pequenas quantidades de LDPE melhora o desempenho do solo.

Da mesma forma, Roustaei *et al.* (2022) desenvolveram um estudo no Irã, na região de Abyek, com o objetivo principal de avaliar o efeito de resíduos de PET, em forma de tiras e elementos em “I”, na resistência à compressão simples e na resistência à tração de um solo argiloso, com teor de 1% em relação ao peso seco do solo. As amostras foram compactadas na umidade ótima e submetidas a ensaios de compressão simples e tração indireta. Os resultados mostraram que a adição de PET melhora significativamente o comportamento mecânico do solo. Os resultados, do ensaio de compressão simples, aumentaram com o acréscimo de PET até teores ótimos (0,6% a 0,8%), chegando a aumentos de até aproximadamente 117%, dependendo da geometria das tiras. Acima desses teores, a resistência começou a diminuir devido ao excesso de material plástico, que prejudica a continuidade da matriz do solo. Também foi observado que existe um comprimento ótimo das tiras (cerca de 18 mm), acima

do qual o desempenho não melhora. Na resistência à tração, os ganhos também foram expressivos, com aumento máximo de cerca de 80% a 81%, sendo os melhores resultados obtidos em teores próximos de 0,6%. Além disso, os elementos de PET em formato “T” apresentaram desempenho superior às tiras convencionais, devido ao maior atrito e interação com o solo.

Seguindo o mesmo caminho, Amena (2022), desenvolveu estudo na Etiópia, onde foi investigado o uso de resíduos plásticos como reforço para solos expansivos aplicados em camadas de subleito de pavimentos. O objetivo do trabalho foi melhorar as propriedades geotécnicas do solo, como resistência, capacidade de suporte e redução da expansão, além de propor uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos plásticos. Para isso, foram utilizadas tiras de resíduo provenientes principalmente de garrafas, cortadas em diferentes dimensões (5×8 mm, 8×15 mm e 15×25 mm) e incorporadas em teores variando de 0,25% a 2%. Foram realizados ensaios de expansão livre, compactação, resistência à compressão simples, CBR e cisalhamento direto. Os resultados mostraram que a adição de plástico reduziu significativamente o potencial de expansão do solo. Além disso, os parâmetros do ensaio de compactação reduziram, enquanto a resistência à compressão aumentou e os valores de CBR apresentaram melhora.

Já os autores Abukhattala e Fall (2021), no Canadá, investigaram o potencial do uso de resíduos plásticos reciclados na estabilização de solos de subleito para aplicações em pavimentação rodoviária. O objetivo principal foi avaliar se diferentes tipos (LDPE, Polietileno de Alta Densidade (PEAD), PET e Polipropileno (PP)) e formas (flocos, grânulos e moído) de plástico poderiam substituir parcialmente o solo natural, modificando suas propriedades geotécnicas. As amostras de solo foram misturadas com teores de plástico variando de 1 a 10% em peso. Os ensaios realizados incluíram compactação, CBR, resistência à compressão simples, permeabilidade e módulo de resiliência. Em relação aos resultados, a adição de plástico reduziu a densidade seca máxima em todos os casos, o que era esperado pela menor densidade do material plástico em comparação às partículas de solo. Já os valores de CBR e módulo de resiliência apresentaram comportamento variável, podendo aumentar ou diminuir dependendo do tipo, forma e teor de plástico utilizado. As misturas com plástico apresentaram maior ângulo de atrito, porém menor resistência à compressão em relação ao solo puro. A permeabilidade, de forma geral, aumentou com a adição dos resíduos, embora

em alguns casos tenha permanecido inalterada. De modo geral, o estudo concluiu que a substituição parcial do solo por resíduos plásticos pode ser viável em camadas de subleito, contribuindo também para a redução do impacto ambiental gerado pelo descarte inadequado de plásticos.

Outro trabalho analisado foi o Chebet e Kalumba (2014), que desenvolveram um estudo na África do Sul, na região da Cidade do Cabo, avaliando o uso de resíduos de sacolas plásticas de PEAD como material de reforço de solos arenosos. O resíduo foi triturado em tiras com diferentes dimensões, variando entre 15 e 45 mm de comprimento e 6 a 18 mm de largura, sendo incorporado a duas areias locais, Klipheuwel e Cape Flats. Para análise do comportamento mecânico das misturas, foram realizados ensaios de cisalhamento direto e de placa de carga em escala de bancada. Os resultados indicaram aumento da resistência dos materiais após a incorporação do resíduo plástico. Na areia Cape Flats, o ângulo de atrito interno elevou-se de 38,5° para 45,3° com a utilização de tiras perfuradas de 30 mm, representando um incremento de aproximadamente 18%. Já para a areia Klipheuwel, o ângulo de atrito aumentou de 41,6° para 44°. Nos ensaios de placa de carga, observou-se aumento da capacidade de suporte de até 26% para a placa menor e 24% para a maior, conforme a concentração de plástico foi elevada de 0,1% para 0,3%. Além disso, as tiras perfuradas apresentaram desempenho superior ao das tiras intactas, em razão do maior intertravamento promovido entre o plástico e as partículas de areia.

Com propósito similar, Akshat Mehrotra *et al.* (2014) realizaram um estudo na Índia, na região de Pune, com o objetivo de avaliar o efeito da incorporação de resíduos plásticos de PEAD no comportamento mecânico de um solo expansivo do tipo *Black Cotton Soil*. O resíduo empregado consistiu em sacolas plásticas de PEAD com espessura de 40 microns, cortadas em fragmentos de 1 cm × 1 cm e misturadas ao solo em diferentes teores. Para análise do desempenho das misturas, foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada (RCS). Os resultados demonstraram aumento na densidade seca máxima e redução nos teores de umidade, já na resistência do solo ocorreu aumento significativo com a adição do resíduo plástico. O solo natural apresentou resistência de 71,35 kN/m², enquanto as misturas com 1,5%, 3% e 4,5% de PEAD atingiram valores de 145,45 kN/m², 210,95 kN/m² e 287,32 kN/m², respectivamente. O teor de 4,5% apresentou o melhor desempenho, correspondendo a um incremento aproximado de 303% em relação ao solo natural.

Entretanto, com a incorporação de 6% de PEAD, a resistência reduziu para 234,71 kN/m², indicando que teores excessivos do resíduo podem comprometer o comportamento mecânico da mistura.

Já os autores Mercy Joseph Poweth *et al.* (2013), realizaram um estudo na Índia, na região de Kothamangalam, avaliando a utilização de resíduos plásticos, pó de pedreira e borracha de pneu em misturas com solo local para aplicação em subleitos de pavimentos. Para análise do comportamento geotécnico das misturas, foram executados ensaios de compactação Proctor Padrão e CBR. Os resultados mostraram que o solo natural apresentou CBR de 12,16%, enquanto as misturas contendo apenas solo e plástico ocasionaram redução da densidade seca máxima e do valor de CBR, indicando perda de desempenho mecânico. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que o plástico utilizado isoladamente não é adequado para aplicação em subleitos de pavimentos, porém sua combinação com pó de pedreira possibilita manter os valores de CBR dentro da faixa requerida para esse tipo de aplicação.

Por fim, Choudhary *et al.* (2010) desenvolveram um estudo na Índia, nas regiões de Jamshedpur e Punjab, investigando o uso de resíduos plásticos de PEAD como material de reforço para solos arenosos. O resíduo utilizado foi obtido a partir de embalagens plásticas descartadas, sendo cortado em tiras com comprimentos de 12, 24 e 36 mm e incorporado aleatoriamente à areia local em diferentes teores. Para avaliação do comportamento mecânico das misturas, foram realizados ensaios de CBR. Os resultados demonstraram ganhos expressivos de resistência com a adição das tiras plásticas. O CBR da areia não reforçada, inicialmente de 18,88%, atingiu 54,89% com a incorporação de 4% de tiras e razão de aspecto igual a 3, representando um aumento de aproximadamente três vezes em relação ao solo natural. Além disso, o módulo secante aumentou de 395,2 MPa para 1149,0 MPa com a utilização de 4% de tiras de 36 mm. De modo geral, verificou-se que o aumento do teor e do comprimento das tiras proporcionou maior incremento na resistência mecânica do material.

4.2. Estabilização de solo

Os autores Bansal *et al.* (2025), em um estudo na Índia, voltado para a engenharia geotécnica, investigaram a utilização de resíduos de tereftalato de polietileno (PET) como material de estabilização de solos. O objetivo principal foi avaliar se a incorporação de fibras

plásticas poderia melhorar as propriedades mecânicas do solo, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte de plásticos. O estudo foi conduzido por meio de ensaios laboratoriais em amostras de solo com e sem adição de PET, incluindo ensaios de compactação (Proctor), cisalhamento direto e CBR. Foram analisados diferentes teores de plástico e relações de aspecto das fibras. Os resultados indicaram melhorias significativas no comportamento do solo com a adição de PET. O ensaio de compactação resultou no aumento da densidade seca máxima para o solo com a porcentagem de plástico, e na diminuição do teor de umidade ótimo. De forma geral, o estudo conclui que o PET reciclado pode ser um reforço eficiente para solos, melhorando sua resistência e capacidade de suporte, além de representar uma alternativa sustentável para o reaproveitamento de resíduos plásticos na engenharia geotécnica.

Na mesma ideia, Obianyo *et al.* (2024), Nigéria, investigaram o uso de resíduos plásticos de garrafas PET trituradas na estabilização de solos lateríticos, com o objetivo principal de melhorar a resistência e o desempenho geotécnico do solo para aplicação em obras rodoviárias sustentáveis, ao mesmo tempo em que propõem uma alternativa ambientalmente adequada para o descarte de plásticos. O estudo foi realizado com solo laterítico coletado em Abuja (Nigéria), ao qual foram adicionadas fibras de PET em diferentes teores (2%, 4%, 6%, 8% e 10%). Foram realizados ensaios de caracterização e comportamento mecânico, como limites de Atterberg, compactação Proctor e CBR. Os resultados mostraram que a adição de PET reduziu a densidade seca máxima do solo e aumentou o teor de umidade ótimo. O CBR, por outro lado, diminuiu progressivamente com o aumento do teor de plástico, indicando redução da capacidade de suporte, embora o material tenha se tornado mais leve. Concluiu-se que pequenas proporções de PET podem ser mais adequadas para melhoria do solo, e que a técnica representa uma solução sustentável para reaproveitamento de resíduos plásticos na engenharia geotécnica.

Outros autores que trabalharam na mesma temática foram Sai e Srinivas (2019), na Índia, que estudaram a estabilização de um solo expansivo (*black cotton soil*) com resíduos plásticos triturados e granulares, visando melhorar propriedades geotécnicas do material. O solo foi classificado como argila de alta plasticidade, contendo 1% de pedregulho, 28% de areia e 71% de finos. O resíduo utilizado consistiu em garrafas plásticas trituradas e grânulos plásticos passantes na peneira de 4,75 mm, incorporados nos teores de 0,5%, 1%, 1,5% e 2%.

Os autores realizaram ensaios de massa específica dos grãos, limites de Atterberg, análise granulométrica, compactação Proctor Normal, CBR e resistência à compressão não confinada (RCS). Nos resultados de compactação, a mistura com 1% de resíduo plástico apresentou massa específica seca máxima de 1,70 g/cm³, valor ligeiramente superior ao do solo natural, que apresentou 1,67 g/cm³. O teor de umidade ótima também sofreu pequena alteração, passando de 13,4% no solo puro para 13% na mistura com 1% de resíduo. No ensaio de resistência à compressão não confinada, entretanto, a incorporação de 1% de resíduo provocou redução significativa da resistência mecânica do material. O solo natural apresentou resistência de 25,6 kN/m², enquanto a mistura com 1% de resíduo atingiu apenas 8,8 kN/m², representando uma queda expressiva da resistência à compressão simples. Os autores concluíram que, embora a incorporação de resíduos plásticos possa contribuir para melhorias em alguns parâmetros físicos, teores mais elevados podem comprometer o comportamento mecânico do solo.

Subash K *et al.* (2016) realizaram um estudo na Índia, com o objetivo principal de promover a estabilização de um solo expansivo do tipo *Black Cotton Soil* utilizando resíduos reciclados de vidro e plástico em forma de grânulos passantes na peneira de 4,75 mm. O trabalho buscou melhorar as propriedades geotécnicas do solo e, simultaneamente, incentivar o reaproveitamento de resíduos de difícil reciclagem. Foram utilizadas diferentes porcentagens de vidro e plástico, sendo identificado teor ótimo de 6% de adição. Os resultados mostraram aumento da massa específica seca máxima para 1,53 g/cm³, elevação da umidade ótima para 22,6% e aumento expressivo da resistência à compressão simples, passando de 0,609 kg/cm² no solo natural para 3,23 kg/cm² na mistura estabilizada, aproximadamente cinco vezes maior. O índice CBR não imerso aumentou de 3,19% para 7,14%, enquanto o CBR imerso passou de 0,51% para 1,2%. Além disso, houve redução do índice de expansão e aumento significativo da capacidade de suporte do solo, demonstrando a eficiência dos resíduos de vidro e plástico como estabilizantes.

Seguindo uma proposta semelhante, Anas Ashraf *et al.* (2011) desenvolveram um estudo na Índia, na região de Trivandrum, investigando a utilização de resíduos de garrafas plásticas como material de estabilização para solo laterítico. O resíduo foi empregado em duas configurações: garrafas inteiras cortadas ao meio e tiras plásticas obtidas a partir dessas embalagens, incorporadas ao solo em diferentes condições de aplicação. Para avaliação do

desempenho geotécnico das misturas, foram realizados ensaios de CBR e ensaios de placa de carga. Os resultados indicaram melhoria significativa no comportamento mecânico do solo reforçado. O valor ótimo de CBR foi obtido com a incorporação de 0,6% de tiras plásticas, elevando o índice de 1,967 para 2,479. Nos ensaios de placa de carga, a capacidade de suporte correspondente a 4 mm de recalque aumentou de 440 kg, no solo natural, para 1200 kg com a adição de 0,6% de tiras plásticas, representando incremento de aproximadamente 172,7%. Além disso, o recalque final foi reduzido de 18,1 mm para 5,26 mm, correspondendo a uma redução de cerca de 70,9%. rço.

4.3. Concreto / Argamassa Sustentável

Os autores Vidales-Barriguete *et al.* (2026), em estudo desenvolvido na Espanha, tiveram como principal objetivo avaliar a viabilidade da substituição parcial da areia por resíduos poliméricos reciclados em argamassas de cal, com foco na sustentabilidade e na redução do consumo de recursos naturais. O resíduo utilizado é proveniente de materiais plásticos reciclados, sendo incorporado na forma de partículas, com comportamento semelhante ao de um agregado leve. Foram realizados ensaios relacionados às propriedades físicas e mecânicas do material, como densidade, resistência à compressão, resistência à flexão, trabalhabilidade e absorção de água. Os resultados obtidos indicaram que a incorporação do resíduo promove redução da densidade da argamassa, devido à menor massa específica do material plástico em comparação à areia natural. Em contrapartida, observou-se uma tendência de diminuição da resistência mecânica à medida que o teor de resíduo aumenta, o que está associado à menor aderência entre a matriz cimentícia e as partículas plásticas, bem como ao aumento da porosidade do compósito.

Já o trabalho dos autores Georgeoi *et al.* (2026), aborda um estudo de caso na Romênia, com objetivo de analisar a utilização de resíduos eletrônicos (e-waste) como material alternativo no concreto, considerando tanto os aspectos mecânicos quanto os ambientais dessa aplicação. Os resíduos empregados são oriundos de equipamentos elétricos e eletrônicos descartados, incluindo diferentes tipos de polímeros, como PVC e PE, além de fibras metálicas e componentes de cabos elétricos, podendo ser incorporados ao concreto na forma de fibras ou como substituição parcial de agregados naturais. O trabalho reúne resultados de diversos estudos da literatura, nos quais foram realizados ensaios como resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade e

absorção de água. Os resultados indicam que a incorporação de pequenas quantidades de resíduo pode proporcionar melhorias em determinadas propriedades mecânicas, principalmente quando o material é utilizado na forma de fibras, contribuindo para o aumento da capacidade de absorção de energia e controle de fissuração. No entanto, à medida que o teor de resíduo aumenta, especialmente quando utilizado como substituto de agregados em maiores proporções, observa-se uma redução significativa da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, além de possíveis aumentos na porosidade e na absorção de água.

Na mesma linha de pesquisa, Hasan *et al.* (2025), em estudo realizado no Iraque, investigou o reaproveitamento de resíduos de cabos elétricos (ECW) como substituição parcial da areia na produção de argamassas. O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho mecânico e físico de uma argamassa estrutural leve e sustentável, além de propor uma alternativa ambientalmente adequada para o descarte desses resíduos plásticos. Para isso, os autores utilizaram o resíduo proveniente do revestimento plástico de cabos elétricos, triturado e incorporado em diferentes proporções (5% a 25%) em substituição ao agregado miúdo natural. Foram analisadas propriedades como fluidez, resistência à compressão e à flexão e densidade ao longo do tempo (7, 28 e 360 dias). Os resultados indicaram que, embora haja redução nas propriedades mecânicas com o aumento do teor de resíduo, ocorre também significativa diminuição da densidade, possibilitando a produção de argamassas estruturais leves. O melhor desempenho foi observado com 5% de substituição, sendo que teores mais elevados não agregam melhorias às propriedades mecânicas, contribuindo principalmente para a redução da densidade e para o caráter sustentável do material.

4.4. Análise dos trabalhos estudados

Diante dos artigos estudados neste trabalho, é possível observar que o tema do reaproveitamento de resíduos plásticos em obras de engenharia civil e geotécnica apresenta grande amplitude, principalmente quando se analisa a origem das pesquisas, que se mostram bastante diversas, abrangendo países de diferentes continentes. Nesse contexto, o Quadro 1 apresenta um resumo da origem dos trabalhos, bem como do objetivo principal adotado nos estudos relacionados ao reaproveitamento de resíduos plásticos e a Figura 9 mostra de forma esquemática essa distribuição de países. Esse aspecto evidencia o caráter global do interesse pelo tema e sua relevância no contexto atual. Ressalta-se, entretanto, que os trabalhos apresentados correspondem a um recorte obtido a partir da literatura consultada para esta

pesquisa, não constituindo uma amostragem representativa da totalidade dos estudos desenvolvidos sobre o tema.

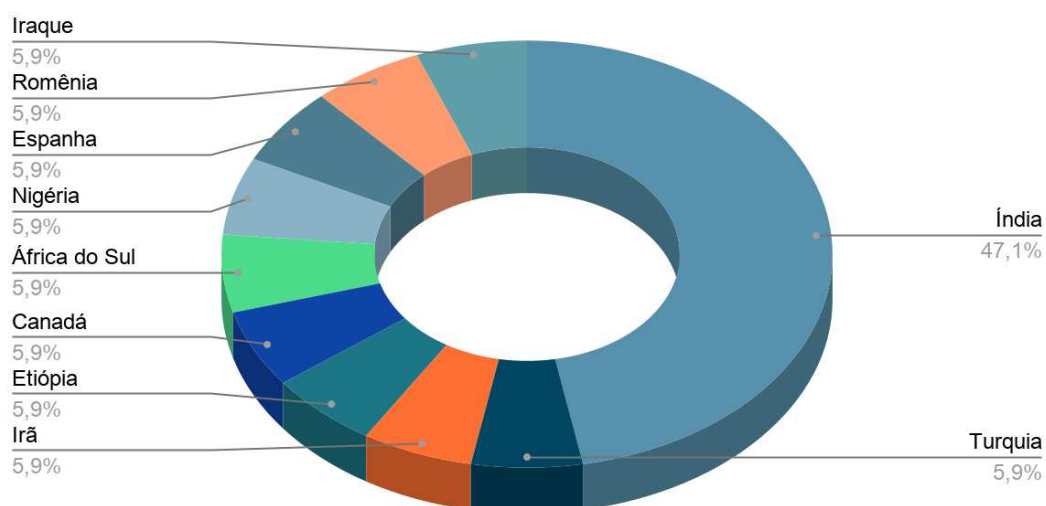
Quadro 1 – Resumo dos países e objetivo principal dos trabalhos analisados

Autor	Objetivo Principal	País
Suthar <i>et al.</i> (2024)	Reforço de solo	Índia
Erdağ <i>et al.</i> (2022)		Turquia
Roustaei <i>et al.</i> (2022)		Irã
Amena (2022)		Etiópia
Abukhattala e Fall (2021)		Canadá
Chebet e Kalumba (2014)		África do Sul
Akshat Mehrotra <i>et al.</i> (2014)		Índia
Mercy Joseph Poweth <i>et al.</i> (2013)		Índia
Choudhary <i>et al.</i> (2010)		Índia
Bansal <i>et al.</i> (2025)	Estabilização de Solos	Índia
Obianyo <i>et al.</i> (2024)		Nigéria
Sai e Srinivas (2019)		Índia

Subash K. <i>et al.</i> (2016)	Concreto / Argamassa Sustentável	Índia
Anas Ashraf <i>et al.</i> (2011)		Índia
Vidales-Barriguete <i>et al.</i> (2026)		Espanha
Georgeoi <i>et al.</i> (2026)		Romênia
Hasan <i>et al.</i> (2025)		Iraque

Fonte: Autora (2026)

Figura 9: Países de origem dos estudos realizados



Fonte: Autora (2026)

Mesmo com a utilização de resíduos plásticos em formatos distintos e a definição de objetivos variados, observa-se que os autores seguem uma linha de pesquisa semelhante. De modo geral, inicia-se pela caracterização das propriedades do solo puro e, posteriormente, realiza-se a incorporação do resíduo plástico em diferentes porcentagens, acompanhada da execução de ensaios destinados à avaliação das modificações nas propriedades físicas e

mecânicas do solo. O Quadro 2 apresenta um resumo dos materiais utilizados por cada autor, contemplando a origem do resíduo, o formato adotado e as porcentagens dos resíduos empregadas nos estudos.

Quadro 2 – Resumo dos tipos de resíduos, formatos e porcentagem utilizadas nos trabalhos analisados

Autor	Origem do Resíduo	Formato do Resíduo	Porcentagens (%)
Suthar <i>et al.</i> (2024)	Garrafas PET	Grãos	5%, 10% e 15%
Erdağ <i>et al.</i> (2022)	LDPE	Tiras	0,3%, 0,5% e 0,7%
Roustaei <i>et al.</i> (2022)	Garrafas (PET)	Tiras	0,4%, 0,6%, 0,8% e 1%
Amena (2022)	Garrafas (PET)	Tiras	0,25%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2%
Abukhattala e Fall (2021)	Resíduos Industriais	Grãos	1% a 10%
Chebet e Kalumba (2014)	Sacolas plásticas	Tiras	0,1%, 0,2% e 0,3%
Akshat Mehrotra <i>et al.</i> (2014)	Sacolas plásticas	Tiras	1,5%, 3%, 4,5% e 6%
Mercy Joseph Poweth <i>et al.</i> (2013)	Resíduo não reciclável de plástico processado	não especificado	4%, 10%, 20%, 36%, 54%, 80% e 100%
Choudhary <i>et al.</i> (2010)	resíduos de embalagens PEAD	Tiras	0,25%, 0,50%, 1%, 2% e 4%
Bansal <i>et al.</i> (2025)	Garrafas (PET)	Tiras	1%
Obianyo <i>et al.</i> (2024)	Garrafas (PET)	Grãos Triturados	2%, 4%, 6%, 8% e 10%

Autor	Origem do Resíduo	Formato do Resíduo	Porcentagens (%)
Subash K. <i>et al.</i> (2016)	Resíduos de vidro e plástico reciclados	Grãos	2%, 4%, 6% e 8%
Anas Ashraf <i>et al.</i> (2011)	Garrafas plásticas	Garrafas inteiras e Tiras	0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0
Vidales-Barriguete <i>et al.</i> (2026)	Cabos Elétricos	Grânulos	25%, 50%, 75% e 100% (volume)
Georgeoi <i>et al.</i> (2026)	Resíduos eletrônicos (e-waste)	Flocos, grânulos e tiras	Diversas (A partir de 0,25%)
Hasan <i>et al.</i> (2025)	Cabos Elétricos	Grãos Triturados	5%, 10%, 15%, 20% e 25%

Fonte: Autora (2026)

Nos estudos analisados, os autores realizaram diferentes tipos de ensaios para avaliar o comportamento das misturas solo-resíduo. No entanto, optou-se por dar maior ênfase aos ensaios de compactação e de resistência à compressão simples, uma vez que esses foram os ensaios desenvolvidos neste trabalho, sendo necessário compreender a tendência dos resultados para possibilitar a comparação com os dados obtidos nesta pesquisa.

Com base na análise dos trabalhos que apresentaram resultados de ensaios de compactação, verificou-se que, em aproximadamente 70% dos casos, houve redução da massa específica seca máxima em todas ou na maioria das porcentagens de resíduos utilizadas. Em relação ao teor de umidade ótimo, quando reportado pelos autores, observou-se redução em 86% em todas ou na maioria das porcentagens analisadas, conforme apresentado no Quadro 3 e sintetizado na Figura 10.

A redução da massa específica seca máxima em relação ao solo puro indica que a adição de resíduos plásticos tende a resultar em uma mistura menos densa após a compactação. Esse comportamento está associado à menor densidade dos materiais plásticos e

à sua interferência no arranjo das partículas como cita os autores Sai e Srinivas (2019), Amena (2022), entre outros, como mostrado no Quadro 3 e sintetizado na Figura 10.

Por sua vez, a diminuição do teor de umidade ótimo sugere que a incorporação dos resíduos promove a necessidade de menor quantidade de água para que a mistura solo-resíduo atinja a condição de massa específica seca máxima, sob a energia de compactação aplicada. Esse efeito ocorre, principalmente, em função da baixa capacidade de absorção de água dos materiais plásticos. Dessa forma, tais modificações influenciam diretamente o comportamento físico e mecânico das misturas.

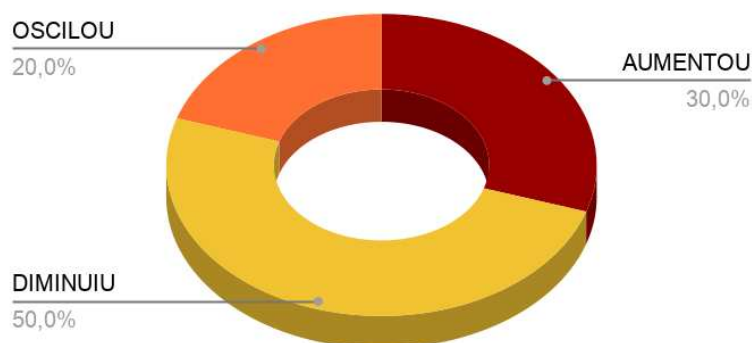
Quadro 3 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação trazidos nos trabalhos analisados

Autor	Massa específica seca máx. da mistura em relação a de solo puro (g/cm ³)		Teor de umidade da mistura em relação a de solo puro (%)		Observação
	Aumentou	Diminuiu	Aumentou	Diminuiu	
Suthar <i>et al.</i> (2024)		X		X	
Erdağ <i>et al.</i> (2022)	X	X			Não houve menção aos resultados de teor de umidade
Amena (2022)		X		X	
Abukhattala e Fall (2021)		X			Não houve menção aos resultados de teor de umidade
Akshat Mehrotra <i>et al.</i> (2014)	X			X	
Mercy Joseph Poweth <i>et al.</i> (2013)		X			Não houve menção aos resultados de teor de umidade
Bansal <i>et al.</i> (2025)	X			X	
Obianyo <i>et al.</i> (2024)		X	X	X	

Autor	Massa específica seca máx. da mistura em relação a de solo puro (g/cm ³)		Teor de umidade da mistura em relação a de solo puro (%)		Observação
	Aumentou	Diminuiu	Aumentou	Diminuiu	
Sai e Srinivas (2019)	X	X	X	X	
Subash K. <i>et al.</i> (2016)	X		X		

Fonte: Autora (2026)

Figura 10: Gráfico comparativo em relação a densidade seca máxima da mistura solo-resíduo



Fonte: Autora (2026)

Analisando os resultados do ensaio de compressão simples não confinada, observou-se uma tendência predominante de aumento da resistência das misturas, sendo que apenas cerca de 33% dos estudos apresentaram redução da resistência em todas ou em algumas das porcentagens analisadas, conforme apresentado no Quadro 4 e na Figura 11.

A queda da resistência à compressão simples após o teor ótimo ocorre porque, em excesso, o resíduo plástico passa a prejudicar a própria estrutura do solo. Ao invés de se distribuir de forma eficiente pela matriz, o material plástico começa a formar aglomerados, criar discontinuidades e gerar planos de fraqueza nas suas interfaces, que por serem lisas

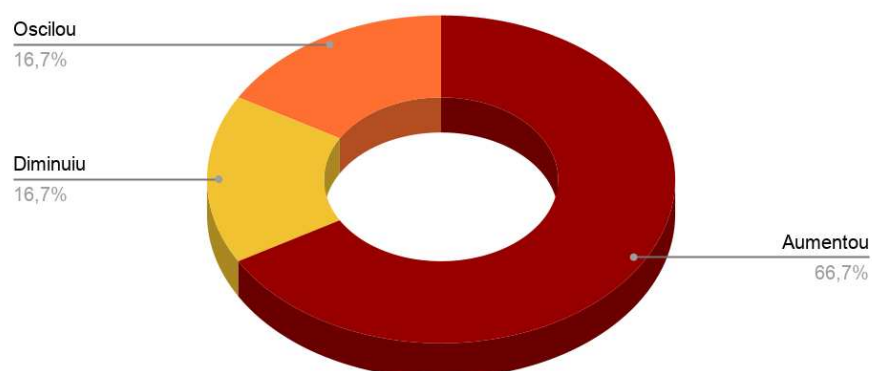
oferecem baixa resistência ao cisalhamento. Somado a isso, o contato predominante deixa de ser entre resíduo e partículas de solo e passa a ocorrer entre os próprios resíduos, o que torna a transferência de carga ineficiente e enfraquece as ligações coesivas da mistura como um todo (Roustaei *et al.*, 2022, Bansal *et al.*, 2025, Subash K. *et al.*, 2016, Khalid e Alshawmar, 2024). Já o aumento observado abaixo do teor ótimo se deve a um conjunto de efeitos positivos que o resíduo plástico promove na estrutura do solo. O material preenche os vazios existentes entre as partículas, densificando a mistura e aumentando os pontos de contato. Além disso, os elementos plásticos criam um travamento mecânico com as partículas de solo ao seu redor, aumentando a rugosidade interfacial e dificultando o deslizamento relativo entre elas. As fibras e tiras atuam ainda como pontes que resistem à abertura de planos de ruptura, obrigando o solo a mobilizar maior resistência antes de colapsar (Roustaei *et al.*, 2022, Amena, 2022, Khalid e Alshawmar, 2024, Subash K. *et al.*, 2016, Akshat Mehrotra *et al.*, 2014).

Quadro 4 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão simples trazidos nos trabalhos analisados

Autor	Resistência ao cisalhamento da mistura em relação ao solo puro (kN/m²)	
	Aumentou	Diminuiu
Roustaei <i>et al.</i> (2022)	X	
Amena (2022)	X	
Abukhettala e Fall (2021)		X
Akshat Mehrotra <i>et al.</i> (2014)	X	
Sai e Srinivas (2019)	X	X
Subash K. <i>et al.</i> (2016)	X	

Fonte: Autora (2026)

Figura 11: Gráfico comparativo em relação a Resistência ao Cisalhamento da Mistura



Fonte: Autora (2026)

5. RESULTADO DA PESQUISA EXPERIMENTAL

5.1. Caracterização Física

5.1.1. Solo

Os parâmetros utilizados para a caracterização do solo estudado nesta pesquisa foram obtidos a partir dos trabalhos de Barletta (2021) e Cândido (2023), cujos resultados experimentais foram apresentados no Capítulo 3. Além disso, também foram considerados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples realizado no presente trabalho, complementando a base de dados utilizada nas análises.

5.1.1.1. Ensaio de Resistência à Compressão Simples do solo

Foram realizados três ensaios experimentais de resistência à compressão simples (RCS) no solo puro. A partir das curvas que foram traçadas com os resultados, foram inicialmente determinadas as resistências de pico, seguida da média aritmética e avaliados o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), obtendo o valor da resistência à compressão do solo puro, que posteriormente será comparada a da mistura (Quadro 5)

Quadro 5 – Resumo dos resultados dos três corpos de prova do solo

CORPOS DE PROVA	RCS (kPa)	RCS (MPa)	MÉDIA RCS (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	CV (%)
CP1	182,9	0,183	0,152	0,035	23%
CP2	158,7	0,159			
CP3	113,9	0,114			

Fonte: Autora, 2026

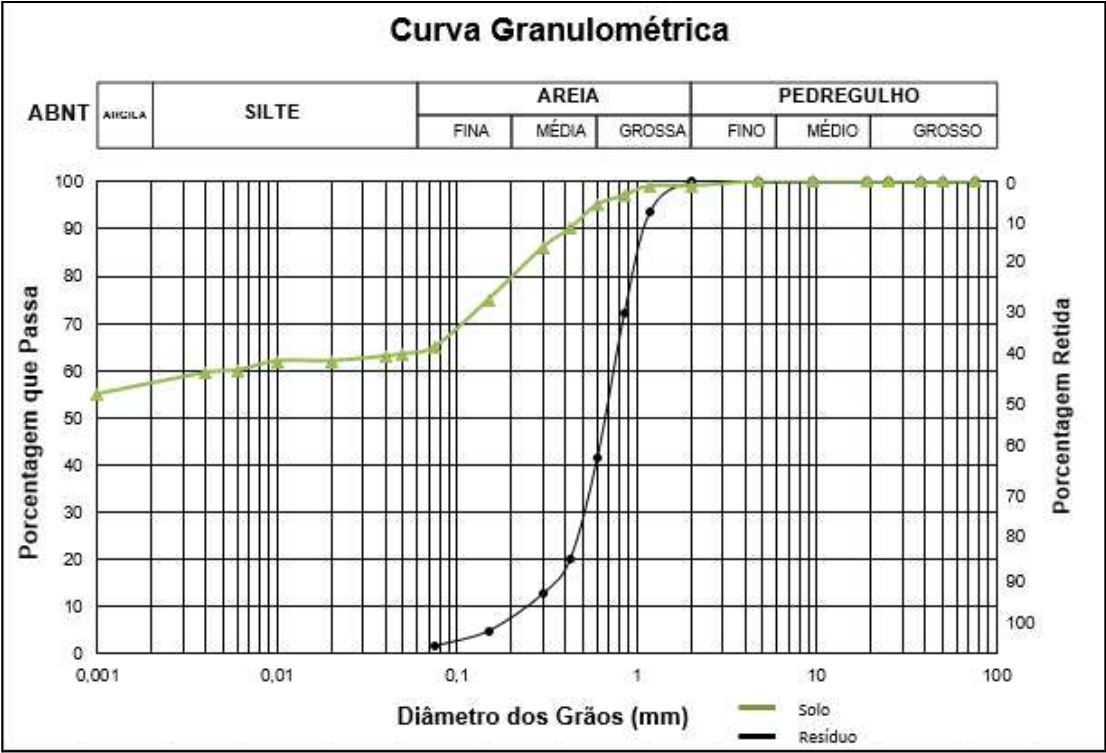
5.1.2. Resíduo Plástico

5.1.2.1. Ensaio de Granulometria

Após a realização do ensaio de granulometria pelo método de peneiramento, foi possível obter os dados necessários para o traçado da curva granulométrica, como mostra a

Figura 12. A curva do solo puro também mostrada na figura é do trabalho realizado por Barletta (2021).

Figura 12: Curva granulométrica do resíduo plástico e solo puro



Fonte: (Autora, 2026; Barletta, 2021)

A comparação da curva granulométrica do resíduo plástico com a escala da ABNT NBR 6502:2022 permitiu identificar as frações equivalentes às do solo presentes no material, adotando-se como referência os limites de diâmetro estabelecidos pela norma. Como a primeira peneira a apresentar material retido foi a de 1,18 mm, com apenas 6,26% de retenção, e considerando que esse diâmetro ainda se enquadra na faixa de areia grossa, entre 0,60 mm e 2,00 mm, conclui-se que não há presença de pedregulho na amostra.

O resíduo plástico é constituído essencialmente por partículas com dimensões semelhantes à fração arenosa de um solo, apresentando pequena quantidade de finos. A fração predominante corresponde à areia grossa, representando aproximadamente 58,5% do material, valor resultante da soma de 52,3% passante entre 0,60 mm e 1,18 mm e 6,26% retido na peneira de 1,18 mm. Em relação à faixa de areia média, com diâmetros entre 0,20 mm e 0,60 mm, a porcentagem de resíduo corresponde a cerca de 37,9% do total. Já a faixa de areia fina,

entre 0,06 mm e 0,20 mm, e os finos inferiores a 0,075 mm apresentam participações pouco significativas, da ordem de 2,5% e 1,7%, respectivamente.

Seguindo esse raciocínio e a partir da curva obtida (Figura 12), foram determinados por interpolação logarítmica os diâmetros correspondentes a D10, D30 e D60, os resultados foram 0,235 mm, 0,499 mm e 0,740 mm, respectivamente. Com isso, o coeficiente de uniformidade (C_u) obtido foi de 3,15, indicando que o resíduo plástico apresenta granulometria relativamente uniforme, ou seja, as partículas estão concentradas em uma faixa estreita de tamanhos, sem grande variação entre os grãos menores e os maiores. Já o coeficiente de graduação (C_c), por estar dentro do intervalo entre 1 e 3, indica que a curva granulométrica do resíduo plástico é bem graduada, ou seja, não há ausência de nenhuma faixa intermediária de tamanhos de partículas. Esse comportamento é coerente com o processo de trituração do material plástico, que tende a gerar partículas com tamanhos relativamente próximos entre si, dependendo da regulagem do equipamento utilizado.

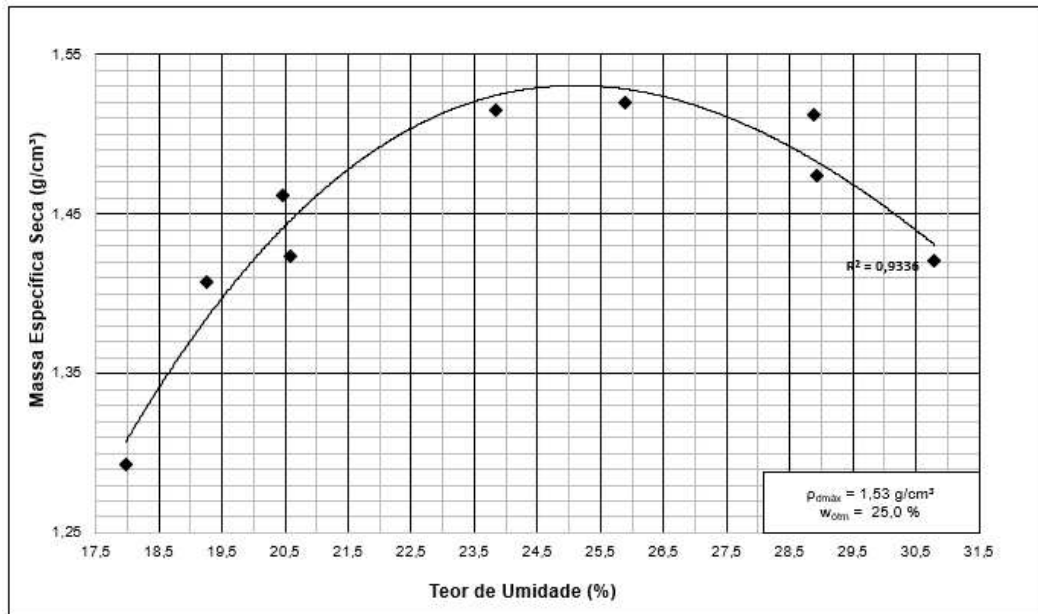
Como já citado, o artigo de Sai e Srinivas (2019) foi utilizado como referência para iniciar este estudo exploratório, visto que o solo utilizado pelos autores é predominantemente argiloso e foram empregados grãos de resíduo plástico com diâmetro máximo de 4,75 mm, características semelhantes às adotadas nesta pesquisa.

5.1.3. Mistura

5.1.3.1. Ensaio de Compactação

Após a compactação de nove corpos de prova da mistura com 1% de resíduo plástico incorporado ao solo, na energia normal, determinaram-se os pares de valores para traçar a curva de compactação apresentada na Figura 13. Ao analisar o pico da curva, obteve-se como valores do teor de umidade ótimo ($w_{ótimo}$) e da massa específica seca máxima ($\gamma_{d,máx}$), respectivamente, 25% e 1,53 g/cm³.

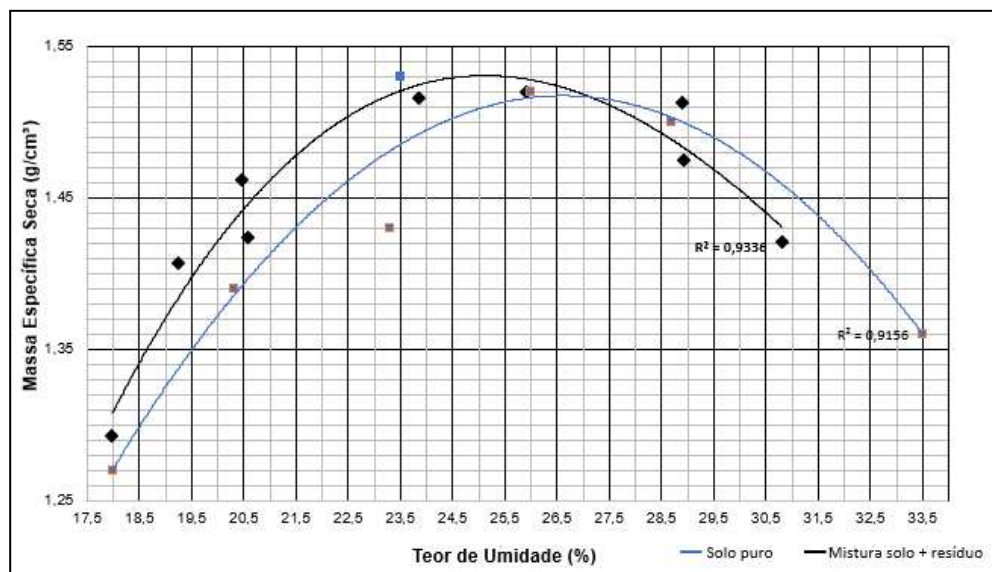
Figura 13: Curva de compactação da mistura solo - resíduo plástico



Fonte: Autora, 2026

Para comparar e compreender os resultados obtidos no ensaio de compactação da mistura solo-resíduo com aqueles obtidos para o solo puro por Barletta (2021), foi construída a Figura 14 que mostra ambas curvas de compactação.

Figura 14: Comparação das curvas de compactação do solo puro (Barletta, 2021) e da mistura solo - resíduo



Fonte: Autora, 2026 e Barletta, 2021

Analisando os resultados obtidos na curva de compactação da mistura solo-resíduo, que apresentou massa específica seca máxima igual a $1,53 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 25%, em comparação aos valores encontrados por Barletta (2021) para o solo puro, de $1,515 \text{ g/cm}^3$ e 27%, respectivamente, observa-se a influência da incorporação do resíduo plástico no comportamento do compósito. A alteração de ambos os parâmetros, embora discreta, sugere que a presença do resíduo pode ter promovido alterações no arranjo das partículas da mistura, interferindo na acomodação dos grãos durante o processo de compactação. Esse comportamento pode estar associado à menor densidade e à reduzida capacidade de absorção de água do resíduo plástico em relação ao solo, favorecendo a obtenção da condição ótima com menor teor de umidade.

Esse comportamento pode ser melhor compreendido a partir da comparação com resultados apresentados por diferentes autores, não com o objetivo de reproduzir diretamente os valores obtidos em cada estudo, mas de identificar tendências gerais relacionadas à incorporação de resíduos plásticos em solos. As diferenças entre tipo de solo, formato do resíduo plástico, dimensões das partículas, energia de compactação e teores incorporados dificultam comparações absolutas entre os resultados, tornando mais adequado utilizar os estudos como referência para interpretação do comportamento observado.

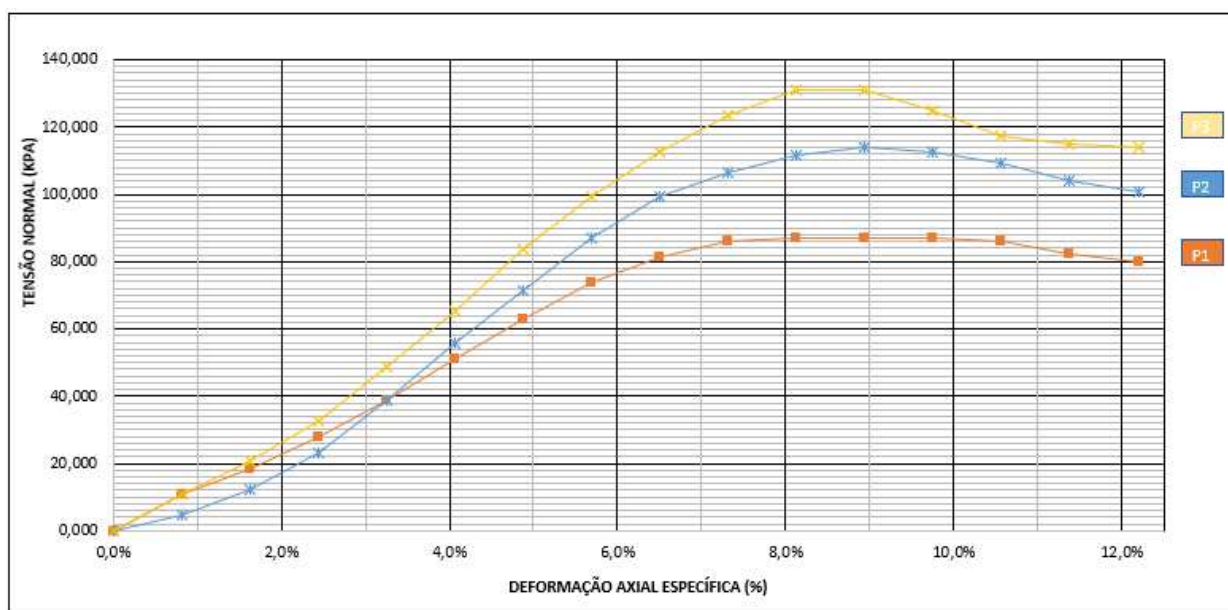
Sai e Srinivas (2019), por exemplo, observaram que a incorporação de 1% de resíduo plástico promoveu um leve aumento da massa específica seca máxima, de $1,67 \text{ g/cm}^3$ para $1,70 \text{ g/cm}^3$, acompanhado de pequena redução da umidade ótima, de 13,4% para 13%. No presente estudo os resultados apresentaram alterações com a mesma ordem de grandeza e permanecem pouco expressivas em ambos os casos, com aumento na massa específica seca máxima, de $1,515 \text{ g/cm}^3$ para $1,53 \text{ g/cm}^3$ e redução do teor de umidade de 27% para 25%.

Dessa forma, os resultados analisados em conjunto indicam uma tendência geral de que a incorporação de resíduos plásticos promove alterações discretas nos parâmetros de compactação, especialmente em baixos teores de adição, sendo frequente a redução da umidade ótima e a manutenção ou aumento pouco expressivo da massa específica seca máxima.

5.1.3.2. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Foram realizados três ensaios experimentais de resistência à compressão simples (RCS), possibilitando o traçado de curvas correspondentes, conforme apresentado na Figura 15. A partir dessas curvas, foram inicialmente determinadas as resistências de pico, seguida da média aritmética e avaliados o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), com o objetivo de verificar os corpos de prova (CP) mais representativos (Quadro 6).

Figura 15: Curvas de tensão de compressão por deformação axial específica dos corpos de prova da mistura solo-resíduo



Fonte: Autora, 2026

Quadro 6 – Resumo dos resultados dos três corpos de prova da mistura solo-resíduo

CORPOS DE PROVA	RCS (kPa)	RCS (MPa)	MÉDIA RCS (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	CV (%)
CP1	82,10	0,082	0,111	0,022	20
CP2	113,86	0,114			
CP3	130,82	0,131			

Fonte: Autora, 2026

A partir do valor da resistência à compressão simples (RCS) obtido para a mistura solo-resíduo, é possível compará-lo com aquele do solo puro também já obtido nesse estudo. O Quadro 7 apresenta os valores de RCS para ambos os casos, permitindo verificar uma redução moderada da resistência na mistura em relação ao solo puro, da ordem de aproximadamente 27%.

Quadro 7 – Resumo dos resultados de Resistência à Compressão Simples

Ensaio	Solo Puro	Mistura Solo + Resíduo Plástico
RCS (MPa)	0,152	0,111

Fonte: Autora, 2026

Essa redução moderada da resistência à compressão simples da mistura, mesmo com parâmetros de compactação semelhantes aos do solo puro, sugere que a incorporação do resíduo plástico pode ter comprometido a estrutura resistente da mistura. Embora a adição de 1% de resíduo não tenha alterado consideravelmente a densificação da mistura, a RCS não depende apenas da densidade, mas de um conjunto de fatores físicos e estruturais. Nesse contexto, o comportamento observado pode estar associado, por exemplo, à baixa aderência entre o resíduo plástico e o solo argiloso, formando interfaces frágeis, à interrupção do contato entre os grãos de solo, contribuindo para a redução do atrito interno e coesão, além de dificultar a transmissão de tensões, e à atuação do resíduo apenas como material de enchimento, sem exercer função estrutural, aspecto dependente do formato e geometria do resíduo, conforme discutido por autores que avaliaram misturas solo-resíduo (Sai e Srinivas, 2019; Amena, 2022). Como consequência, essas condições podem favorecer a ocorrência de ruptura da mistura sob carregamento axial.

Diante da redução moderada observada, torna-se necessário compreender esse comportamento por meio da análise de casos similares presentes na literatura. Assim como realizado anteriormente, optou-se por estabelecer inicialmente uma comparação com os resultados de Sai e Srinivas (2019), em função da similaridade entre os ensaios executados,

bem como das características do solo e do resíduo utilizados. Para a incorporação de 1% de resíduo plástico, os autores verificaram uma redução significativa da resistência à compressão simples, da ordem de 65,6% em relação ao solo puro.

No presente estudo, para o mesmo teor de incorporação (1%), foi observada uma redução de aproximadamente 27%. Embora exista diferença na magnitude das reduções, ambos os resultados apresentam a mesma tendência de queda da resistência com a adição do resíduo plástico.

A análise de outros estudos demonstra, entretanto, que o comportamento da resistência à compressão simples não confinada pode variar conforme o teor incorporado, o formato do resíduo e a interação desenvolvida entre solo e plástico. Amena (2022), utilizou tiras de garrafas PET em teores entre 0,25% e 2%, observando aumento da resistência em todas as misturas analisadas, atingindo valor máximo de 192,8 kPa com incorporação de 0,5% de tiras. Segundo Amena (2022), o ganho de resistência ocorre devido ao efeito de reforço promovido pelas fibras, que dificultam a propagação das deformações no solo.

Comportamento semelhante foi observado por Akshat Mehrotra *et al.* (2014), que utilizaram resíduos de PEAD provenientes de sacolas plásticas em forma de tiras. Os autores identificaram aumento progressivo da resistência à compressão simples não confinada até o teor de 4,5%, quando a resistência passou de 71,35 kN/m² no solo puro para 287,32 kN/m². Contudo, para o teor de 6%, houve redução da resistência, indicando perda de eficiência do reforço em teores mais elevados de incorporação.

Dessa forma, os estudos analisados indicam que a incorporação de resíduos plásticos pode produzir comportamentos distintos na resistência mecânica do solo, dependendo principalmente do teor incorporado e da forma de interação entre o resíduo e a matriz do solo. Enquanto alguns trabalhos demonstram ganhos de resistência para baixos e médios teores, outros, como o presente estudo e o de Sai e Srinivas (2019), evidenciam reduções significativas mesmo em pequenas porcentagens de adição. Em conjunto, os resultados reforçam a interpretação de que existe uma condição ótima de incorporação, que requer investigação para ser identificada, a partir do qual o excesso de resíduo ou a baixa aderência entre os materiais passa a comprometer os parâmetros de resistência e, consequentemente, a capacidade resistente da mistura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto da compreensão do tema, a revisão bibliográfica demonstrou que o aproveitamento de resíduos plásticos em aplicações geotécnicas constitui uma linha de pesquisa estudada em diferentes países, evidenciando o interesse crescente por soluções sustentáveis voltadas à reutilização de materiais descartados. De modo geral, observou-se que o comportamento das misturas solo-resíduo plástico depende diretamente de fatores como o tipo de solo, o formato do resíduo plástico, a porcentagem incorporada e as condições de compactação adotadas. Buscando compreender melhor essas tendências, foi desenvolvido um estudo experimental de caráter exploratório utilizando solo argiloso incorporado com 1% de resíduo plástico triturado proveniente de cabos elétricos, porcentagem adotada com base em estudo semelhante encontrado na literatura envolvendo resíduos plásticos em formato granular.

A caracterização granulométrica do resíduo plástico triturado revelou predominância de partículas equivalentes à fração arenosa, com cerca de 58,5% na faixa de areia grossa e 37,9% na faixa de areia média. Os coeficientes de uniformidade ($C_u = 3,15$) e de graduação ($C_c = 1,43$) indicaram uma distribuição granulométrica relativamente uniforme, sendo o material classificado como mal graduado, comportamento compatível com o processo de trituração mecânica empregado.

Os resultados dos ensaios de compactação indicaram alterações pouco expressivas entre o solo puro e a mistura solo-resíduo. Observou-se um discreto aumento da massa específica seca máxima, de $1,515 \text{ g/cm}^3$ para $1,53 \text{ g/cm}^3$, e uma diminuição do teor de umidade ótimo, de 27% para 25%. Esse comportamento mostra-se coerente com tendências relatadas na literatura para baixos teores de incorporação de resíduos plásticos, como observado por Sai e Srinivas (2019), sendo geralmente associado à baixa densidade e à reduzida absorção de água do material polimérico em comparação ao solo natural. Dessa forma, os resultados sugerem que a incorporação do resíduo plástico ao solo, no teor estudado, não provocou mudanças significativas nos parâmetros de compactação do solo puro.

Por outro lado, os ensaios de resistência à compressão simples evidenciaram uma redução moderada da resistência mecânica da mistura, passando de 0,152 MPa no solo puro

para 0,111 MPa na mistura com resíduo, correspondendo a uma redução de aproximadamente 27%. Avaliando os resultados da literatura, como forma comparativa, observa-se quedas de resistência em alguns trabalhos que também estuda resíduos plásticos granulares como Sai e Srinivas, a diminuição registrada foi de aproximadamente 65%. Em contrapartida, pesquisas desenvolvidas por Amena (2022) e Akshat Mehrotra (2014), utilizando resíduos em formato fibroso ou em tiras, relataram ganhos de resistência, comportamento associado ao efeito de reforço proporcionado pela ancoragem mecânica das fibras na matriz do solo. Assim, os resultados obtidos indicam que o formato granular do resíduo utilizado pode ter afetado o desempenho mecânico da mistura para o teor analisado, evidenciando a influência direta da geometria e da interação do resíduo com o solo no comportamento final do material.

Ressalta-se que esta pesquisa possui caráter exploratório e preliminar, de modo que os resultados obtidos devem ser interpretados como indicativos iniciais acerca do comportamento da mistura estudada. Dessa forma, não é possível afirmar de maneira definitiva a viabilidade ou inviabilidade técnica do material para aplicações geotécnicas, sendo necessária a ampliação das investigações para uma avaliação mais abrangente do seu desempenho.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros ampliem o escopo da investigação, avaliando diferentes teores de incorporação, granulometrias e formatos do resíduo plástico, com o objetivo de identificar configurações mais favoráveis ao desempenho geotécnico, no que se refere à resistência mecânica, bem como identificar uma possível porcentagem ótima para a mistura solo-resíduo. Também são relevantes pesquisas envolvendo a combinação do resíduo plástico com estabilizantes, como cal e cimento, visando melhorar a interação com o solo. Indica-se também a realização de ensaios complementares de caracterização química e ambiental, como lixiviação e solubilização, a fim de verificar a conformidade da mistura com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10004. Além disso, recomenda-se ampliar a caracterização geotécnica por meio de ensaios como o Índice de Suporte Califórnia (ISC), resistência ao cisalhamento direto, durabilidade e permeabilidade. Sugere-se, ainda, a investigação da viabilidade técnica, ambiental e econômica de aplicação da mistura solo-resíduo plástico em obras geotécnicas com menores exigências de resistência mecânica, como material para preenchimento de valas, camadas de regularização e subleitos de vias de baixo tráfego. Dessa maneira, pesquisas futuras poderão contribuir para o desenvolvimento de

alternativas ambientalmente mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular.

REFERÊNCIAS

ABUKHETTALA, Mukhtar; FALL, Mamadou. Geotechnical characterization of plastic waste materials in pavement subgrade applications. *Transportation Geotechnics*, v. 27, p. 100472, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100472>. Acesso em: 29 mar. 2026.

AMENA, S. Use of solid plastic wastes in pavement sub-base layers to reduce plastic environmental pollution. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 7, p. 100438, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100438>. Acesso em: 29 mar. 2026.

ASHRAF, Anas *et al.* Soil stabilisation using raw plastic bottles. In: INDIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2011, Kochi. Proceedings [...]. Kochi: IGC, 2011. p. 489-492.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004-1:2024: Resíduos sólidos — Classificação — Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12770: solo — determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457: solos — preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5471: condutores elétricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17212: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: solo — determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: solos e rochas — terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo — determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: solo — análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: solos — ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BALDÉ, Cornelis P. *et al.* Global E-waste Monitor 2024. Geneva: International Telecommunication Union; United Nations Institute for Training and Research, 2024.

BANSAL, V. *et al.* Investigation of geotechnical properties of soil using shredded polyethylene terephthalate (PET) wastes. In: AGNIHOTRI, A. K.; REDDY, K. R.; BANSAL, A. (org.). Sustainable infrastructures. Cham: Springer, 2025. p. 119-129. (Lecture Notes in Civil Engineering, v. 355). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-97-8393-9_13. Acesso em: 29 mar. 2026.

BARLETTA, Victor de Freitas. Estudos mecânicos de misturas solo-composto para fins geotécnicos. 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021.

BARNES, Graham; TIBANA, Sergio. Mecânica dos solos: princípios e práticas. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. Tradução de: Soil mechanics: principles and practice.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABPv, 2006.

BRASIL. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta a implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 fev. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10240.htm. Acesso em: fev. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: fev. 2026.

CÂNDIDO, Vivian Bignoto da Rocha. Avaliação do comportamento mecânico de solo residual em misturas com rejeito de minério de ferro. 2023. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. v. 2.

CHEBET, F. C.; KALUMBA, D. Laboratory investigation on re-using polyethylene (plastic) bag waste material for soil reinforcement in geotechnical engineering. *International Journal on Civil Engineering & Urban Planning*, v. 1, n. 1, p. 33-49, jun. 2014.

CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N.; GILL, K. S. A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. *Emirates Journal for Engineering Research*, v. 15, n. 1, p. 51-57, 2010.

E-AMBIENTAL. E-Ambiental: gerenciamento de resíduos eletrônicos. [S. l.]: E-Ambiental, [s.d.]. Disponível em: <https://eambiental.eco.br/>. Acesso em: 5 jul. 2026.

ERDAG, A.; KARDOGAN, P. S. Ö. Experimental study on plastic waste application for soil stabilization. *Environmental Engineering and Management Journal*, v. 21, n. 9, p. 1483-1491, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.30638/eemj.2022.131>. Acesso em: 29 mar. 2026.

GEORGEI, C. *et al.* Recycled electric and electronic waste in concrete: a review of mechanical performance and sustainability potential with a case study in Romania. *CivilEng*, v. 7, n. 1, p. 1-25, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/civileng7010002>. Acesso em: 29 mar. 2026.

HASAN, Z. A. *et al.* Early and long-term performance of green mortar made from the waste of electrical cables. *Magazine of Civil Engineering*, v. 18, n. 4, p. 1-15, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.34910/MCE.136.1>. Acesso em: 29 mar. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3808: road vehicles — high-tension ignition cables — test methods and requirements. Geneva: ISO, 2002.

KHALID, B.; ALSHAWMAR, F. A comprehensive review of geotechnical engineering properties of recycled polyethylene terephthalate fibers and strips for soil stabilization. *Polymers*, v. 16, n. 13, p. 1-30, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16131764>. Acesso em: 29 mar. 2026.

MARANGON, Márcio. Geotecnia de fundações e obras de terra: unidade 02 — geotecnia do subsolo. Material didático. Juiz de Fora: UFJF, 2018.

MEHROTRA, Akshat *et al.* Effect of HDPE plastic on the unconfined compressive strength of black cotton soil. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 3, n. 1, p. 8082-8089, jan. 2014.

MONTEIRO, Marcones da Silva *et al.* Strategies to improve the management of end-of-life electrical and electronic equipment: a case study in Brazil. *Journal of Hazardous Materials Advances*, v. 18, p. 100721, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100721>. Acesso em: mar. 2026.

OBIANYO, I. I. *et al.* Modification of lateritic soil using waste plastics for sustainable road construction. *Polymers*, v. 16, n. 19, p. 1-22, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16192689>. Acesso em: 29 mar. 2026.

PALMEIRA, Ennio Marques. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

POWETH, Mercy Joseph; GEORGE, Solly; PAUL, Jessy. Study on use of plastic waste in road construction. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 2, n. 3, p. 633-638, mar. 2013.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Grupo A, 2006. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: mar. 2026.

ROUSTAEI, M.; TAVANA, J.; BAYAT, M. Influence of adding waste polyethylene terephthalate plastic strips on uniaxial compressive and tensile strength of cohesive soil.

Geopersia, v. 12, n. 1, p. 39-51, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22059/GEOPE.2021.322955.648613>. Acesso em: 29 mar. 2026.

SAI, M.; SRINIVAS, Venkata. Soil stabilization by using plastic waste granules materials. IOSR Journal of Computer Engineering, v. 21, n. 4, p. 42-51, jul./ago. 2019. Disponível em: <http://www.iosrjournals.org>. Acesso em: 15 dez. 2025.

SILVA, Cáo Machado da. Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas compactadas de um solo residual com o resíduo fibroso PRFV. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

SUBASH, K. *et al.* Stabilization of black cotton soil using glass and plastic granules. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 5, n. 4, p. 480-483, abr. 2016.

SURESH, S. S.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Composition analysis and characterization of waste polyvinyl chloride (PVC) recovered from data cables. Waste Management, v. 60, p. 100-111, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.033>. Acesso em: 29 mar. 2026.

SUTHAR, L.; MEENA, S.; KUMAR, U. Utilization of plastic waste in reinforcing sandy soil for sustainable engineering applications. Journal of Engineering Sciences, v. 11, n. 1, p. H1-H8, 2024. Disponível em: [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).h1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).h1). Acesso em: 29 mar. 2026.

VIDALES-BARRIGUETE, A. *et al.* Analysis of lime mortars modified with polymeric waste aggregates as a circular economy strategy for sand replacement. Journal of Circular Economy, v. 4, n. 1, p. 265-291, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.55845/joce-2026-41256>. Acesso em: 29 mar. 2026.

WĘDRYCHOWICZ, M. *et al.* Recycling of electrical cables: current challenges and future prospects. Materials, v. 16, n. 20, p. 1-18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16206632>. Acesso em: 29 mar. 2026.

ZUQUETTE, Lázaro Valentin (org.). Geotecnia ambiental. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 416 p. ISBN 978-85-352-8058-6.