

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALLYSON MACIEL LIMA

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE GARRAFAS PET RECICLADAS
TRITURADAS NA CONFECÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Delmiro Gouveia - AL

2023

ALLYSON MACIEL LIMA

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE GARRAFAS PET RECICLADAS
TRITURADAS NA CONFECÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Alexandre Nascimento de Lima.

Delmiro Gouveia – AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

L732a Lima, Allyson Maciel

Análise do aproveitamento de garrafas PET recicladas trituradas na confecção de tijolos de solo-cimento / Allyson Maciel Lima. - 2023. 92 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2023.

1. Construção civil. 2. Resíduos sólidos. 3. Tijolo de solo-cimento. 4. Garrafas PET. 5. Reciclagem. 6. Construções sustentáveis. 7. Sustentabilidade. I. Lima, Alexandre Nascimento de. II. Título.

CDU: 624.05

FOLHA DE APROVAÇÃO

ALLYSON MACIEL LIMA

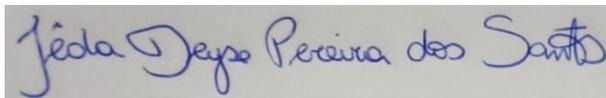
**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO DE GARRAFAS PET RECICLADAS
TRITURADAS NA CONFEÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 21 de julho de 2023.

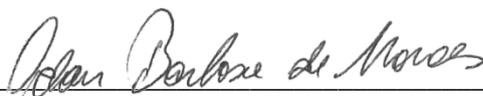


Orientador – Msc. Alexandre Nascimento de Lima, UFAL

Banca examinadora:



Examinadora Externa – Enga. Iêda Deyse Pereira dos Santos



Examinador Interno – Dr. Odair Barbosa de Moraes, UFAL

A Deus e sua infinita bondade, aos meus pais que não mediram esforços para concretização de um sonho, às minhas irmãs e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela graça da vida, da sabedoria e amor incondicional.

Aos meus pais, Marlene Maciel Lima e Acilon Ferreira Lima, por todo apoio, incentivo, companheirismo e ensinamento de valores.

Às minhas irmãs e sobrinhos, pelos fortes laços familiares, carinho e admiração.

A todos os professores que passaram por minha formação e compartilharam seus valiosos conhecimentos. Em especial ao Prof. MSc. Alexandre Nascimento de Lima, pela orientação, compreensão, confiança e dedicação para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Odair Barbosa de Moraes e a Engenheira Civil Iêda Deyse Pereira dos Santos por aceitarem participar da banca avaliadora.

Ao técnico do Laboratório de Solos e Materiais Arnon Berg, pela parceria e orientação na realização dos ensaios.

Aos estagiários do Laboratório de Materiais Lucas e Matheus, que me auxiliaram em algumas etapas dos experimentos.

Aos meus parceiros de jornada acadêmica, Eloyse Fernanda, Nadyne Barbosa, Iêda Deyse, Jefferson Gabriel e Kimberlly Geanne, por todo companheirismo, compartilhamento de conhecimentos e incentivo. A partilha dos desafios dessa jornada nos uniu cada vez mais. A construção de uma rede de motivação foi importante para as conquistas durante o curso. Quem acredita sempre alcança, o importante é não desistir!

Aos colegas de curso Saul, Arnon Berg, Mônica Costa, Erika Fernanda, Bruna Gomes, Karla Ketleen, Italo Barbosa, Maria Jaine, Jaine Freire, Maria Paula, Janiclea, Helen, Emanuel, Joyce Edra, Maxlander, Arthur e Isabelly Marília por toda a colaboração nos estudos e vivências acadêmicas.

Ao time Enactus Ufal Sertão e à Rede Enactus Brasil, que através de iniciativas empreendedoras com viés social, econômico e ambiental, me proporcionou uma das melhores experiências da jornada acadêmica. Esse programa foi a grande inspiração para a pesquisa deste trabalho.

À Universidade Federal de Alagoas, pela oportunidade do acesso ao ensino superior público e de qualidade.

Muito obrigado!

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre.”
(Paulo Freire, 1921 - 1997).

RESUMO

O descarte incorreto dos resíduos sólidos, em especial as garrafas PET, ainda é uma problemática no Brasil, causando um significativo impacto ambiental. Diante disso, surge a necessidade de reciclar esse resíduo, uma vez que essa prática traz benefícios para os meios ambiental, econômico e social. Em paralelo a isso, é possível identificar um crescente número de pesquisas aplicando a incorporação de resíduos na confecção de tijolos de solo-cimento, possibilitando construções mais sustentáveis. Neste contexto, este trabalho objetiva avaliar a adição de garrafas PET recicladas e trituradas (formato *flake*) na fabricação de tijolos ecológicos, seguindo as recomendações técnicas da NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 10833 (ABNT, 2013). Desse modo, foram confeccionados corpos de prova com 0%, 10%, 15% e 20% desse resíduo (*flake* de PET). Tijolos estes cujas dimensões são: 200 x 100 x 50 mm. Para análise dos resultados, foram realizados ensaios de caracterização do solo: determinação de impurezas orgânicas, granulometria e limites de consistência. Após tempo de cura, foram submetidos a ensaios de absorção de água, resistência à compressão simples e análise dimensional. Por sua vez, os resultados experimentais indicaram que o solo é adequado para confecção dos blocos de solo-cimento, quanto às condições de absorção de água e análise dimensional, foi verificado que estão de acordo com as exigências técnicas. Contudo, apresentaram valores não satisfatórios para resistência à compressão. Portanto, faz-se necessário o estudo do formato granulométrico do PET triturado para futuras pesquisas e melhores resultados.

Palavras-chave: resíduos sólidos; garrafas PET; reciclagem; tijolo de solo-cimento; construções sustentáveis.

ABSTRACT

The improper disposal of solid waste, especially PET bottles, is still a problem in Brazil, causing a significant environmental impact. Given this, there is a need to recycle this waste, since this practice brings benefits to environmental, economic, and social environment. In line with this, it's possible to identify a growing number of researches applying the incorporation of waste in the manufacture of soil-cement bricks, enabling more sustainable constructions. In this context, this research aims to evaluate the addition of recycled and crushed PET bottles (flake format) in the manufacture of ecological bricks, following the technical recommendations of NBR 8491 (ABNT, 2012) and NBR 10833 (ABNT, 2013). Thus, specimens were made with 0%, 10%, 15% and 20% of this residue (PET flake). These bricks, whose dimensions are: 200 x 100 x 50 mm. To analyze the results, soil characterization tests were executed: determination of organic impurities, granulometry and consistency limits. After the curing time, they were submitted to tests of water absorption, simple compressive strength and dimensional analysis. On its turn, the experimental results indicated that the soil is appropriate for making the soil-cement bricks, in terms of the conditions of water absorption and dimensional analysis, it was verified that they are in accordance with the technical requirements. However, they presented unsatisfactory values for compressive strength. Therefore, it is necessary to study the granulometric format of crushed PET for future researches and better results.

Keywords: solid waste; PET bottles; soil-cement bricks; recycle; sustainable constructions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo Triple Bottom Line.....	22
Figura 2 - Casa construída com garrafas PET em Yelwa, Nigéria.....	40
Figura 3 - Residência do projeto idealizado por Antônio Duarte Gomes.	40
Figura 4 - Estados de Consistência do Solo.	41
Figura 5 - Curva de distribuição de tamanhos de partículas.	43
Figura 6 - Modelo Típico de Tijolo Ecológico.....	47
Figura 7 - Esquema procedimentos experimentais.....	49
Figura 8 - Solo a ser extraído.....	50
Figura 9 - a) Secagem do solo, b) Peneiramento solo bruto (4,8 mm).....	51
Figura 10 - Etapas reciclagem garrafas PET.	52
Figura 11 - a) Partes constituintes da garrafa PET, b) Representação real partes constituintes.	52
Figura 12 - a) Representação filetes PET, b) Flakes de PET, c) Armazenamento.....	53
Figura 13 - a) Solo utilizado para avaliação de impurezas orgânicas, b) Solo + hidróxido de sódio.....	54
Figura 14 - Solução obtida (1), solução padrão (2).	54
Figura 15 - a) Quarteamento manual, b) destorroamento, c) material para peneiramento.....	55
Figura 16 - a) Material passante (1), material retido (2) na peneira 2,00 mm, b) lavagem material retido na peneira 2,00 mm.	56
Figura 17 - a) Conjunto de Peneiras usado para peneiramento fino do solo, b) pesagem Peso das Cápsulas e Peso Bruto Seco em grama.	56
Figura 18 - a) Lavagem solo na peneira de nº 200, b) material retido peneiramento fino, c) material retido peneiramento grosso + peneiramento fino.	57
Figura 19 - a) Peneiramento, b) pesagem da amostra, c) organização dos materiais, d) execução do ensaio.	60
Figura 20 - Pequena bola da amostra assumindo o formato cilíndrico do gabarito.	61
Figura 21 - Pesagens flake de PET a) 10%, b)15%, c)20%.	63
Figura 22 - a) Proporção de materiais utilizados para o traço 2 (T2), b) mistura dos materiais na betoneira, c) verificação da umidade ótima.	64
Figura 23 - a) Prensa utilizada + inserção da mistura homogênea, b) 0%, c) 10%, d)15%, e)20%.....	64
Figura 24 - Molhagem dos tijolos confeccionados (0%).....	65

Figura 25 - Tijolo vazado de solo-cimento.....	66
Figura 26 - a) altura, b) diâmetro, c) largura d) comprimento, e) espessura parede.	66
Figura 27 - a) Corpos de prova (0%) em estufa, massa m_1 b) 10% c) 15% e d) 20%.....	67
Figura 28 - a) Corpos de prova imersos em água (20%), massa m_2 b) 10%, c) 15% e d)20%.	67
Figura 29 - a) corte do bloco de 20%, b) superfícies dos tijolos invertidas (15%), c) tijolos sobrepostos (0%), d) nivelamento corpo de prova (10%), e) CP's submersos (10%).	69
Figura 30 - Secagem do corpo de prova (15%) após 24h imerso em água, b) Medição das dimensões das faces do corpo de prova (10%).	69
Figura 31 - a) rompimento (0%), b) CP rompido (0%).	70
Figura 32 - Solução obtida (A), solução padrão (B).	71
Figura 33 - Visão corte tijolo de solo-cimento confeccionado pós cura (15%).	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Geração total de RSU (t/dia) nas regiões e Brasil, 2010 a 2018.....	29
Gráfico 2 - Massa de resíduos sólidos por tipo de tratamento, por ano.	29
Gráfico 3 - Potencial de redução das emissões de CO ₂ decorrentes do volume recuperado pelas cooperativas e associações de catadores, em toneladas de CO ₂ em 2021..	31
Gráfico 4 - Retomada da reciclagem de embalagens PET no Brasil.....	36
Gráfico 5 - Vendas do PET reciclado como matéria prima.....	37
Gráfico 6 - Aplicação do PET reciclado.....	37
Gráfico 7 - Curva granulométrica.....	73
Gráfico 8 - Limite de liquidez.	75
Gráfico 9 - Médias de absorção dos tijolos de solo-cimento.....	78
Gráfico 10 - Médias ensaio resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos gerais solo para fabricação tijolos de solo - cimento.....	46
Tabela 2 - Especificações Qualidade Tijolos Solo Cimento.	46
Tabela 3 - Tipos e dimensões nominais (mm).....	47
Tabela 4 - Proporção dos materiais utilizados.....	62
Tabela 5 - Determinação umidade hidrocópica do solo.....	72
Tabela 6 - Peneiramento grosso do solo.....	72
Tabela 7 - Peneiramento fino.....	73
Tabela 8 - Resumo caracterização do solo em estudo.	74
Tabela 9 - Dados das amostras do ensaio do LL.	75
Tabela 10 - Dados das amostras do ensaio do LP.	76
Tabela 11 - Índice de plasticidade do solo.	76
Tabela 12 - Absorção de água (0%).	77
Tabela 13 - Absorção de água (10%).	77
Tabela 14 - Absorção de água (15%).	77
Tabela 15 - Absorção de água (20%).	77
Tabela 16 - Dados resistências à compressão tijolos (0%).....	79
Tabela 17 - Dados resistências à compressão tijolos (10%).....	79
Tabela 18 - Dados resistências à compressão tijolos (15%).....	80
Tabela 19 - Dados resistências à compressão tijolos (20%).....	80
Tabela 20 - Análise dimensional dos tijolos (0%).....	82
Tabela 21 - Análise dimensional dos tijolos (10%).....	83
Tabela 22 - Análise dimensional dos tijolos (15%).....	83
Tabela 23 - Análise dimensional dos tijolos (20%).....	84
Tabela 24 - Resumo média dados obtidos para ensaio de análise dimensional.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomes comerciais, características e aplicações típicas para Poliésteres.	32
Quadro 2 - Propriedades do polietileno tereftalato de etileno - PET.....	33
Quadro 3 - Materiais utilizados.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONICE	Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CP	Cimento Portland
CP	Corpo de Prova
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
NP	Não Plástico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ONU	Organização das Nações Unidas
P.B.U	Peso Bruto Úmido
P.B.S	Peso Bruto Seco
PET	Polietileno Tereftalato
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
PVC	Policloreto de Vinilo
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SNIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
WCED	World Commission on Environment and Development

LISTA DE SÍMBOLOS

cm^3	Centímetro cúbico
CO_2	Gás carbônico
g	O grama
g/cm^3	O grama por centímetro cúbico
h	Umidade hidrocópica
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
mm	Milímetros
N	Newtons
t	Tonelada
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	198
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivo Geral	20
1.3	Objetivos Específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	222
2.1	Desenvolvimento sustentável e meio ambiente	222
2.2	Consumo sustentável	24
2.3	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 E 12	26
2.4	Gestão de resíduos sólidos no Brasil	28
2.5	Polietileno tereftalato (PET)	30
2.5.1	Definição, principais características e propriedades.....	30
2.5.2	Breve contexto histórico.....	32
2.5.3	Impactos ambientais resultantes do descarte incorreto das garrafas PET	34
2.5.4	Reciclagem embalagens PET	34
2.5.5	O PET na construção civil	38
2.6	Solo na construção civil	40
2.6.1	Solo cimento.....	42
2.6.1.1	Cimento Portland.....	44
2.7	Tijolos solo-cimento	44
2.7.1	Confecção tijolos solo-cimento	45
2.7.2	Inserção de resíduos aos tijolos de solo-cimento	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Caracterização da pesquisa	49
3.2	Etapas dos procedimentos experimentais	49
3.3	Materiais utilizados	50
3.3.1	Extração do solo	50
3.3.2	Secagem e Peneiramento do Solo.....	50
3.3.3	Cimento Portland.....	50
3.3.4	Preparação dos resíduos sólidos plásticos PET reciclados.....	50
3.4	Ensaio Caracterização do Solo	52
3.4.1	Determinação de impurezas orgânicas	52
3.4.2	Análise granulométrica.....	55
3.4.3	Limite de liquidez.....	59
3.4.4	Limite de plasticidade.....	60

3.4.5	Índice de plasticidade	60
3.5	Confeção dos tijolos de solo-cimento.....	61
3.5.1	Escolha do traço.....	61
3.5.2	Equipamentos utilizados.....	62
3.5.3	Mistura de Solo-cimento	62
3.5.4	Moldagem dos tijolos	64
3.5.5	Cura dos tijolos confeccionados	65
3.6	Análise dimensional dos tijolos.....	65
3.7	Ensaio de absorção de água	66
3.8	Ensaio de resistência à compressão simples	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	710
4.1	Caracterização do Solo	710
4.1.1	Determinação de impurezas orgânicas	710
4.1.2	Análise granulométrica.....	71
4.1.3	Limite de liquidez.....	74
4.1.4	Limite de plasticidade.....	75
4.1.5	Índice de plasticidade	76
4.2	Ensaio de absorção de água.....	76
4.3	Ensaio de resistência à compressão simples.....	78
4.4	Ensaio de análise dimensional.....	821
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A produção e destinação de resíduos sólidos é uma problemática enfrentada por muitas cidades do território brasileiro. Dentre esses resíduos, destacam-se as garrafas PET (Polietileno Tereftalato), cujo consumo é em grande escala, e acabam sendo descartadas no meio ambiente. Diante disso, faz-se necessária a conscientização da população sobre a importância da sustentabilidade ambiental, uma vez que reciclar e reutilizar são alternativas mais econômicas e viáveis para o aproveitamento desse resíduo.

Segundo dados do 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira da Indústria do PET (APINET, 2022), o país reciclou 56,4% das embalagens de PET descartadas pelos consumidores em 2021. O volume equivale a 359 mil toneladas do produto, 15,4% acima do registrado em 2019 (311 mil toneladas). Esses dados podem ser mais expressivos, com ações precisas para o aumento da reciclagem.

De acordo com o Ecycle (2021), existem no Brasil aproximadamente 500 empresas recicladoras que geram em torno de 11.500 trabalhos e um faturamento anual de 1,22 bilhão de reais. No entanto, 80% dessas empresas se encontram apenas na região sudeste, o que aponta a fragilidade desse tipo de atividade no Brasil como um todo. É necessária, portanto, a colaboração da sociedade com a coleta seletiva nos bairros e cidades. Isso, com o apoio de campanhas de conscientização e mobilização social.

Além da geração de trabalhos nas cooperativas de catadores de resíduos sólidos e nas empresas que atuam diretamente com o processo de reuso do PET, a reciclagem desse material favorece significativamente o meio ambiente. Uma vez que, quando não reciclado e ao chegar nos oceanos, a garrafa PET demora mais de 400 anos para se decompor. Durante esse processo, se transforma em microplásticos que são tóxicos para diversas espécies e são confundidos com alimentos, ocasionando morte de inúmeras espécies.

Por isso, é fundamental encontrar formas de reciclagem e reuso desse resíduo, de modo a garantir que sejam devidamente encaminhados sem causar prejuízos ao meio ambiente. Depois de recuperado e revalorizado, esse plástico vira matéria-prima para a fabricação de inúmeros produtos que atendem a indústria têxtil, automotiva, química e de novas embalagens etc.

A construção civil tem-se constituído, nos últimos anos, como o mais importante mercado dentre todos os atendidos pela indústria plástica e incalculáveis são as possibilidades de uso do plástico como material de construção. Seu uso vai desde o PVC (Policloreto de vinilo), *fiberglass* (plástico obtido pela combinação do vidro com resina poliéster), etc. As

pesquisas efetuadas pela indústria plástica destinam-se, principalmente, à melhoria das qualidades físico-mecânicas, afim de que o material possa tornar-se realmente competitivo, tanto em preço, como em qualidade, com os demais materiais de construção (BAUER, 2008).

Em função da preservação ambiental e de uma maior preocupação com a sustentabilidade, vêm-se buscando alternativas inteligentes e inovadoras que possam contribuir para o futuro do planeta Terra. Partindo dessa premissa, a confecção de tijolos ecológicos promove impacto ambiental positivo, reduzindo o consumo de materiais diversos na área de construção e aplicando conceitos de sustentabilidade na sua fabricação e durante a execução da obra.

Sendo constituídos de solo, cimento e água, compactados em prensa hidráulica ou manual, permitem a adição de resíduos, sem a perda de características essenciais. Ademais, estudos tem levado a análises de diversos tipos de resíduos como matéria prima para confecção de diversos produtos da construção civil.

1.1 Justificativa

Diante dessa perspectiva, o presente trabalho visa estudar a adição do resíduo plástico PET reciclado triturado na confecção de tijolos ecológicos. Desse modo, avaliá-lo como alternativa sustentável e inovadora para o setor da Construção Civil, viabilizando, assim, uma nova alternativa de utilização desse resíduo. Isso, com o intuito de fortalecer as propriedades do tijolo ecológico (também chamado de solo-cimento), estabelecida pela NBR 8492 (ABNT, 2013).

1.2 Objetivo Geral

Analisar a utilização do polietileno tereftalato (PET) reciclado, triturado no formato *flake*, na produção de tijolos de solo-cimento. Com a adição desse material, verificar as condições técnicas necessárias para a viabilidade do seu emprego na construção civil. A partir disso, contribuir também para a sustentabilidade ambiental.

1.3 Objetivos Específicos

- Confeccionar tijolos de solo-cimento que assumam características compatíveis às exigidas pela NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 10833 (ABNT, 2013);

- Analisar o comportamento físico e mecânico dos tijolos de solo-cimento com adição de 10%, 15% e 20% do resíduo sólido PET reciclado;
- Verificar a viabilidade técnica da utilização desse resíduo na confecção de tijolos de solo-cimento para utilização na construção civil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados conhecimentos necessários para uma melhor compreensão da proposta apresentada neste trabalho, destacando-se a sustentabilidade, meio ambiente, dados importantes sobre a gestão dos resíduos sólidos no Brasil, com ênfase no Politereftalato de etileno – PET, sua reciclagem, características e propriedades. Outrossim, a confecção de tijolos ecológicos e a possibilidade de inserção desse resíduo para melhorias técnicas, como resistência à compressão e absorção de água. Por fim, a abordagem sobre o uso do PET na construção civil.

2.1 Desenvolvimento sustentável e meio ambiente

Segundo o Relatório de Brundtland (1987), o desenvolvimento sustentável tem a seguinte definição: “suprir as necessidades da geração presente sem afetar a possibilidade das gerações futuras de suprir as suas”. Tal definição popularizou-se com o passar dos anos, sendo utilizada por governos, empresas e outras organizações.

O princípio da sustentabilidade pode também ser aplicado na rotina diária do nosso lar, bairro, cidade e seu exercício está diretamente conectado com a busca do que atualmente chamamos de ecologicamente correto, economicamente viável e socialmente justo (ARANTES *et al*; 2012). Dessa forma, a busca pelo desenvolvimento sustentável está diretamente ligada ao tripé relacionado com o social, o ambiental e o econômico, denominado *Triple Bottom Line* (Figura 1).

Figura 1 - Modelo *Triple Bottom Line*.



Fonte: MAIOLI (2012).

De acordo com Savitz e Weber (2007), o modelo *Triple Bottom Line* foi proposto por John Elkington em 1994, no qual considera, além da dimensão econômica, as dimensões sociais e ambientais das organizações. Ou seja, para ser sustentável, uma empresa deve ser financeiramente viável, socialmente justa e ambientalmente responsável.

Dessa forma, as empresas passam a efetuar inovação para melhoria dos processos produtivos, a gerar valor na cadeia produtiva, alcance de um consumo consciente e, através de um pós-consumo, o descarte correto de produtos e embalagens que contribui para a gestão sustentável. Esta gestão sustentável tem como objetivo reduzir os impactos ambientais, gerar riqueza, valor e atender aos anseios sociais que compõem esse tripé (BARBIERE *et al.*, 2010).

Ademais, o conceito *Triple Bottom Line* reforça a necessidade das empresas de basearem suas decisões estratégicas no tripé da sustentabilidade. Isto é, reforça a ideia de que elas deverão manter a sustentabilidade econômica do negócio ao gerenciar empresas lucrativas e geradoras de valor. Ademais, a sustentabilidade social deve ocorrer, estimulando atividades ligadas à educação, cultura, lazer, bem-estar e justiça social da comunidade onde a empresa está inserida. Tudo isso mantendo o cuidado com o meio ambiente através de ações ambientais como programas permanentes de reciclagem, preservação, etc (PAZ *et al.*, 2015).

Em suma, a estratégia de Sustentabilidade tem três focos principais de atuação: o desenvolvimento de empreendedores mirando a inclusão digital, comercial e financeira; o empoderamento das comunidades onde a empresa opera por meio de programas de educação e tecnologia e a redução dos impactos ambientais a partir da medição da pegada de carbono e da regeneração e conservação dos biomas (CATHERINE, 2022).

É importante destacar que o desenvolvimento sustentável é uma temática que não faz parte apenas do cotidiano empresarial que utilizam recursos naturais nos seus processos produtivos. “A partir das últimas décadas, este assunto se tornou tão relevante na sociedade, que até empresas de pequeno porte ou aquelas que não produzem resíduos que geram poluição em grande escala também aderiram à esta tendência” (STADLER, 2012). A busca pela sustentabilidade é um processo. Dessa forma:

Para ser sustentável, uma empresa ou empreendimento tem que buscar, em todas as suas ações e decisões, em todos os seus processos e produtos, incessante e permanentemente, a ecoeficiência. Vale dizer, tem que produzir mais e melhor com menos: mais produtos de melhor qualidade, com menos poluição e menos uso dos recursos naturais. E tem que ser socialmente responsável: toda empresa está inserida num ambiente social, no qual influi e do qual recebe influência. Ignorar essa realidade é condenar-se a ser expulsa do jogo, mais cedo ou mais tarde (ALMEIDA, 2002, p.34).

As afirmações desses autores levam sobretudo à preocupação com a questão ambiental. Produzir produtos de melhor qualidade com menos emissão de poluentes no meio ambiente é uma difícil tarefa a ser cumprida por grande parte das empresas. É válido considerar que o impacto ambiental causado por tal ação pode ser caracterizado pela perda de biodiversidade, mudanças climáticas, deterioração do sistema hídrico, entre outros prejuízos para a fauna e flora.

A questão ambiental deve ser pauta nas tomadas de decisão empresarial no que diz respeito à utilização de energia limpa, destinação consciente de resíduos sólidos e industriais, utilização de matéria prima com certificações de procedência, busca por canais de distribuição menos poluidores, incentivos ao consumo consciente, etc (ARANTES et al., 2012).

Segundo Godinho (2009), a educação ambiental se mostra necessária para modificar esse quadro de crescente degradação socioambiental. Sendo necessária a implementação de atividades práticas e rotineiras que venham a auxiliar a formação e conscientização do ser humano, para que assim possa compreender a atual realidade e formar conceitos valorizando a preservação ambiental. O âmbito escolar, por exemplo, é uma ótima ferramenta de promoção da cidadania e respeito ao meio ambiente, uma vez que, propicia ao homem uma visão crítica, global e uma posição participativa e consciente na proteção ao meio ambiente.

Portanto, é de significativa importância a implementação de políticas públicas capazes de desenvolver a conscientização e a mudança dos valores, voltada para a educação ambiental sustentável. Grandes empresas responsáveis pela produção de bens de consumo, por exemplo, precisam desenvolver técnicas de reciclagem e reutilização, dentre outras medidas capazes de promover a sustentabilidade e, com isso, garantir a preservação do meio ambiente, necessário para sobrevivência de todas as espécies.

2.2 Consumo sustentável

A proposta para um mundo sustentável vem sendo discutida há mais de seis décadas, e pouco foi efetivamente definido, tanto nas questões teóricas quanto nas práticas. O que se observa é a responsabilização do consumidor para com a sustentabilidade, pela adoção de comportamentos, como a economia de energia, água, etc (MOURA, 2021).

Ribeiro (2011), afirma que o consumo sustentável está relacionado à economia de recursos como água e energia, utilização cuidadosa de materiais e equipamentos até o fim de sua vida útil. Ainda assim, envolve a busca por produtos e serviços ecologicamente corretos, a

reutilização sempre que possível e a correta destinação de materiais para reciclagem no fim do ciclo de vida dos produtos.

Infelizmente, o consumo sustentável não é tão significativo como o consumismo capitalista e isso reflete em diversos impactos ambientais. As políticas públicas que visam estimular a conscientização ambiental não obtêm sucesso se o Estado não oferecer alternativas viáveis como instrumento de mudança desse comportamento. Contudo, os interesses das sociedades capitalistas são obstáculos para o despertar desse modelo sustentável de consumo.

As principais causas da deterioração ininterrupta do meio ambiente mundial são os padrões insustentáveis de consumo e produção, especialmente nos países industrializados. Motivo de séria preocupação, tais padrões de consumo e produção provocam o agravamento da pobreza e dos desequilíbrios (Agenda 21,1995, pg.33).

O trecho anterior, retirado da Agenda 21 (1995), que é definida como um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, evidencia a necessidade de conciliação entre as áreas social, ambiental e econômica para promover um desenvolvimento sustentável e contínuo. Ou seja, embora o consumo seja um dos principais motores para a economia das nações, é vital levar em conta seus impactos sobre a natureza, adequando-o para prevenir a deterioração do planeta.

As inovações tecnológicas, por exemplo, são relevantes na análise da relação entre consumo e bem-estar. Diversas inovações tecnológicas contribuíram para a mudança das práticas de consumo e para novos estilos de vida centrados nas questões ambientais. É válido citar, como exemplos, fontes de energia para aquecimento e iluminação residencial, painéis solares, energia eólica, novas tecnologias de informação e comunicação (Cruz e Katz-Gerro, 2016).

Segundo Kantar (2022a) – empresa global de pesquisas e *insights* – 99% dos brasileiros declararam que querem ter um estilo de vida sustentável, mas apenas 14% estão realmente mudando o seu comportamento. A pesquisa ainda revela que cerca de 75% dos entrevistados querem fazer mais pelo planeta, mas o alto custo de vida os impede e 43% dizem não saber onde encontrar produtos sustentáveis, nem quais hábitos adotar para ajudar mais.

Esse alto custo de vida diz respeito muitas vezes aos preços inacessíveis para o consumidor ser mais sustentável. Diante de tal cenário, faz-se necessário que os consumidores façam escolhas para equilibrar o orçamento. Como resultado disso, acabam deixando de lado as preocupações com produtos sustentáveis.

A 4ª Edição do estudo *Who Cares, Who Does?*, também realizada pela Kantar, mostra que, no ano de 2021, o engajamento voltado para a sustentabilidade estava otimista globalmente, no entanto, avançava com menos força na América Latina. Já neste ano, pela primeira vez, os *EcoActives* (denominação dada para os consumidores que trabalham constantemente para diminuir os níveis de resíduos plásticos e para proteger o meio ambiente) estão em declínio.

Paralelamente, os *EcoDismissers* (têm pouco ou nenhum interesse pelos desafios ambientais do planeta e não estão fazendo nada para mudar esta postura) estão aumentando mundialmente, e isso acontece em todos os países, sendo a maior queda registrada na Espanha. Entre as maiores preocupações mencionadas pelos entrevistados, estão a guerra que ocorre na Ucrânia, a economia global e os impactos da inflação.

Apesar de a maioria dos consumidores alegar ter preocupação em comprar produtos mais sustentáveis, com embalagens que respeitam o meio ambiente (54,6%), produzidos localmente (43,2%) ou com embalagens recicláveis (48,7%), no geral, menos de 30% tomam atitudes efetivas sobre plásticos em suas compras. Por outro lado, cerca de 44% tentam comprar embalagens ecologicamente corretas, mas apenas 9% evitam regularmente embalagens plásticas, por exemplo (KANTAR, 2022b).

Ademais, a reciclagem de resíduos sólidos ainda é mal compreendida pelo consumidor. A pesquisa descrita anteriormente também cita que cerca de 40% dos entrevistados não sabem como descartar seus resíduos em casa por não entender as etiquetas ou não encontrar as informações nas embalagens.

Diante do exposto, é indiscutível que o consumidor assume um papel fundamental no alcance do consumo sustentável. Exercitar o hábito de, antes de comprar qualquer coisa, questionar se realmente o produto adquirido é necessário. Ou seja, estabelecer uma distinção entre necessidades e desejos. Uma vez que as necessidades estão relacionadas a tudo que é indispensável, como por exemplo: alimentação, moradia digna, vestuário, etc.), enquanto os desejos têm origem psicológica e são infinitos.

2.3 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 E 12

Alinhado ao desenvolvimento desde trabalho, é de suma importância citar os ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Produção Sustentáveis). Ambos com a preocupação de proteger o planeta da degradação, por meio do consumo e da produção sustentáveis, da gestão sustentável dos seus recursos naturais e de medidas urgentes para

combater a mudança global climática, para que seja possível atender às necessidades das gerações presentes e futuras.

Dentre as metas estabelecidas pelo ODS 11, é válido destacar a meta 11.3 (ONU) que afirma: “Até 2030, aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, em todos os países.” (ONU BRASIL, 2022).

A meta nacional 11.3 busca dar destaque à participação no planejamento e na gestão das políticas voltadas para urbanização sustentável. No contexto global, a preocupação parece estar centrada no espraiamento urbano, ou seja, cidades com grandes extensões territoriais e com baixa densidade, cujas características tendem a aumentar a dependência de transporte individual motorizado e os custos de construção de redes de infraestrutura e prestação de serviços públicos. Essa noção de sustentabilidade urbana sugere que, se as áreas urbanas já construídas fossem mais intensamente ocupadas/adensadas, as cidades seriam mais compactas e os deslocamentos menores e menos poluentes (IPEA, 2019).

Cidades sustentáveis, portanto, buscam a conscientização e o auxílio dos seus habitantes por meio de programas que divulguem informações de seu desenvolvimento seja por meio de conferências ambientais ou por meio da mídia; para que se melhore o meio ambiente e a qualidade de vida, ao mesmo tempo em que se desenvolva uma economia que sustente a prosperidade dos sistemas humanos e dos ecossistemas (Maulen *et al.*, 2019).

Quanto ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), suas metas visam a promoção da eficiência do uso de recursos energéticos e naturais, da infraestrutura sustentável, do acesso a serviços básicos. Além disso, o objetivo prioriza a informação, a gestão coordenada, a transparência e a responsabilização dos atores consumidores de recursos naturais como ferramentas chave para o alcance de padrões mais sustentáveis de produção e consumo.

Dentre as metas estabelecidas por esse objetivo, é importante destacar a 12.5, que afirma: “Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso” (ONU BRASIL, 2022). Os termos "Redução, reciclagem e reuso" referem-se ao princípio dos 3R's, apresentado na Agenda 21: redução do uso de matérias-primas e energia e do desperdício nas fontes geradoras, reutilização direta dos produtos, e reciclagem de materiais.

Das iniciativas existentes para a implementação do ODS 12, destaca-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010). Ela é primordial para solucionar o problema crônico e emergencial da destinação dos resíduos no país. Tem como

princípios a prevenção e a precaução, o desenvolvimento sustentável e uma visão sistêmica, que considera a esfera ambiental, mas também a social, a cultural, a econômica, a tecnológica, entre outras, que estão relacionadas com a produção, o descarte e a destinação adequada de resíduos sólidos.

2.4 Gestão de resíduo sólidos no Brasil

A NBR 10004 (ABNT, 2004) define os resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, pg.01).

As garrafas PET, resíduos de enfoque desta pesquisa, são classificadas como Resíduos classe IIA – não inertes, ou seja, aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos ou de resíduos classe IIB – inertes. Esses resíduos podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

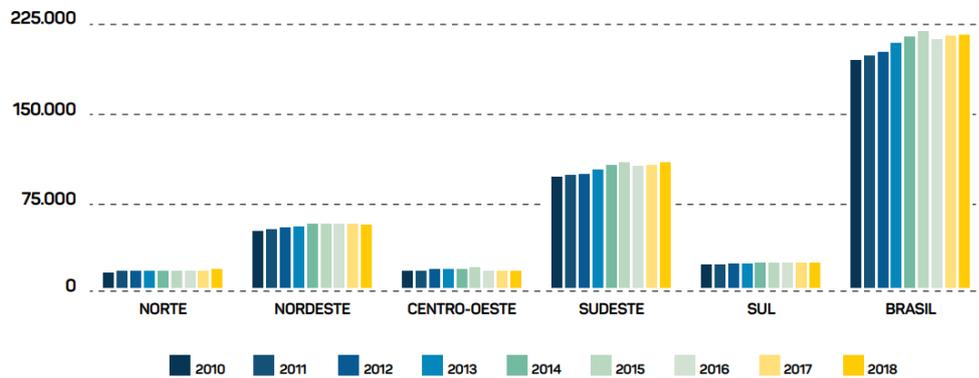
O manejo dos resíduos sólidos depende de vários fatores, dentre os quais devem ser ressaltados: a forma de geração, acondicionamento na fonte geradora, coleta, transporte, processamento, recuperação e disposição final (SCHALCH *et al.*, 2002). Diante disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) abrange todas as classes de resíduos sólidos e estabelece um conceito moderno e avançado de gestão de resíduos, com instrumentos que preveem a hierarquização das atividades e prioridade em prevenção e redução na geração de lixo.

Segundo dados do Relatório Nacional de Resíduos Sólidos (SNIR, 2019), 19 estados (70,37%) possuem Planos estaduais elaborados segundo a PNRS e 2487 municípios com planos municipais (44,65%). É sabido que o crescimento acelerado e desordenado das cidades brasileiras, associado ao consumo, em larga escala, de produtos industrializados e descartáveis, tem causado um aumento expressivo na quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU (PLANSAB, 2019).

Esses resíduos são provenientes de atividades domésticas em residências urbanas (resíduos domiciliares) e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (SNIR, 2019). No Gráfico 1, é notável que, no período

compreendido entre 2017 e 2018, houve aumento na geração de RSU em todas as regiões e, segundo o Panorama da ABRELPE 2018/2019, a geração foi de 79 milhões de toneladas de RSU no país, com aumento de quase 1% em relação ao ano anterior. Trazendo para dados mais atualizados, referentes ao ano de 2022 (APRELPE, 2022), a geração de RSU no Brasil alcançou um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias.

Gráfico 1 - Geração total de RSU (t/dia) nas regiões e Brasil, 2010 a 2018.

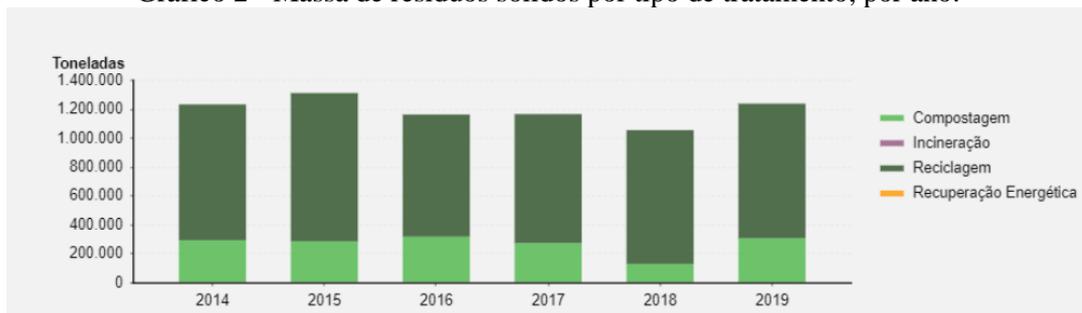


Fonte: ABRELPE (2022).

Com isso, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia. Em 2018, como mostra o Gráfico 1, foram registrados em torno de 216 mil toneladas diárias (APRELPE, 2018). Dessa forma, comparando com os dados do ano de 2022, houve um aumento, mas não tão significativo.

Com o intuito de reduzir o volume de resíduos e estimular o aproveitamento econômico, além da coleta seletiva e posterior reciclagem, algumas tecnologias podem ser adotadas como mostra o Gráfico 2. Para tratamento dos orgânicos, por exemplo, as mais utilizadas são compostagem e incineração, ainda pouco adotadas no Brasil (SINIR, 2019).

Gráfico 2 - Massa de resíduos sólidos por tipo de tratamento, por ano.



Fonte: SINIR (2019).

No ano de 2019, de um total de 65,1 milhões de toneladas de RSU coletados, 1,04 milhões de toneladas (Gráfico 2) foram recuperados pelo processo de reciclagem (SNIS, 2019). Comparado com o ano de 2018, de um total de 62,8 milhões de toneladas coletadas, apresentou em torno de 1,05 milhões de toneladas recuperadas pelo mesmo processo (SNIS, 2018). Assim, houve um leve aumento de 0,95%.

Atualizando esses dados para o ano de 2022, os materiais recicláveis secos (compostos por plásticos, papel e papelão, vidros, metais e embalagens multicamadas), representam aproximadamente 33,6% de todo o resíduo gerado no Brasil, correspondendo a cerca de 27 milhões de t/ano (ABRELPE, 2022).

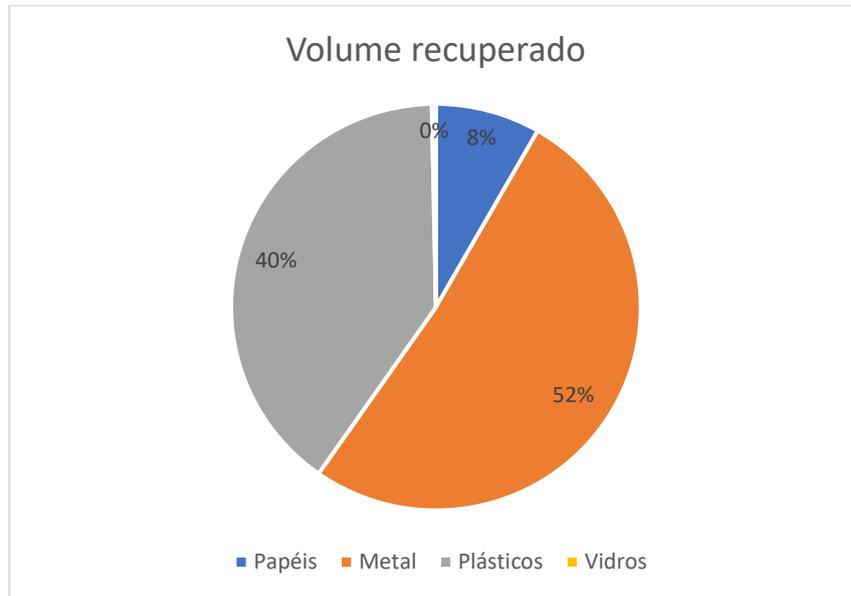
De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINIS, 2018), dos 69,8 milhões de toneladas coletados no Brasil, 75,6% tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários, 13% para lixão e 11,4% para aterro controlado. Todavia, segundo a APRELPE (2022), de um total de 76,1 milhões de toneladas coletadas, 61% continua sendo encaminhada para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada.

O Portal da Sustentabilidade (2022) destaca que áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada.

É de suma importância salientar que a diminuição das emissões de gases do efeito estufa é uma das principais motivações para a implementação e ampliação de programas de coleta seletiva de resíduos sólidos. Um dos fatos curiosos sobre a coleta de RSU, diz respeito ao plástico, que foi o segundo material mais coletado no ano de 2021 com 93,1 mil toneladas e que emprega fundamentalmente petróleo e energia elétrica como matérias-primas, gerando uma economia potencial de 46,6 mil toneladas de petróleo e de 493,9 milhões de kWh de energia elétrica (PIZA *et al.*, 2022).

No ano de 2021, a recuperação e destinação para reciclagem estimadas em 1,12 milhões de toneladas de resíduos sólidos pode ter reduzido a emissão de gás carbônico (CO₂) em até 873.451 toneladas (Gráfico 3), mantendo a proporção por material, sendo 449.323 toneladas pela coleta de resíduos metálicos, 348.992 de plástico, 72.303 de papel e 2.833 de vidro. Considerando a amostra de organizações que declararam a quantidade recuperada por tipo de material, a margem de erro é de 4% (SNIS, 2021).

Gráfico 3 - Potencial de redução das emissões de CO₂ decorrentes do volume recuperado pelas cooperativas e associações de catadores, em toneladas de CO₂ em 2021.



Fonte: Adaptado de PIZA *et al.*, (2022).

Em síntese, é de um benefício significativo uma boa gestão de resíduos sólidos, dentre os quais destacam-se em termos: ambientais, climáticos, sociais, de saúde e econômicos. Dessa forma, o descaso e a indiferença com esse setor de fundamental importância para o futuro do país não deve prevalecer. Infelizmente, o Brasil ainda convive com problemas de descarte indevido de resíduos e coleta seletiva incipiente em muitas regiões.

Portanto, acompanhar e incentivar o trabalho das associações, cooperativas e colaboração da sociedade em separar os resíduos sólidos é extremamente necessário. Isso, com a disponibilidade dos recursos para investimento na construção das infraestruturas necessárias para a adequação da separação, destinação adequada de resíduos, plantas de triagem, unidades de tratamento biológico, aterros sanitários, etc. Além de que é indispensável a disponibilidade de recursos para custeio integral e continuado das operações do setor.

2.5 Polietileno tereftalato (PET)

2.5.1 Definição, principais características e propriedades

De acordo com a ABIPET (2022) Polietileno tereftalato ou simplesmente PET, é um polímero termoplástico da família dos poliésteres, formado pela reação do Ácido Tereftálico

(PTA) e Monoetilenoglicol (MEG). Suas principais características são a transparência e a resistência, tanto mecânica quanto química. Ou seja, como material de embalagem atende inúmeras exigências técnicas e de saudabilidade, protegendo diversos alimentos e bebidas com muita eficiência.

Callister e Rethwisch (2016), afirmam que os plásticos são materiais com alguma rigidez estrutural sob carga e são empregados em aplicações de uso geral (Quadro 1). Polietileno, polipropileno, poliestireno, e os fluoro carbonos, epóxis, fenólicos e poliésteres podem, todos, ser classificados como plásticos. Eles apresentam uma ampla variedade de combinações de propriedades.

Ainda segundo a ABIPET (2022), o PET proporciona alta resistência mecânica (impacto e estrutural) e química, suportando o contato com agentes agressivos, além de possuir excelente barreira para gases e odores. Portanto, é capaz de conter os mais diversos produtos com total higiene e segurança para o produto e para o consumidor.

Em síntese, dentre os benefícios e características da embalagem PET, é possível citar (ABIPET, 2022): transparência e brilho, leveza e resistência, inerte, 100% reciclável, capacidade de gerar diversas aplicações ambientalmente corretas e facilidade de processamento de diferentes geometrias.

Quadro 1 - Nomes comerciais, características e aplicações típicas para Poliésteres.

Tipo de Material	Nomes Comerciais	Principais Características de Aplicação	Aplicações Típicas
Poliésteres (PET ou PETE)	Crystar Dacron Eastapak HiPET Melinex Mylar Petra	Um dos filmes plásticos mais tenazes; excelentes resistências à fadiga e ao rasgamento, e resistência a umidade, ácidos, graxas, óleos e solventes.	Filmes orientados, vestimentas, cabos de pneus de automóveis, recipientes de bebidas.

Fonte: adaptado Callister e Rethwisch (2016).

Diante das propriedades que o PET possui (Quadro 2), ele é tipicamente empregado em garrafas de bebidas, filmes flexíveis para embalagens, frascos, filamentos para a indústria têxtil, tecidos e malhas, peças automotivas, chapas termo formadas e diversos produtos reciclados (SOARES, 2021).

Quadro 2 – Propriedades do polietileno tereftalato de etileno - PET.

Classificação	Polímero de engenharia
Origem	Sintético (poli condensação do ácido tereftálico + etileno glicol)
Comportamento mecânico	Termoplástico
Organização molecular	Semicristalino
Densidade (sólido)	1,36 g/cm ³
Contração volumétrica	0,2% a 2,0%
Temperatura de Transição vítrea (Tg)	70 °C
Temperatura de Fusão (Tm)	260 °C
Temperatura de processamento	Extrusão (260 a 280 °C), injeção (260 a 290 °C)
Temperatura de uso contínuo	Até 140 °C

Fonte: adaptado Soares (2021).

2.5.2 Breve contexto histórico

Segundo a ABIPET (2022), o Polietileno tereftalato, iniciou sua trajetória na indústria têxtil, no qual a primeira amostra da resina foi desenvolvida pelos ingleses Whinfield e Dickson, em 1941. Durante a Segunda Guerra Mundial, gerou o desabastecimento de vários setores, incluindo a indústria têxtil, que na época ainda se baseava em fibras como algodão, linho, lã, entre outras.

A partir da invenção desse polímero, foi possível criar as “fibras têxteis de poliéster”, que até hoje estão presentes em diversos artigos de vestuário, cama, mesa, banho e até industriais, como pneus, lonas, etc. As primeiras embalagens de PET surgiram nos Estados Unidos e logo após na Europa no início dos anos 1970 (PETRY, 2012).

Desde então, a evolução tecnológica permitiu a construção de fábricas com capacidades que se multiplicavam a cada década. No Brasil, o PET chegou apenas em 1988, também para aplicações na indústria têxtil. A partir de 1993 começou a ser utilizado na fabricação de bebidas e, por conta dos baixos custos de produção, praticidade e leveza, rapidamente tomou o lugar da garrafa de vidro retornável, muito comum na época (ECYCLE, 2022).

Atualmente, é comum encontrar no Brasil e no mundo unidades produtivas com capacidade em torno de 500 mil toneladas/ano. A fabricação de pré-formas e garrafas passou por transformações mecatrônicas, resultando em verdadeiros robôs que produzem dezenas de

milhares de unidades por hora, conquistando, assim, espaço em diversos segmentos de bebidas e alimentos, tais como: refrigerantes, água, óleo, sucos, lácteos, temperos, detergentes, desinfetantes, álcool gel, etc (ABIPET, 2022).

2.5.3 Impactos ambientais resultantes do descarte incorreto das garrafas PET

Pesquisas demonstram que o plástico, incluindo o PET, é o principal poluente encontrado nos oceanos. Esse material se decompõe em pequenas partículas plásticas, chamadas de microplásticos, que absorvem compostos tóxicos e são ingeridas por peixes e outros seres aquáticos.

Esses microplásticos, menores que cinco milímetros, possuem a capacidade de absorver compostos químicos tóxicos como os poluentes orgânicos persistentes (POPs). A intoxicação causada pelos POPs é de caráter bioacumulativo e biomagnificado, o que significa que ao se alimentar de um animal intoxicado, o predador também passa a sofrer do mesmo problema. É um problema que pode afetar tanto pessoas, que podem se alimentar de peixes contaminados, quanto o meio ambiente, podendo causar um desequilíbrio na cadeia alimentar (ECYCLE, 2021).

Externa à vida aquática, diversas aves e mamíferos marinhos também podem morrer por conta do material, seja enroscando seus bicos ou outra parte do corpo na garrafa, seja consumindo suas partículas. Além disso, o descarte incorreto desse resíduo sólido polui as cidades e contribui diretamente para o aumento das enchentes e a formação de lixões em terrenos baldios, contaminação do solo e comprometimento de lagos e rios. Ademais, causa diversos transtornos à população, que sofre com a presença de ratos, baratas e diversos outros animais transmissores de doenças.

2.5.4 Reciclagem embalagens PET

Conforme Piza *et al.* (2022), a ampliação da reciclagem traz um triplo benefício (*Triple Bottom Line*): ambiental, pois reduz o descarte inadequado e minimiza a extração de recursos naturais; econômico, uma vez que faz girar a economia com novos recursos; e, por fim, social, já que permite a inclusão social de trabalhadores, cuja atividade é reconhecidamente um diferencial em diversas cidades que, com a vigência do Planares ou PNRS, deverão proceder à contratação e a devida remuneração pelos serviços prestados.

No que diz respeito à Economia, a indústria recicladora do PET no Brasil é economicamente viável, sustentável e funcional. Seu crescimento anual constante permite planejar novos investimentos, incrementados e incentivados pela criação de novos usos para o PET reciclado. Quanto ao meio ambiente, seus altos índices de reciclagem potencializam muitos benefícios, pois a matéria-prima reciclada substitui material virgem em muitas aplicações, nos segmentos mais diferentes, como novas embalagens, inclusive para uso em alimentos (*food grade*), têxtil, construção civil, tintas e vernizes, produção de automóveis e caminhões, entre outros (ABIPET, 2022).

De acordo com a ABIPET (2022), a reciclagem acontece em três etapas básicas: recuperação – inicia-se no momento do descarte e termina com a confecção do fardo de garrafas prensadas, que se torna material comercializável; revalorização – com início na compra dos fardos até o final na produção de matéria-prima reciclada; transformação – final do processo completo de reciclagem, é a utilização da matéria-prima oriunda das garrafas de PET pós-consumo para a fabricação de inúmeros produtos.

Valora (2021), destaca cinco etapas principais para reciclagem: descarte, coleta, triagem, destinação e beneficiamento. Um processo que envolve cidadãos e consumidores, as indústrias, as cooperativas de reciclagem, os operadores privados, os catadores independentes e os recicladores. No descarte, sua origem vem de dois grandes grupos: o das empresas e o dos indivíduos (consumidores).

A ABIPET (2022) considera a coleta de forma seletiva e de forma dirigida. No que diz respeito à coleta seletiva, alguns municípios têm sistemas de coleta para os resíduos sólidos urbanos. Isto significa que o cidadão deveria ser orientado a separar seu lixo, acondicionando em recipientes diferentes, em dias diferentes também, o lixo orgânico dos recicláveis (papel, vidro, lata, os plásticos e o PET). Esse material já separado pode então ser comercializado, obtendo recursos que financiam todo o processo.

Já na coleta dirigida, há conscientização da população local para a separação de determinados materiais recicláveis, entregando-os a pontos de coleta ou aguardando a data fixada para a coleta domiciliar. Destacam-se as cooperativas de catadores, empresas que se encarregam de arregimentar um número de trabalhadores encarregados de coletar de diferentes formas o material desejado e entidades de assistência social.

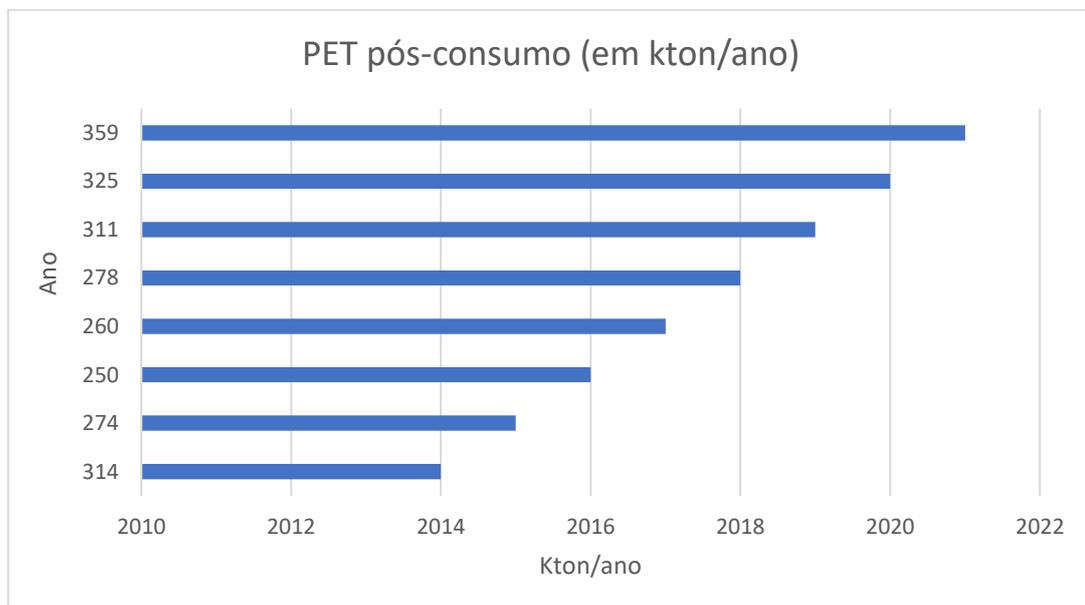
Na 3ª etapa, triagem, as cooperativas e a maioria das empresas que comercializam a sucata trabalham com vários materiais recicláveis além das garrafas de PET. Inicialmente, todos esses produtos são separados por material: metais, plásticos, vidros, etc. Dentro desses

grupos há nova separação entre as variedades de cada material. Entre os plásticos são separados PET, Polietileno, Polipropileno e todos os outros (ABIPET, 2022).

Na penúltima etapa, os materiais da mesma categoria são agrupados e prensados para reduzir o seu tamanho e facilitar o transporte até o reciclador final. O reciclador é quem compra o material das cooperativas, remunerando o trabalho feito até então e gerando renda para as cooperativas e para muitos trabalhadores que dependem da reciclagem. Já na última etapa, todo o material retorna à indústria para passar por um processo chamado beneficiamento, que o transforma de novo em matéria-prima.

Como já citado inicialmente neste trabalho, de acordo com o 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, 359 mil toneladas de embalagens PET pós-consumo receberam a destinação adequada, um crescimento de 15,4% sobre o volume registrado em 2019, último período em que o levantamento havia sido realizado pela ABIPET. Naquele ano, 311 mil toneladas, ou 55% das embalagens PET descartadas foram recicladas (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Retomada da reciclagem de embalagens PET no Brasil.

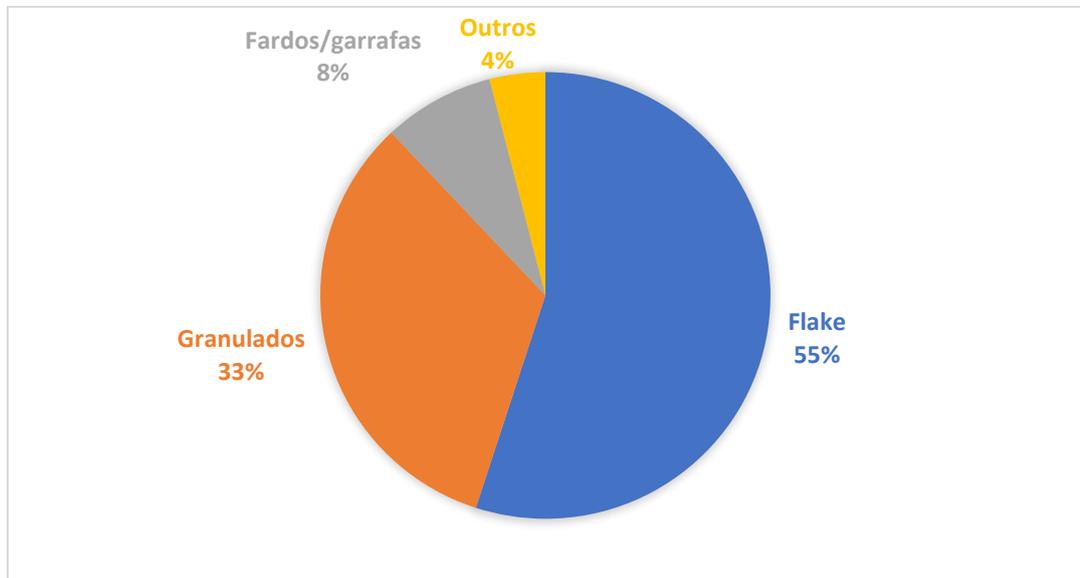


Fonte: adaptado ABIPET (2022).

É válido destacar o processo de revalorização para identificar uma etapa central da reciclagem em que as garrafas descartadas após o consumo se tornam matérias-primas para as diversas cadeias produtivas, agregando novo valor à sociedade. A indústria de reciclagem de PET evoluiu muito nos últimos anos e atualmente existem várias tecnologias disponíveis, desde as mais simples que abrangem apenas as etapas de moagem e lavagem, até as mais sofisticadas contemplando etapas de lavagem, descontaminação, extrusão, granulação e pós-

condensação. No Gráfico 5 é possível verificar dados sobre a venda dessas matérias-primas tão agregadoras para novas cadeias de produção (ABIPET, 2022).

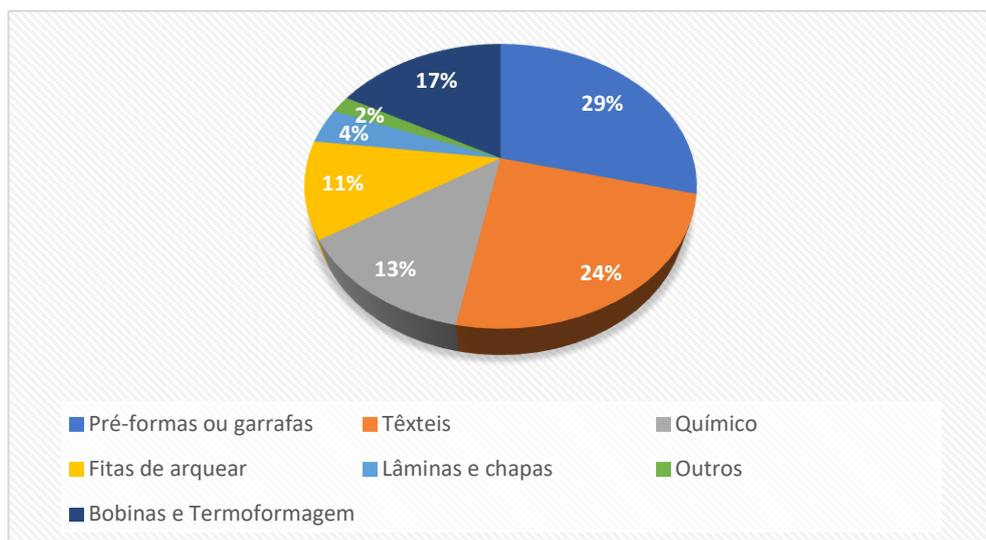
Gráfico 5 - Vendas do PET reciclado como matéria prima.



Fonte: adaptado ABIPET (2022).

Curiosamente, o formato *flake* é o mais vendido. Nesse formato as garrafas são “cortadas” em pequenas partículas e foi este o formato escolhido para ser utilizado na fabricação dos tijolos ecológicos dessa pesquisa. Felizmente, o PET reciclado e essas novas matérias primas geram inúmeros produtos, como pode ser verificado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Aplicação do PET reciclado.



Fonte: adaptado ABIPET (2022).

Através de um processo de laminação, revestimentos ou partes estruturais de móveis de escritório ou residenciais já utilizam chapas fabricadas com PET reciclado. Já a bobina é utilizada para transporte de cartões bancários, cartões de visita e pode ser desenrolada e cortada em partes que podem ser usadas para diversos fins, entre elas as “*face-shields*”, máscaras para proteção facial, displays, embalagens dobráveis, cantoneiras, etc (ABIPET, 2022).

As aplicações têxteis, que representa 24%, como mostra o Gráfico 6, permitem, a partir de um processo especial de extrusão e fiação, a produção de fibras de poliéster usando como matéria-prima as garrafas recicladas. Tais fibras têm inúmeras aplicações, desde roupas, edredons, travesseiros até mantas geotêxteis, que ficam invisíveis sob o solo, mas que cumprem funções importantes.

Tintas e vernizes (13%) para vários fins usam o PET reciclado em suas composições. As fitas de arquear (11%) são muito utilizadas para a amarração de fardos de algodão, papelão, couro, assim como paletes. Celulares, peças automotivas, partes plásticas para geladeira e fogões, cabides, suporte para vassouras, displays, são exemplos de peças técnicas produzidas com PET reciclado. Tubos e conexões para esgotamento predial ou irrigação rural, são produzidos como os tubos e conexões tradicionais, entretanto, sua matéria-prima é o PET reciclado, ambientalmente correto (ABIPET, 2022).

À vista disso, é essencial a existência do crescente engajamento da população, o apoio governamental e o custeio dos serviços para o crescimento dos números de reciclagem no Brasil. O processo de reciclagem tem inúmeras vantagens como visto anteriormente e contribui de forma significativa para benefício do meio ambiente e pro desenvolvimento social de muitas famílias que tem essa fonte de renda. Esse processo de formação de uma sociedade sustentável refletirá nas futuras gerações e esse exercício não pode ser falho.

2.5.5 O PET na construção civil

O PET na construção civil já vem sendo utilizado em produtos como caixas d'água, tubos, conexões, torneiras, piscinas, telhas, bancadas, pias, tintas, vernizes e atualmente na união ao concreto armado (MACHADO & OLIVEIRA, 2014). Na fabricação de tijolos, por exemplo, um material obtido a partir do PET triturado com areia, vidro e outros materiais é aquecido e misturado em uma máquina chamada creponeira. A partir desse processo, é obtida uma massa muito semelhante ao asfalto. Esse novo composto é colocado em moldes que pode ser usado como blocos para pisos de calçadas, meios-fios, estacas e outros (SEBRAE, 2022).

Estudos para utilização desse resíduo como matéria-prima tem ocorrido em algumas universidades. Referente à utilização do PET na fabricação de blocos de concreto, uma estudante do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul desenvolveu uma pesquisa intitulada: “Caracterização física e mecânica de blocos vazados de concreto simples confeccionados com a adição parcial de resíduos plásticos pós-consumo: classificação”. Neste trabalho, a autora trouxe como proposta final a substituição de 15% de areia por garrafas PET moídas na produção de blocos de concreto (CREA-AL, 2019).

Outra pesquisa importante, realizada pelo Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica (CONICE), teve como foco analisar a substituição da areia utilizada para a confecção dos blocos de concreto por esse resíduo. Na ocasião, a equipe constatou que as peças, com adição de PET, ficavam padronizadas com poros mais bem preenchidos, menos permeáveis e mais resistentes a impactos. Por sua vez, o tijolo comum teve resultado de 1,10 MPa de resistência à flexão média. Já os tijolos ecológicos apresentaram 1,94 MPa. Ou seja, mais leves e resistentes (CREA-AL, 2019).

Sheri Koones, autora do livro “*Downsize: Living Large In a Small House*”, pesquisou nos Estados Unidos 33 modelos de unidades residenciais pré-fabricadas com até 70 m², construídas com sistemas alternativos, e que demonstraram o quanto podem ser confortáveis, práticas, sustentáveis e bonitas. Entre as analisadas, estavam as que utilizam fôrmas de PET reciclado que isolam o concreto. A tecnologia foi considerada a que melhor fornece isolamento térmico e acústico, de acordo com o estudo (SANTOS, 2020).

Para a construção de casas utilizando esse material, é válido levar em consideração que a ideia original vem do termo indiano “garrafa-tijolo”, tendo a execução dessa ideia pela Associação de Desenvolvimento de Energias Renováveis, em parceria com a *África Community Trust* em Yelwa, na Nigéria (Figura 2). Ela segue o modelo das construções convencionais do país, com formato arredondado. A fundação é de concreto e as paredes têm garrafas preenchidas com areia, colocadas lado a lado, e com fundos expostos (CREA, 2019).

Figura 2 - Casa construída com garrafas PET em Yelwa, Nigéria.



Fonte: (CREA, 2019).

No Brasil, um projeto do Estado do Rio Grande do Norte, idealizado por Antônio Duarte Gomes, construiu 40 residências com garrafas PET, como pode ser visto um modelo na Figura 3. As paredes foram preparadas em fôrmas, com pontos de saída de água e luz já pré-estabelecidos e não receberam reboco ou outro tipo de revestimento (TAGLIANI, 2017).

Figura 3 - Residência do projeto idealizado por Antônio Duarte Gomes.



Fonte: TAGLIANI (2017).

As garrafas PET tem demonstrado bastante resistência mecânica e térmica, o que as tornam fortes candidatas para serem utilizadas no ramo da construção civil. Alinhado a isso, o custo da edificação feita por PET é muito menor e os impactos ambientais causados por este material podem diminuir consideravelmente a partir da sua reciclagem e reutilização (GALLI, 2011).

2.6 Solo na construção civil

Como material de construção e de fundação, os solos têm grande importância para o engenheiro civil. Nas barragens de terra, nas fundações de estruturas e em outras aplicações na engenharia civil, o solo está sujeito a esforços que tendem a comprimi-lo e a cisalhá-lo, provocando deformações e podendo, eventualmente, levá-lo à ruptura. O estudo do comportamento do solo frente às solicitações a ele impostas por estas obras é, portanto, de fundamental importância (GRAIG, 2012).

Segundo Caputo (2016), os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formando-se os pedregulhos e areias e os siltes; em condições especiais, as argilas. Por decomposição química ocorre o processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. Seu principal agente é a água, e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, a hidratação, a carbonatação e os efeitos químicos da vegetação.

Sendo a umidade de um solo muito elevada, ele se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido. À medida que a água evapora, endurece. Para uma certa umidade $h = LL$ (*limite de liquidez*), perde sua capacidade de fluir. Contudo, pode ser moldado facilmente e conservar sua forma, agora no estado plástico. Perdendo a umidade, esse estado desaparece até que, para $h = LP$ (*limite de plasticidade*), o solo se desmancha. Este é o estado semi-sólido. A Figura 4 ilustra esquematicamente esses estados físicos, chamados estados de consistência, e suas fronteiras, ou seja, os limites de consistência (CAPUTO, 2016).

Figura 4 - Estados de Consistência do Solo.



Fonte: CAPUTO (2016).

No que diz respeito à natureza das partículas, sabe-se que o solo é formado por grãos minerais, podendo ter matéria orgânica. As frações grossas são predominantemente de grãos

silicosos, enquanto os minerais que ocorrem nas frações argilosas pertencem aos três grupos principais: caolinita, montmorilonita e illita.

A forma das partículas dos solos tem grande influência sobre suas propriedades. Distinguem-se principalmente em partículas arredondadas, com forma poliédrica; partículas lamelares, semelhantes a lamelas ou escamas e partículas fibrilares, características dos solos turfosos. As partículas arredondadas são as que predominam nos pedregulhos, areias e siltes. As lamelares são as que se encontram nas argilas. Essa forma das partículas das argilas responde por algumas de suas propriedades, como, por exemplo, a compressibilidade e a plasticidade, esta última uma das suas características mais importantes (CAPUTO, 2016).

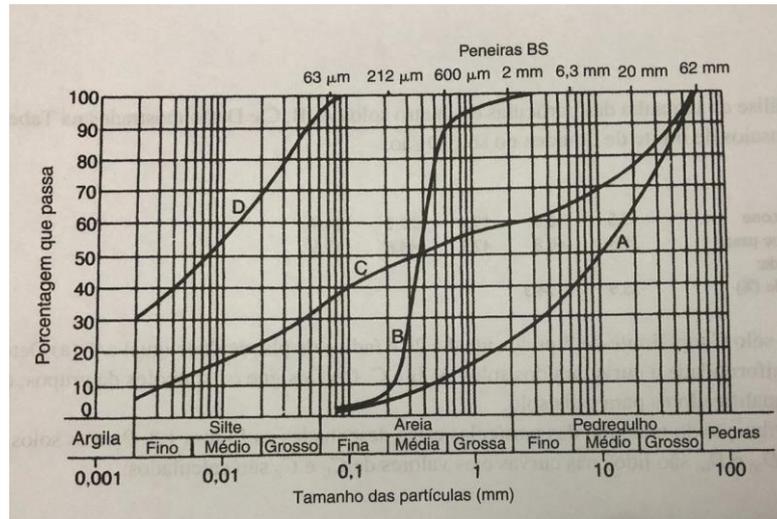
A análise do tamanho das partículas de uma amostra de solo envolve a determinação da porcentagem da massa das partículas dentro de diferentes faixas de tamanhos. Segundo Craig (2012), a distribuição de tamanho de partículas de um solo grosso pode ser determinada pelo método de peneiramento. A amostra de solo é passada através de uma série de peneiras padrão de testes com tamanho de malha sucessivamente menores.

A distribuição do tamanho das partículas de um solo é apresentada como uma curva em um gráfico semilogarítmico, com as ordenadas indicando a porcentagem de massa de partículas menores do que o tamanho especificado pela abscissa. Quanto mais achatada for a curva de distribuição, maior será a faixa de tamanhos de partículas no solo: quanto mais íngreme a curva, menor a faixa de tamanhos (CRAIG, 2012).

Craig (2012) acrescenta que um solo grosso é descrito como um solo bem graduado se não houver excesso de partículas em qualquer faixa de tamanhos e se não faltar nenhum tamanho intermediário. Em geral, um solo bem graduado é representado por uma curva de distribuição côncava e suave. Um solo grosso é descrito como mal graduado nas condições de solo uniforme e solo de graduação aberta.

O tamanho das partículas é representado em uma escala logarítmica de forma que dois solos que tenham o mesmo grau de uniformidade sejam representados por curvas de mesmo formato, independentemente de suas posições no gráfico de distribuição de tamanhos de partículas. O tamanho de partícula corresponde a qualquer valor especificado na tabela 'porcentagem que passa' pode ser lido da curva de distribuição de tamanhos de partículas (CRAIG, 2012). Na Figura 5 aparecem exemplos de distribuição de partículas.

Figura 5 - Curva de distribuição de tamanhos de partículas.



Fonte: CRAIG, (2012).

2.6.1 Solo cimento

Segundo Marril (1949), o solo-cimento nada mais é que a terra compactada à qual se introduziu uma pequena quantidade de cimento Portland para estabilizá-la. O efeito do cimento em uma mistura de terra serve para reduzir sua contração e, ao mesmo tempo, aumentar sua resistência.

Bauer (2008) afirma que vários fatores podem influenciar nas características do produto final do solo-cimento, dentre eles a dosagem do cimento, natureza do solo, teor de umidade e compactação ou prensagem. Já a coesão do solo-cimento é determinada pela constituição do cimento, sua finura, quantidade de água e a temperatura ambiente.

Silva (2005) defende que a mistura homogeneizada, compactada e curada de solo, cimento Portland e água em proporções adequadas à finalidade de uso apresentada sob a consistência de uma “farofa” pode ser usada na execução de fundações, contrapisos, paredes monolíticas, tijolos e blocos. Pode ser aplicada ainda na construção de casas, escolas, postos de saúde e outras unidades comunitárias. A boa qualidade e o bom desempenho deste material podem ser comprovados através das obras construídas e dos trabalhos técnicos.

Dentre as vantagens da utilização do solo cimento Silva (2015) destaca: tecnologia simples, de fácil assimilação do processo construtivo; apresenta boas condições de conforto térmico e acústico; grande durabilidade e manutenção reduzida, visto que, por apresentar elevada resistência e boa impermeabilidade, as construções com ele executadas são muito duráveis, resistindo ao longo dos anos ao desgaste e à umidade.

2.6.1.1 Cimento Portland

O cimento é tecnicamente definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo inicial de “pega” e outras substâncias que determinam o tipo de cimento. O clínquer é o resultado da mistura de calcário, argilas e, em menor proporção, minério de ferro submetida a um processo chamado clinquerização (GRANDE, 2003).

Os vários tipos de cimento são classificados no Brasil pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) onde são nomeados pela sigla CP seguidos de um número romano de I a V de acordo com sua composição. Pode também ser adicionada na sua classificação a resistência mínima à compressão em MPa por valores iguais a 25, 32 e 40 alcançado após um período de cura de 28 dias (ABCP, 2018).

O Cimento Portland Composto CP II-E, CP II-Z e CP II-F tem adições de escória, pozolana e fíler, respectivamente, mas em proporções um pouco maiores que no CP I e no CP I-S. O Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e o Cimento Portland Pozolânico (CP IV) contam com proporções maiores de adições: escória, de 35% a 75% (CP III), e pozolana, de 15% a 50% (CP IV).

O conhecimento dos processos e produtos formados pela hidratação do cimento é de suma importância para o uso prático do cimento Portland, pois as reações químicas que ocorrem simultaneamente e o representam, interferem umas nas outras. O comportamento da hidratação que corresponde à velocidade, distribuição e formação dos produtos hidratados, por exemplo, é função do tamanho dos grãos do cimento, temperatura, quantidade de água disponível e procedimentos de mistura (GRANDE, 2003).

Portanto, o correto entendimento dos tipos de cimento e suas propriedades tecnológicas, significa ampliar as possibilidades de desenvolvimento do solo-cimento, na busca de um material de elevado desempenho.

2.7 Tijolos de solo-cimento

A crescente exploração mineral vem alertando as autoridades e a população para as atividades da indústria da construção civil. Por essa razão, seguir princípios de desenvolvimento sustentável, utilizando tecnologias que priorizem a prevenção, redução, reutilização e reciclagem de materiais está alinhado com os princípios atuais mais valorizados (RESELLI, 2021).

Belém *et al.* (2016), definem que os blocos de solo-cimento são também conhecidos como BTC (Bloco de Terra Comprimida), ou também como tijolos ecológicos. Eles são fabricados com solo adensado em molde por meio de compactação ou prensagem, seguido de seu desmolde imediato. Os blocos não passam pelo processo de queima durante sua fabricação, e são uma das alternativas de menor custo e menor agressão ao meio ambiente na construção de alvenarias estruturais e autoportantes aparentes.

Segundo Carvalho & Poroca (1995), as paredes construídas com tijolos de solo-cimento prensados têm comportamento térmico e durabilidade equivalentes às construídas com blocos cerâmicos. Outrossim, os tijolos de solo-cimento podem ser utilizados em alvenaria de vedação ou estrutural, desde que atendam as resistências estabelecidas nos critérios de projeto.

Conforme Santos *et al.* (2009), a confecção do tijolo de solo-cimento trata-se de uma técnica revolucionária por ser uma maneira inteligente de construir, rápida, ecológica, sendo absolutamente resistente a todos os padrões exigidos pelas Normas Técnicas. Ademais, esse tipo de tijolo possui características que proporcionam qualidade, solidez, beleza, e economia no custo total da obra.

2.7.1 Confecção tijolos solo-cimento

Conforme Grande (2003), as etapas do processo para a confecção dos tijolos de solo-cimento, são:

- Preparação do solo: onde o solo é destorroado e peneirado;
- Preparo da mistura: o cimento é adicionado ao solo e realiza-se uma homogeneização dos materiais secos. Em seguida, adiciona-se água e mistura ao material até obter um ponto uniforme de umidade em toda a massa;
- Moldagem dos tijolos: pode ser realizada em prensas manuais, hidráulicas ou mecânicas, onde ocorre a prensagem, fundamental para compactar os grãos de solo;
- Cura: tempo no qual os tijolos adquirem resistência mecânica. Durante os sete primeiros dias e após 6 horas de moldados, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de molhagens sucessivas.

É importante destacar que o solo deve ser isento de matéria orgânica, por serem prejudiciais às propriedades do produto final, os tijolos. Torrões, pedregulhos e raízes devem ser retirados do solo, uma vez que reduzem as qualidades do bloco. O peneiramento torna-se então imprescindível para que tal condição seja cumprida (SILVA, 2005). Por isso, a NBR

10833 (ABNT, 2013) recomenda utilizar o solo que atenda à NBR NM 49 (ABNT, 2001), que trata da determinação colorimétrica de impurezas orgânicas em agregado miúdo. Outras exigências da norma citada estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos gerais solo para fabricação tijolos de solo - cimento.

CARACTERÍSTICA	REQUISITOS (%)
Material que passa na peneira com abertura de malha de 4,75 mm	100 %
Material que passa na peneira com abertura de malha 75 µm	0 % a 50 %
Limite de liquidez	≤ 45 %
Índice de plasticidade	≤ 18 %

Fonte: adaptado NBR 10833 (ABNT, 2013).

Complementar às características vistas anteriormente, a NBR 8491 (ABNT, 2012) define as especificações da Tabela 2:

Tabela 2 - Especificações de qualidade de tijolos de solo-cimento.

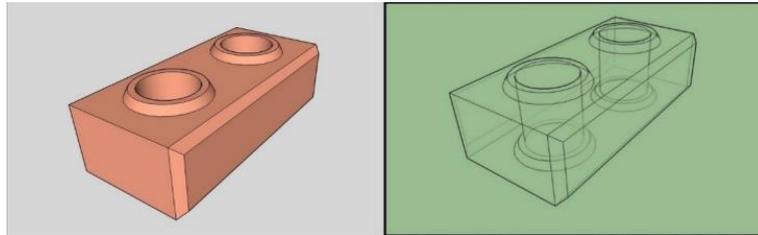
Característica	Nº. Amostra	Requisitos
Variação dimensional	-	± 3mm
Resistência à compressão	10	≥ 2,0 MPa
		≥ 1,7 MPa
Absorção de água	3	≤ 20%
		≤ 22%

Fonte: adaptado NBR 8491(ABNT, 2012).

Os tijolos de solo-cimento mais utilizados no mercado brasileiro têm as medidas de 12,5x25x7 cm e 15x30x7 cm em largura, comprimento e espessura, respectivamente. Pesando entre 3 kg e 5 kg por peça, são fabricados em máquinas de acionamento mecânico/manual ou sistemas hidráulicos, que compactam o solo em moldes, definindo suas dimensões e formatos (RESELLI, 2021).

Dentre as vantagens já citadas, vale destacar a dispensa da quebra de paredes para passagem de instalações elétricas ou hidráulicas e por agilizar a execução da obra (ALROMA, 2021). Os modelos mais comuns possuem dois furos verticais com sistema de encaixe, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Modelo Típico de Tijolo Ecológico.



Fonte: RESTELLI (2021).

As dimensões nominais que os tijolos devem atender constam na NBR 8491 (ABNT, 2012), como podem ser verificadas na Tabela 3. Todavia, podem apresentar dimensões diferentes das estabelecidas nesta Tabela, desde que o tijolo permaneça com a altura (H) menor que a sua largura (L).

Tabela 3 - Tipos e dimensões nominais (mm).

Tipos	Comprimento	Largura	Altura
A	200	100	50
B	240	120	70

Fonte: adaptado NBR 8491 (ABNT, 2012).

Para esta pesquisa, os tijolos confeccionados foram os do tipo A. A norma citada anteriormente também destaca que, para este tipo, os tijolos devem ter eixo perpendicular à superfície de assentamento, a espessura mínima das paredes (e) no seu entorno deve ser de 25 mm e a distância mínima entre dois furos deve ser de 50 mm. Ademais, a amostra ensaiada de acordo com a ABNT NBR 8492 deve satisfazer as tolerâncias permitidas nas dimensões nominais dos tijolos de $\pm 1,00$ mm para o comprimento (C), largura (L) e altura (H).

2.7.2 Inserção de resíduos aos tijolos de solo-cimento

Existem diversos tipos de tijolos ecológicos que utilizam resíduos em sua fabricação, Nzambi Matee, por exemplo, é uma engenheira que desenvolveu um tijolo feito a partir de resíduos plásticos e areia, no qual a sua resistência é sete vezes maior que a do concreto. O processo de fabricação desse tijolo consiste na separação dos polímeros e, posterior aquecimento em altas temperaturas, sendo então misturados com areia, formando uma massa que é levada para a prensagem. A máquina utilizada nesse processo foi criada pela própria especialista exclusivamente para esse tipo de fabricação (LIMA *et al.*, 2021).

Miranda (2007) trouxe, em sua pesquisa, o estudo da viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento, com a finalidade de melhorar o desempenho do material, incorporando 5 %, 10 % e 15% de cimento e 0 %, 10 %, 15 % e 30 % de resíduo. A partir disso, ela concluiu que a adição do resíduo proveniente de beneficiamento de mármore e granito, possibilitou condições técnicas favoráveis para se produzir tijolos prensados de solo-cimento com qualidade e redução no consumo de cimento.

Mota *et al.* (2010) avaliaram o potencial do uso de resíduos de granito na produção de tijolos de solo cimento, no qual foi estabelecido o traço 1:9, subdividindo-o em 4 traços: 1:7:2, 1:6:3, 1:5:4 e 1:4,5:4,5 (cimento, solo e resíduo). O traço 1:6:3, do ponto de vista econômico, obteve o melhor resultado para o fator água/cimento, pois utilizou menor quantidade de água e manteve seu nível de absorção de água abaixo de 20 %.

Silva *et al.* (2021) trouxeram um estudo da viabilidade de utilização de garrafas PET trituradas na produção de tijolos ecológicos, mediante percentuais de substituição (20 %, 30 % e 50%) do solo. Para a realização da pesquisa foram produzidas amostras, uma com argila pura e outra com adição de garrafa PET triturada. Os tijolos foram submetidos à etapa de testes em laboratório seguindo as exigências da NBR 8492 (ABNT, 2012). Para tal, foi averiguado que o traço ideal foi o de 20%. Dessa forma, foi constatado que a adição de PET possibilitou condições técnicas para a produção dos tijolos ecológicos e contribuiu para reduzir o volume de garrafas no meio ambiente.

Pesquisas importantes também foram realizadas na UFAL Campus do Sertão. Neto, (2015), em sua monografia, avaliou algumas propriedades dos tijolos de solo-cimento produzidos com adição do resíduo de corte do mármore e granito (RCMG). Trabalhou com os traços de 5 %, 10 % e 15% desse resíduo, obtendo êxito nos ensaios realizados. Para tais destacaram-se o de resistência à compressão e absorção de água, onde tais resultados comprovaram por meios normativos a viabilidade da utilização desse resíduo na confecção de tijolos ecológicos.

Santos (2021) analisou o emprego do pó de pneu recauchutado na produção de tijolos de solo-cimento, bem como o seu comportamento físico-mecânico com adição de 5 % e 10 % desse resíduo. A partir dos ensaios realizados em laboratório, foi verificado que ambos os traços apresentaram resultados satisfatórios para a melhorias nas propriedades desses tijolos.

Assim sendo, essas pesquisas demonstraram resultados satisfatórios de acordo com as exigências normativas, demonstrando que a adição de resíduos possibilita melhorias nas propriedades técnicas dos tijolos de solo-cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado todo o procedimento metodológico para realização da pesquisa, descrevendo os ensaios, suas etapas, materiais e equipamentos utilizados nesse processo.

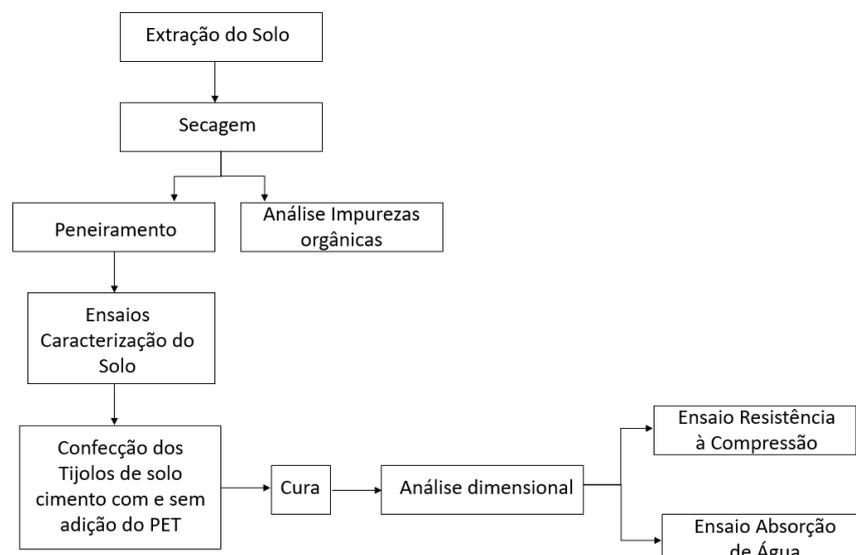
3.1 Caracterização da pesquisa

Para a realização deste trabalho, foi necessária revisão bibliográfica em livros, dissertações e artigos científicos familiares ao tema proposto. Ademais, todo o embasamento técnico advindo das NBR's (ABNT) para validação técnica dos ensaios realizados e posterior análise dos resultados.

3.2 Etapas dos procedimentos experimentais

A realização de todos os procedimentos experimentais pós extração do solo foi realizada no Laboratório de Materiais e Laboratório de Solos da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão. Tais ambientes dispuseram de equipamentos e materiais necessários para as atividades experimentais. No fluxograma da Figura 7 é possível verificar os principais processos para a confecção dos tijolos de solo cimento desta pesquisa.

Figura 7 - Esquema procedimentos experimentais.



Fonte: autor (2023).

3.3 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para o processo de confecção dos tijolos de solo-cimento estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3 - Materiais utilizados.

MATERIAL	DESCRIÇÃO
Solo	Passante na peneira de abertura 4,8 mm
Cimento Portland	CP II F 32MPa
Resíduos sólidos PET (formato <i>flake</i>)	Recortes no formato de flocos
Água	Laboratório de Materiais da UFAL - Campus do Sertão.

Fonte: autor (2023).

3.3.1 Extração do solo

O solo foi extraído da zona rural do Município de Água Branca/AL, no qual foi retirado de um horizonte com mais de 50 cm, objetivando uma coleta com pouca ou inexistente matéria orgânica (Figura 8).

Figura 8 - Solo a ser extraído.



Fonte: autor (2023).

3.3.2 Secagem e Peneiramento do Solo

Foi necessária a secagem do solo extraído para redução de sua umidade, visto que esse material, quando muito úmido é difícil de peneirar, dificultando a mistura com o cimento.

Dessa forma, o solo foi espalhado uniformemente sobre o chão no Laboratório de Materiais sob secagem ao ar. Após secagem do solo, foi realizado o peneiramento desse material desagregando-se também os grumos, conhecidos também como torrões - formados por distúrbios na massa de solo (Figura 9).

Figura 9 - a) Secagem do solo, b) Peneiramento solo bruto (4,8 mm).



Fonte: autor (2023).

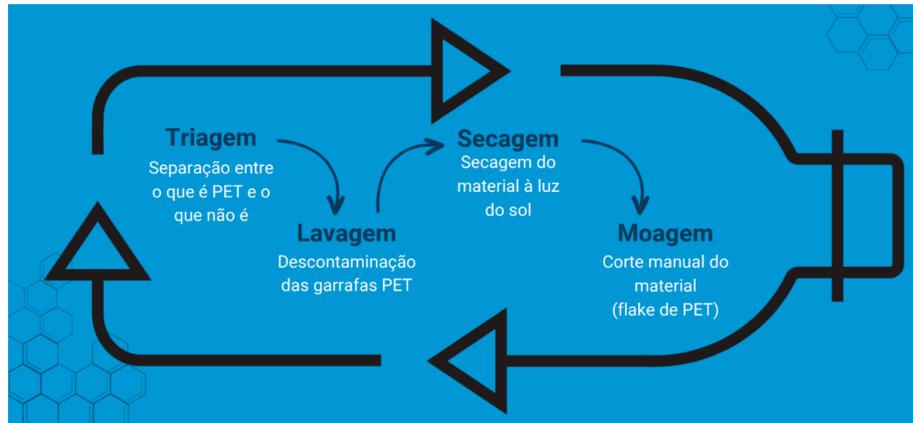
3.3.3 Cimento Portland

O cimento utilizado para a confecção dos tijolos de solo cimento desta pesquisa foi o CP II-F 32 MPa, que é um tipo de cimento para uso e aplicação em geral. Sendo ideal para utilização em estruturas de concreto armado, pavimentos de concreto, argamassa de chapisco, assentamento de blocos, revestimento, pisos e contrapisos, concreto protendido, pré-moldados e artefatos de concreto.

3.3.4 Preparação dos resíduos sólidos plásticos PET reciclados

Os resíduos sólidos plásticos (PET) reciclados utilizados passaram por um ciclo de preparação para obtenção da matéria prima (*flake*) conforme as etapas descritas na Figura 10.

Figura 10 - Etapas reciclagem garrafas PET.



Fonte: autor (2023).

- **Triagem:** nesta etapa da reciclagem, foi feita a identificação e separação das garrafas PET oriundas dos resíduos sólidos urbanos. Esse processo de triagem foi feito em conjunto com pequenos empresários, sendo eles vendedores de bebidas e donos de lanchonetes do município de São José da Tapera/AL, além de ter sido pego uma quantidade significativa de garrafas PET no Laboratório de Materiais do Campus do Sertão.
- **Lavagem:** todas as garrafas PET que passaram pela triagem foram lavadas com água corrente a fim de descontaminar o material de possíveis impurezas. Após a lavagem, foram retiradas as partes constituintes da garrafa PET denominadas “ombro” e “fundo”, uma vez que a parte utilizada para as próximas etapas tem a denominação de “corpo” (Figura 11).

Figura 11 - a) Partes constituintes da garrafa PET, b) Representação real partes constituintes.



Fonte: a) *Research Gate* (2014), b) autor (2023).

- **Secagem:** os “corpos” das garrafas PET foram expostos à luz solar para total secagem e assim seguir para a próxima etapa.
- **Moagem:** após secos, os “corpos” foram cortados em filamentos para assim serem triturados/cortados manualmente em pequenos flocos denominados *flakes* de PET. Dessa forma, tornando-se a matéria prima para a confecção dos tijolos ecológicos dessa pesquisa. É válido destacar que os *flakes* de PET foram armazenados em pote de plástico para posterior pesagem de acordo com a porcentagem do traço escolhido (Figura 12).

Figura 12 - a) Representação filetes PET, b) *Flakes* de PET, c) Armazenamento.



Fonte: autor (2023).

3.4 Ensaios Caracterização do Solo

Neste tópico, será mostrado todo o processo metodológico para a realização dos ensaios de caracterização do solo exigidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012), sendo eles: determinação de impurezas orgânicas, análise granulométrica e determinação do limite de liquidez e limite de plasticidade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos da UFAL Campus do Sertão.

3.4.1 Determinação de impurezas orgânicas

Para realização do ensaio foram seguidas as recomendações da NBR 17053 (ABNT, 2022), que estabelece o método de determinação colorimétrica de impurezas orgânicas em

agregado miúdo. Tal ensaio é de suma importância para avaliação da qualidade do solo a ser utilizado na confecção dos tijolos ecológicos, uma vez que, esse material com alto teor de impurezas orgânicas não deve ser utilizado para tal finalidade.

Inicialmente, foi pesado 200 g do solo passante na peneira 4,8 mm, em seguida, num frasco Erlenmeyer, foi adicionado os 200 g de agregado miúdo seco ao ar e 100 cm³ da solução de hidróxido de sódio (Figura 13). Foi agitado vigorosamente e deixado em repouso durante 24 h.

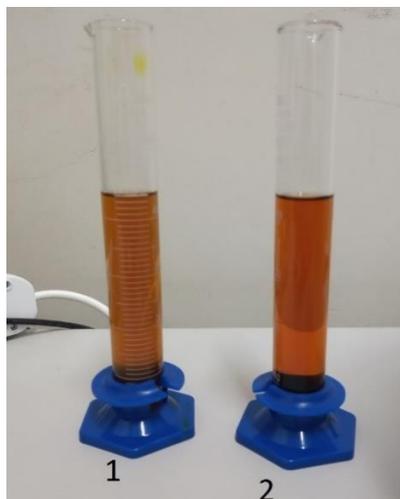
Figura 13 – a) Solo utilizado para avaliação de impurezas orgânicas, b) Solo + hidróxido de sódio.



Fonte: autor (2023).

Simultaneamente a esse procedimento, foi preparada uma solução padrão (97 cm³ da solução de hidróxido de sódio, 3 cm³ da solução de ácido tânico a 2%), no qual foi transferida para tubo de ensaio (Figura 14)

Figura 14 - Solução obtida (1), solução padrão (2).



Fonte: autor (2023).

Foi avaliada a quantidade de matéria orgânica comparando a cor da solução obtida com a da solução padrão. Quanto mais clara a solução, menor o teor de matéria orgânica, quanto mais próximo da cor da solução padrão, maior o teor de matéria orgânica.

3.4.2 Análise granulométrica

Para realização do ensaio foi seguida as recomendações da NBR 7181(ABNT, 2016), que estabelece o método para análise granulométrica de solos. Inicialmente foi feito o quarteamento manual, devido à ausência do repartidor de amostras. Após essa etapa, foi feito o destorroamento desse solo com o auxílio do almofariz e mão de gral. Passada essas etapas, foi pesada a massa de 1 kg de solo para ser utilizado no ensaio (Figura 15).

Figura 15 – a) Quarteamento manual, b) destorroamento, c) material para peneiramento.



Fonte: autor (2023).

Após a pesagem específica do solo, foi realizado o peneiramento grosso de forma manual, no qual foi passado todo esse material na peneira de abertura 4,8 mm e 2,0 mm. O material retido na peneira de 2,0 mm foi lavado em água corrente para a retirada de grãos finos aderentes. Esse material lavado retido na peneira 2,0 mm foi armazenado em estufa por no mínimo 12 h em temperatura entre 105 °C e 110 °C para posteriormente ser usado para o peneiramento fino (Figura 16).

Figura 16 - a) Material passante (1), material retido (2) na peneira 4,8 mm, b) lavagem material retido na peneira 4,8 mm.



Fonte: autor (2023).

Para a etapa de peneiramento fino foram utilizadas as peneiras de abertura 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. Foi necessária também a escolha de duas cápsulas enumeradas para realização da determinação da umidade hidrocópica, onde foram pesadas para obtenção do Peso da Cápsula, no qual logo após foi inserido solo. As cápsulas com solo foram levadas para estufa onde ficaram por 24 h para pesagem, tendo assim o Peso Bruto Seco (Figura 17).

Figura 17 - a) Conjunto de Peneiras usado para peneiramento fino do solo, b) pesagem Peso das Cápsulas e Peso Bruto Seco em grama.



Fonte: autor (2023).

O solo passante na peneira 2,00 mm foi colocado na peneira nº 200 para a realização da lavagem em água corrente. Todo o material retido nessa lavagem foi colocado em estufa

durante 24 h sob temperatura de 105 °C para a posterior realização do peneiramento fino. Após as 24 h, o material seco passou pelo peneiramento fino no conjunto de peneiras, onde foi pesado e anotado os valores de material retido em cada peneira (Figura 18).

Figura 18 - a) Lavagem solo na peneira de nº 200, b) material retido peneiramento fino, c) material retido peneiramento grosso + peneiramento fino.



Fonte: autor (2023).

Registrado todos valores das massas do material retido, foi construída a curva granulométrica a partir de todos os valores necessários para a construção do gráfico. Os valores que vão além dos encontrados nas pesagens de material retido, puderam ser obtidos através das Equações 1, 2 e 3.

- Cálculo da umidade hidrocópica (h), em gramas:

$$\text{Peso da água} = P.B.U - P.B.S \quad (1)$$

Onde:

$P.B.U$ = Peso Bruto Úmido;

$P.B.S$ = Peso Bruto Seco.

$$\text{Peso do solo seco (P.S.S)} = P.B.S - P.C \quad (2)$$

Onde:

$P.C$ = Peso da cápsula.

$$h (\%) = \frac{P.A}{P.S.S} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$P.A$ = Peso da água;

h = umidade hidrocópica do material passando na peneira de 2,00 mm.

Como foram pesadas amostras coletadas em duas cápsulas, foi necessário calcular a média entre ambas % para obtenção da umidade hidrocópica.

- **Peneiramento Grosso**

Os parâmetros para o peneiramento grosso são calculados conforme as Equações 4 e 5.

$$M_s = \frac{M_t - M_g}{(100 + h)} \times 100 + M_g \quad (4)$$

$$Q_g = \frac{M_s - M_i}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

M_s = massa seca, em gramas;

Q_g = porcentagem de material passando em cada peneira;

M_g = massa do material seco retido na peneira de 2,00 mm;

M_i = massa do material retido acumulado em cada peneira;

h = umidade hidrocópica do material passando na peneira de 2,00 mm.

- **Peneiramento fino**

- Os parâmetros para o peneiramento fino são calculados conforme a Equação 6.

$$Q_f = \frac{M_h \times 100 - M_i (100 + h)}{(M_h \times 100)} \times N \quad (6)$$

Onde:

Q_f = porcentagem de material passado em cada peneira;

M_h = massa do material úmido submetido ao peneiramento fino;

M_i = massa do material retido acumulado em cada peneira;

N = porcentagem do material que passa na peneira de 2,00 mm;

h = umidade hidrocópica do material passando na peneira de 2,00 mm.

3.4.3 Limite de liquidez

Para a realização deste ensaio, foi necessário seguir as recomendações da NBR 6459 (ABNT, 2016), que especifica o método para a determinação do limite de liquidez dos solos. Do quarteamo manual realizado no ensaio de granulometria e posterior destorroamento, foi realizado o peneiramento de parte desse material na peneira de nº 40 (0,42 mm). O solo passante foi utilizado para este ensaio, onde foi necessária uma amostra de 100 g

Desses 100 g de solo no recipiente foi adicionada água (em torno de 25 ml), realizando a homogeneização durante um intervalo de 15 a 20 min. Essa quantidade de água foi adicionada objetivando encontrar um ponto de umidade no aparelho Casagrande, no qual possa ser aplicado em torno de 35 golpes. Realizada a homogeneização, o material foi transferido para o aparelho Casagrande manual devidamente calibrado para preenchimento da sua concha, ocupando assim cerca de $\frac{3}{4}$ do aparelho.

Logo após, com o auxílio do cinzel, foi feita uma ranhura no meio desse preenchimento, dividindo-o assim em duas partes. Em seguida, foi realizado o movimento da manivela para aplicação dos golpes até que as partes separadas se juntassem por uma extensão de cerca de 13 mm.

Foi feita a contagem do número de golpes e registrado. Das partes que se tocaram foi coletada uma pequena quantidade (cerca de 4 a 8 g) e transferida para cápsula devidamente pesada. Dessa forma, foi realizada a pesagem da cápsula com o material inserido, recebendo a denominação de Peso Bruto Úmido. Em seguida, tal cápsula foi transferida para estufa, onde permaneceu durante 24 h.

Após esse tempo, realizou-se nova pesagem, sendo considerado Peso Bruto Seco. Foi repetido esse processo para 5 amostras, retirando o material do aparelho e colocando de volta no recipiente para nova homogeneização, dessa vez com cerca de 1 ml de água. Tais repetições foram necessárias para coleta de dados para construção do gráfico.

Figura 19 - a) Peneiramento, b) pesagem da amostra, c) organização dos materiais, d) execução do ensaio.



Fonte: autor (2023).

- Para construção do gráfico foram necessários os seguintes dados:
 - N° de golpes;
 - Peso Bruto Úmido (P.B.U);
 - Peso Bruto Seco (P.B.S);
 - Tara da Cápsula (T.S) ou Peso da Cápsula (P.C);
 - Peso da Água (P.A), cujo meio de obtenção de valor é o mesmo da Equação 1;
 - Peso do Solo Seco (P.S.S), cujo meio de obtenção de valor é o mesmo da Equação 2;
 - Umidade (%), cujo meio de obtenção de valor é o mesmo da Equação 3.

3.4.4 Limite de plasticidade

Para a realização deste ensaio, foi necessário seguir as recomendações da NBR 7180 (ABNT, 2016). Esta norma especifica o método para a determinação do limite de plasticidade e para o cálculo do índice de plasticidade dos solos. Foram utilizadas placa de vidro de superfície esmerilhada, gabarito de 3 mm de diâmetro e comprimento de 10 cm e 50% do solo preparado no ensaio anterior devidamente homogeneizado com água. Além disso, 5 cápsulas com pesos de tara registrados.

Inicialmente, com a palma da mão foi feita uma bolinha (formato de brigadeiro) com 10 g desse solo, afim de retirar o excesso de água desse material. Feito isso, a bolinha foi

colada na placa de vidro de superfície esmerilhada, onde foram feitos movimentos com a palma da mão aberta até a bolinha atingir o formato do gabarito (Figura 20). As dimensões do gabarito precisam ser atingidas para o êxito do ensaio.

Figura 20 - Pequena bola da amostra assumindo o formato cilíndrico do gabarito.



Fonte: autor (2023).

Quando o cilindro apresentou fragmentação, foi transferida as partes deste para cápsula devidamente pesada e direcionada para estufa, permanecendo lá por 24 h. Todo o processo descrito foi repetido 5 vezes para obtenção dos valores para determinação da umidade. Para determinação do Limite de Plasticidade (L.P) são necessários os dados a seguir, sendo o L.P corresponde à média dos valores de umidade obtidos.

- Peso Bruto Úmido (P.B.U);
- Peso Bruto Seco (P.B.S);
- Tara da Cápsula (T.S) ou Peso da Cápsula (P.C);
- Peso da Água (P.A), cujo meio de obtenção de valor é o mesmo da Equação 1;
- Peso do Solo Seco (P.S.S), cujo meio de obtenção de valor é o mesmo da Equação 2;
- Umidade (%), cujo meio de obtenção de valor é o mesmo da Equação 3.

3.4.5 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade dos solos deve ser obtido utilizando a Equação 7:

$$IP = LL - LP \quad (7)$$

Onde:

IP: índice de plasticidade;

LL: limite de liquidez;

LP: limite de plasticidade.

O resultado final é expresso em % e quando não for possível determinar nenhum dos limites, classificar como não plástico (N.P).

3.5 Confeção dos tijolos de solo-cimento

Nesse tópico será relatado como foram produzidas as amostras já dentro dos parâmetros compatíveis à análise do solo. Para as etapas descritas posteriormente, foi consultada a NBR 10833 (ABNT, 2012), norma que estabelece os requisitos para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento em prensa manual ou hidráulica.

3.5.1 Escolha do traço

Na etapa de dosagem da matéria-prima, correspondendo ao solo e cimento, foi utilizada a proporção 1:10 (1 referente ao cimento, 10 referente ao solo). Observando a Tabela 4, 18 L de solo, correspondem a 1,8 L de cimento (sabendo que a proporção é 1 para 10). Quanto à adição do *flake* de PET, as porcentagens escolhidas foram 10 %, 15 % e 20%.

Tabela 4 - Proporção dos materiais utilizados.

Traço	Solo (L)	Cimento (L)	Água (L)	Flake de PET (%)
T0	18	1,8	3,5	0
T1	18	1,8	3,5	10
T2	18	1,8	3,5	15
T3	18	1,8	3,5	20

Fonte: autor (2023).

Na Figura 21, é possível verificar as pesagens em massa dos *flakes* de PET

Figura 21- Pesagens *flake* de PET a) 10%, b)15%, c)20%.



Fonte: autor (2023).

3.5.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados para os processos que foram desde a moldagem até o rompimento dos corpos de prova foram:

- Betoneira;
- Balança Marte capacidade 4200 g \pm 0,01g;
- Estufa elétrica;
- Maquita;
- Paquímetro digital;
- Peneira n° 4 (4,8 mm);
- Prensa manual mecânica de fabricação de tijolos ecológicos;
- Prensa de compressão.

3.5.3 Mistura de Solo-cimento

Para esta etapa, o solo utilizado já seco ao ar, foi passado na peneira de n° 4 e transferido para baldes correspondentes a 18 L. Organizado os materiais, foi realizada a mistura a seco do solo e cimento na betoneira, adicionando-se água aos poucos até atingir o ponto de umidade ótima. Para averiguar tal umidade, manualmente foi preenchida a mão com o solo-cimento já úmido, pressionando-a. Posterior, a massa foi dividida em duas partes sem esfarelar, revelando assim o ponto ideal da umidade (Figura 22).

Figura 22 - a) Proporção de materiais utilizados para o traço 2 (T2), b) mistura dos materiais na betoneira, c) verificação da umidade ótima.

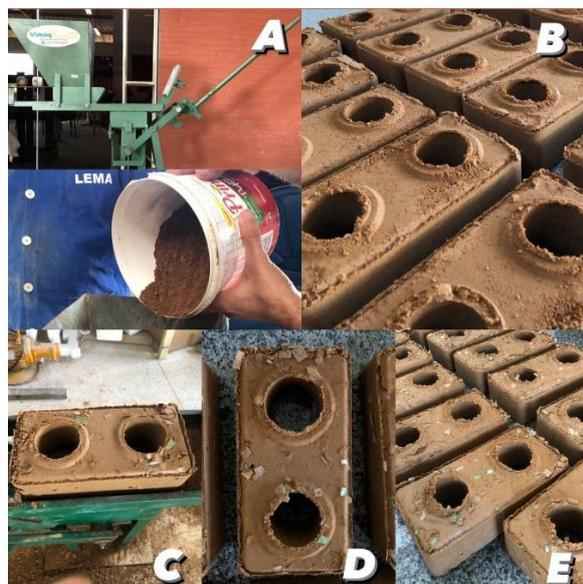


Fonte: autor (2023).

3.5.4 Moldagem dos tijolos

A mistura resultante da homogeneização dos materiais na betoneira foi levada para o molde da prensa manual mecânica para moldagem dos blocos, onde foram submetidos à compactação. Esse procedimento foi repetido para cada traço definido, no qual foram confeccionados 10 tijolos cada porcentagem: 0 %, 10 %, 15 % e 20% (Figura 23).

Figura 23 - a) Prensa utilizada + inserção da mistura homogênea, b) 0 %, c) 10 %, d) 15 %, e) 20 %.



Fonte: autor (2023).

Assim que cada tijolo era compactado, retirava-se com muito cuidado o bloco sem tocar suas quinas, para não ocorrer a quebra e levado em sequência para uma mesa próxima disposta.

3.5.5 Cura dos tijolos confeccionados

Os tijolos confeccionados foram devidamente identificados e agrupados de acordo com a sua porcentagem. Foram realizadas molhagens sucessivas após 6 horas de moldados, durante um período de 7 dias (Figura 24). Após a cura, os tijolos foram submetidos aos ensaios de absorção de água e resistência à compressão, com 14 dias de confecção.

Figura 24 - Molhagem dos tijolos confeccionados (0%).



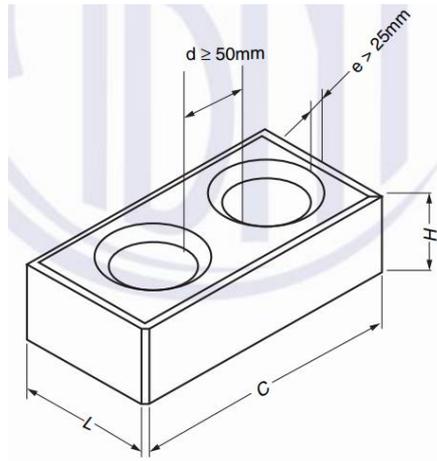
Fonte: autor (2023).

3.6 Análise dimensional dos tijolos

Conforme a NBR 8491 (ABNT, 2012), o tijolo deve possuir a forma externa de um paralelepípedo retangular, sendo suas cinco dimensões indicadas na Figuras 25. Onde:

- Comprimento do tijolo (C): maior dimensão das faces de assentamento;
- Largura do tijolo (L): menor dimensão das faces de assentamento;
- Altura do tijolo (H): distância entre as faces de assentamento.

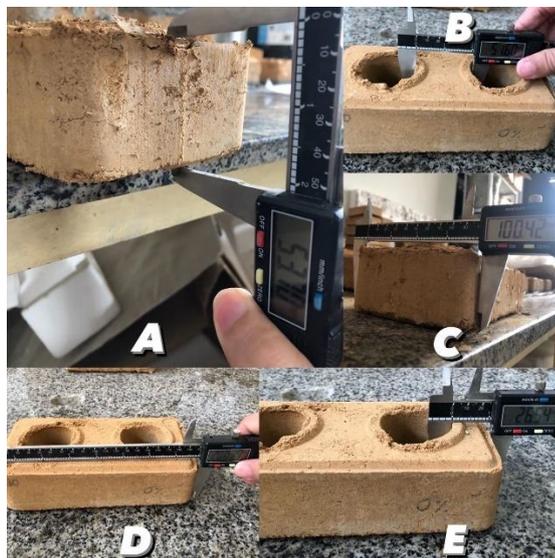
Figura 25 - Tijolo vazado de solo-cimento.



Fonte: NBR 8491 (ABNT, 2012).

Para a realização das medições, foram selecionados 10 tijolos correspondendo às quatro porcentagens confeccionadas (0%, 10%, 15% e 20%) totalizando 40 tijolos para medições. Para tal atividade, foi utilizado um paquímetro digital, sendo a unidade de medida em milímetros (Figura 26).

Figura 26 - a) altura, b) diâmetro, c) largura d) comprimento, e) espessura parede.



Fonte: autor (2023).

3.7 Ensaio de absorção de água

Foram selecionados três corpos de prova de cada amostra (representada pelas porcentagens), conforme recomenda a NBR 8492 (ABNT, 2013). Os corpos de prova foram

secados em estufa, entre 105 °C e 110 °C, até constância da massa, obtendo-se assim a massa m_1 do corpo de prova seco, em gramas (g), devidamente pesados em balança (Figura 27).

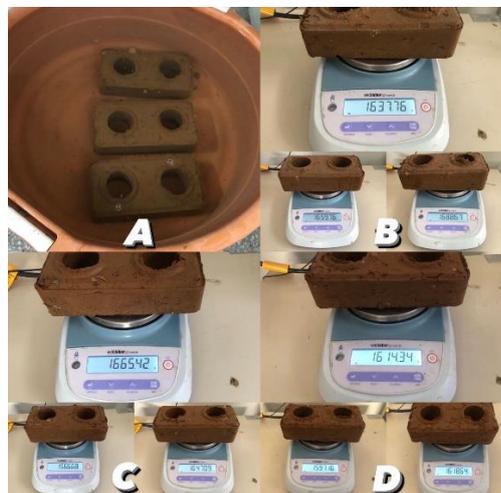
Figura 27 - a) Corpos de prova (0%) em estufa, massa m_1 b) 10 % c) 15 % e d) 20 %.



Fonte: autor (2023).

Por conseguinte, após atingirem a temperatura ambiente, os corpos de prova referentes a cada porcentagem, foram imersos em água durante 24 h. Após retirados da água, foram enxugados superficialmente com um pano levemente umedecido e pesados antes de decorridos 3 min, obtendo-se assim a massa do corpo de prova saturado m_2 , em gramas (Figura 28)

Figura 28 - a) Corpos de prova imersos em água (20%), massa m_2 b) 10%, c) 15% e d) 20%.



Fonte: autor (2023).

Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela Equação 8:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (8)$$

Onde:

A = a absorção de água, expressa em porcentagem (%);

m_1 = massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g);

m_2 = massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

3.8 Ensaio de resistência à compressão simples

De cada amostra (%), foram separados sete corpos de prova. Após a separação, foram seguidas as seguintes etapas:

- 1 – Os tijolos foram cortados ao meio com o auxílio de uma maquina;
- 2 – Foram superpostos, por suas faces, as duas metades obtidas e as superfícies cortadas invertidas, ligando-as com uma camada fina de pasta de cimento Portland, pré-contraída (repouso de aproximadamente 30 min), com 2 mm a 3 mm de espessura, e aguardado o endurecimento da pasta;
- 3 - Após os tijolos apresentarem rebaixo, foram superpostos suas duas metades de modo que as reentrâncias ficassem localizadas nas faces de trabalho do corpo de prova e preenchidas as reentrâncias com pasta de cimento Portland, aguardando aproximadamente 12 h antes de proceder à etapa seguinte;
- 4 – Para cada corpo de prova obtido pelo processo citado anteriormente e antes de ser submetido ao aparelho de compressão, foram apresentadas suas faces planas e paralelas para que fosse analisado o perfeito contato entre as superfícies de trabalho. Para isso, foi utilizado o aparelho nível;
- 5 – Após o endurecimento do material utilizado, os corpos de prova foram identificados e imersos em água por, no mínimo 6 h. Na Figura 29 é possível verificar as representações dos itens citados (1 a 5);
- 6 – Os corpos de prova foram retirados da água logo antes do ensaio e enxugados superficialmente com um pano levemente umedecido. Essa operação foi realizada em um intervalo de, no máximo, 3 min;

Figura 29- a) corte do bloco de 20 %, b) superfícies dos tijolos invertidas (15 %), c) tijolos sobrepostos (0 %), d) nivelamento corpo de prova (10 %), e) CP's submersos (10%).



Fonte: autor (2023).

7 – As dimensões das faces de trabalho foram determinadas com exatidão de 1 mm, sem o desconto das áreas de furos ou reentrâncias. Na Figura 30 é possível verificar as representações dos itens citados (6 a 7);

Figura 30 - Secagem do corpo de prova (15 %) após 24h imerso em água, b) Medição das dimensões das faces do corpo de prova (10 %).

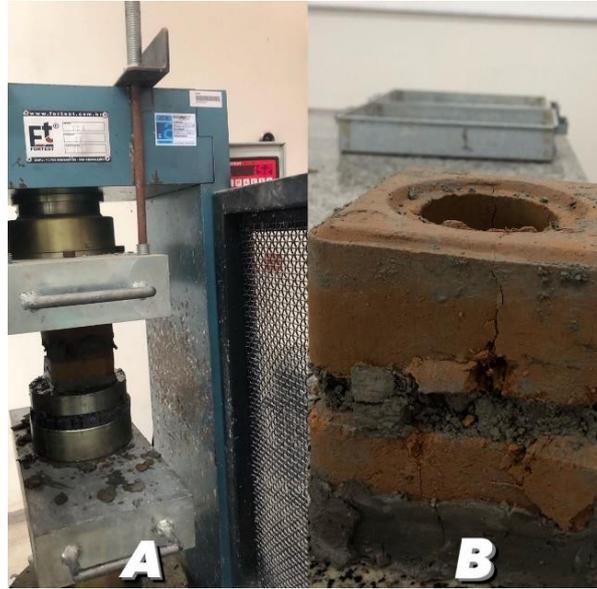


Fonte: autor (2023).

8 – Os corpos de prova foram colocados diretamente sobre o prato inferior da máquina de ensaio à compressão, de maneira a ficar centrado em relação a este;

9 – A aplicação da carga foi uniforme e à razão de 500 N/s (50 kgf/s) sendo gradativamente elevada até a ruptura do corpo de prova (Figura 31).

Figura 31 - a) rompimento (0%), b) CP rompido (0%).



Fonte: autor (2023).

Para obtenção dos valores individuais de resistência à compressão, em décimo de unidade, expressos em megapascals (MPa), foi necessário dividir a carga máxima observada durante o ensaio, em newtons (N), pela área da face de trabalho, em milímetros quadrados (mm^2), conforme Equação 9:

$$f_t = \frac{F}{S} \quad (9)$$

Onde:

f_t é a resistência à compressão simples, expressa em megapascals (MPa);

F é a carga de ruptura do corpo de prova, expressa em newtons (N);

S é a área de aplicação da carga, expressa em milímetros quadrados (mm^2).

Obs.: Para efeitos de cálculos, considera-se: 1 MPa = 10 kgf/cm².

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir de todos os ensaios descritos no capítulo anterior. Sendo eles: ensaios de caracterização do solo, análise dimensional, absorção de água e resistência à compressão simples. Para análise e discussão desses resultados, foi necessário recorrer a todas as normas técnicas que regem esses ensaios.

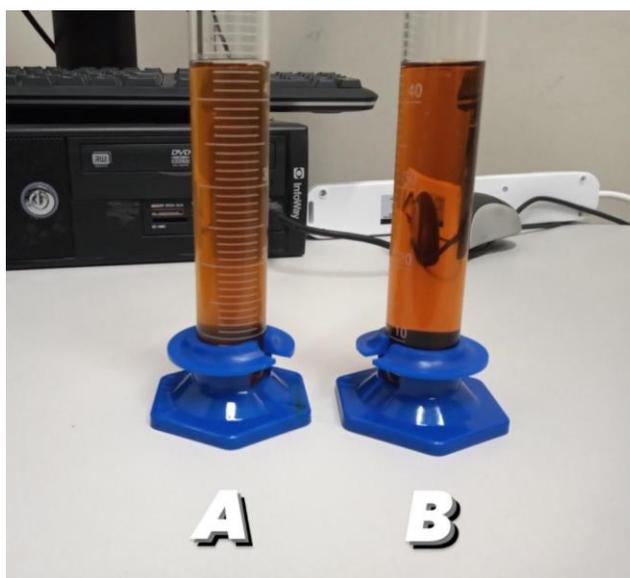
4.1 Caracterização do Solo

Para caracterização do solo, os ensaios realizados foram: determinação de impurezas orgânicas, análise granulométrica, limites de consistência (LL, LP e IP).

4.1.1 Determinação de impurezas orgânicas

Finalizada todas as etapas do ensaio de acordo com a NBR 17053 (ABNT, 2012), foi possível verificar que a solução obtida, como pode ser vista na Figura 32 e descrita como (A), apresentou coloração mais clara em relação à solução padrão (B). Dessa forma, a solução obtida apresenta baixo teor de matéria orgânica, podendo o solo, assim, ser utilizado para as demais etapas de sua caracterização.

Figura 32 - Solução obtida (A), solução padrão (B).



Fonte: autor (2023).

4.1.2 Análise granulométrica

Realizado todo o procedimento de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016), foi possível obter os dados contidos nas tabelas a seguir. Para a determinação da umidade hidrosfópica, foi necessário utilização das Equações 1, 2 e 3 (Ver Tabela 5).

Tabela 5 - Determinação umidade hidrosfópica do solo.

Nº Cápsula	Peso Bruto Úmido (g)	Peso Bruto Seco (g)	Peso da Cápsula(g)	Peso da Água (g)	Peso do Solo Seco (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)
1	146,81	141,66	25,14	5,15	116,52	4,41	4,425
2	166,26	161,10	44,98	5,16	116,12	4,44	

Fonte: autor (2023).

Realizado o peneiramento grosso e para a determinação da massa total da amostra seca (M_s) e as porcentagens de material passando (Q_g), foi necessário utilização das Equações 4 e 5 (Ver Tabela 6).

Tabela 6 - Peneiramento grosso do solo.

Massa total amostra úmida M_t (g) = 1000,07 g	Massa total amostra seca M_s (g) = 957,96 g		
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO		MATERIAL PASSANDO
(mm)	Parcial (g)	Acumulado, M_i (g)	Q_g (%)
50	0	0	100
38	0	0	100
25	0	0	100
19	0	0	100
9,5	0	0	100
4,8	1,17	1,17	99,87
2,0	6,25	$M_g = 7,42$	$N = 99,22$

Fonte: autor (2023).

Feito o peneiramento fino e para a determinação do material passando (Q_f), foi necessária a utilização da Equação 6 (ver Tabela 7).

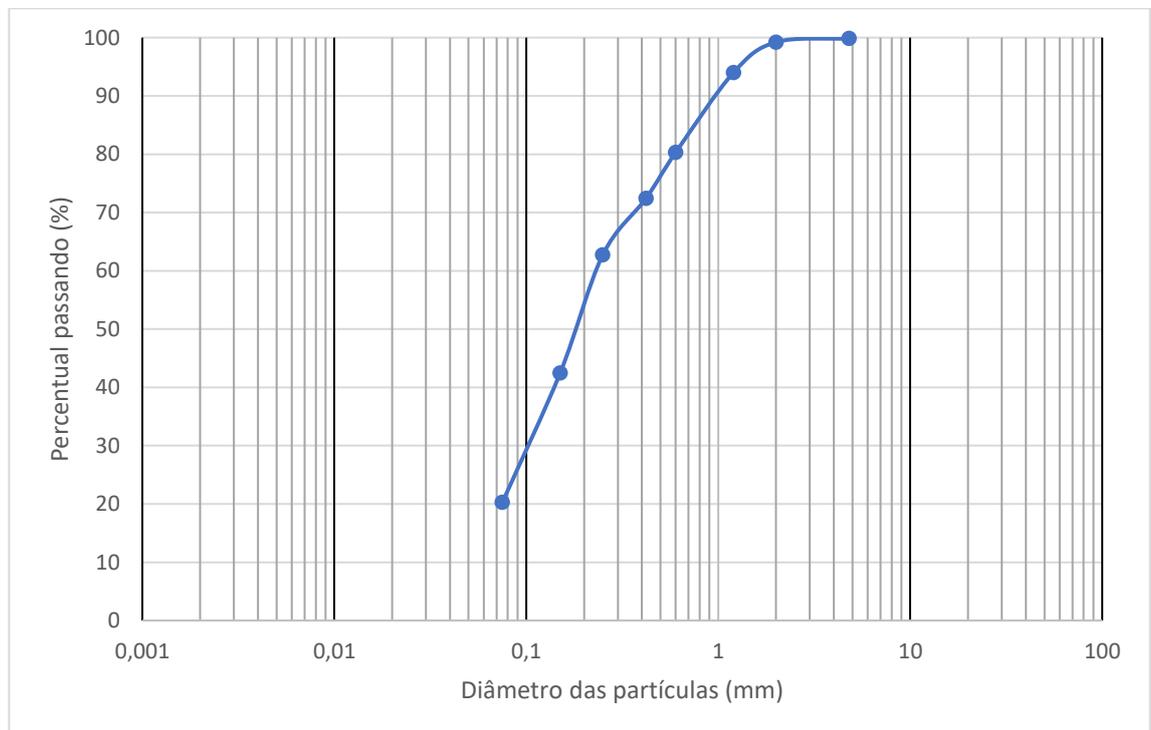
Tabela 7 - Peneiramento fino.

Massa Parcial Úmida $M_h = 992,65$ (g)			
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO		MATERIAL PASSANDO
(mm)	Parcial (g)	Acumulado, M_i (g)	Q_f (%)
1,2	25,16	25,16	94,00
0,6	66,10	91,26	80,30
0,42	38,03	129,29	72,42
0,25	46,86	176,15	62,71
0,15	97,81	273,96	42,44
0,075	107,09	381,05	20,25

Fonte: autor (2023).

A partir dos dados obtidos nas Tabelas 6 e 7 – material passante das peneiras de abertura 4,8 mm (n° 4), 2,0 mm (n° 10), 1,2 mm, 0,6 (n° 30), 0,42 mm (n° 40), 0,25 mm (n° 60), 0,15 mm (n° 100) e 0,075 mm (n° 200), foi possível construir a curva de distribuição granulométrica do solo utilizado nos ensaios, apresentada no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Curva granulométrica.



Fonte: autor (2023).

A partir da curva granulométrica foi possível caracterizar o solo. Para isso, foi preciso subtrair os valores dos limites superiores e inferiores das tabelas de peneiramento, conforme o

limite do gráfico. Por exemplo, para areia grossa, o limite superior corresponde à peneira de nº 4 (99,87%, conforme Tabela 6) e o limite inferior corresponde à peneira de 1,2 mm (94,00 %, conforme Tabela 7).

Realizando a subtração dos limites, tem-se 5,87% de areia grossa. Realizando o mesmo processo para os demais tipos de solos, tem-se: 31,29% de areia média, 42,46% de areia fina e 20,38% de argila ou silte. Para essa última porcentagem, só teríamos a exatidão de argila e silte através do ensaio de sedimentação, que não foi possível realizar. Por meio dele, também seria possível determinar o coeficiente de uniformidade do solo.

É válido considerar as descrições dos diâmetros das partículas do solo apresentados pela NBR 6502 (ABNT, 1995). Sendo: pedregulho (60,00 – 2,00 mm), areia grossa (2,00 – 0,60 mm), areia média (0,60 – 0,20 mm), areia fina (0,20 – 0,06 mm), silte (0,06 – 0,002), argila (< 0,002 mm). Assim, o solo utilizado nesta pesquisa, tem em sua predominância, partículas entre 0,20 – 0,06 mm.

Tabela 8 - Resumo caracterização do solo em estudo.

Argila/Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho
20,38%	42,46%	31,29%	5,87%	0%

Fonte: autor (2023).

É importante destacar que a NBR 10833 (ABNT, 2012) cita que o solo passante na peneira 4,8 mm deve ser de 100% e o da peneira nº 200 deve ser entre 10 % e 20 %. Sendo assim, os valores obtidos estão dentro da norma e o solo é considerado apto para fabricação de tijolos de solo-cimento.

4.1.3 Limite de liquidez

A partir de todos os valores obtidos (Tabela 9) através da realização do ensaio, foi construído o Gráfico 8, no qual as ordenadas (em escala logarítmica) correspondem aos números de golpes e as abscissas (em escala aritmética) os teores de umidade correspondentes e ajustadas a uma reta pelos pontos assim obtidos.

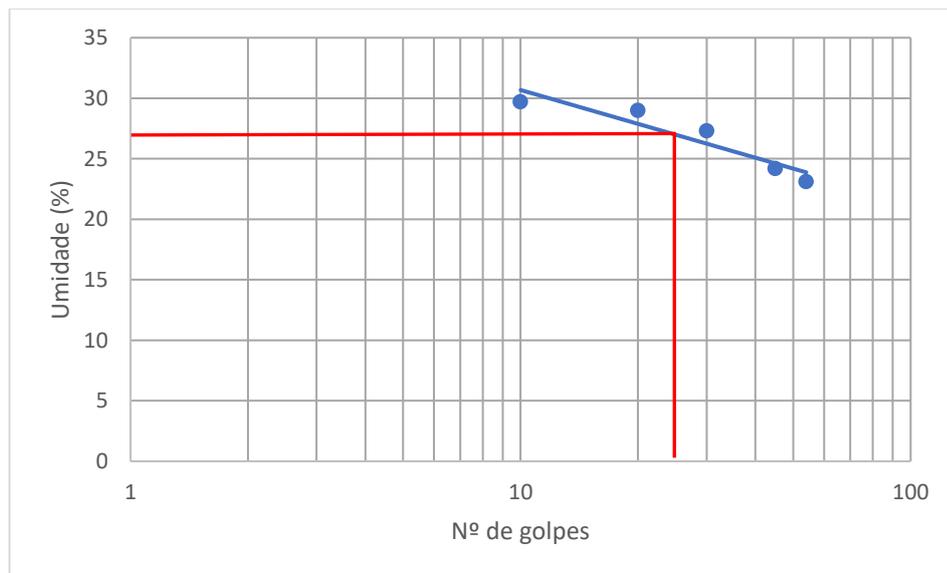
Tabela 9 - Dados das amostras do ensaio do LL.

Nº Cápsula	1	2	3	4	5
Nº de Golpes	10	20	30	45	54
Peso Bruto Úmido (g)	21,46	18,28	18,42	19,15	20,85
Peso Bruto Seco (g)	19,18	16,67	16,94	17,62	19,28
Tara da Cápsula (g)	11,51	11,11	11,52	11,31	12,48
Peso da água (g)	2,28	1,61	1,48	1,53	1,57
Peso Solo Seco (g)	7,67	5,56	5,42	6,31	6,80
Umidade (%)	29,7	29,0	27,3	24,2	23,1

Fonte: autor (2023).

Ademais, o teor de umidade correspondente a 25 golpes, diz respeito ao limite de liquidez do solo. O valor foi de 26,66%, como pode ser verificado no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Limite de liquidez.



Fonte: autor (2023).

4.1.4 Limite de plasticidade

A tabela 10 apresenta os dados obtidos no ensaio seguindo a NBR 7180 (ABNT, 2016), conforme descrito no Capítulo 3. Dados importantes para a determinação do índice de plasticidade.

Tabela 10 - Dados das amostras do ensaio do LP.

Nº Cápsula	1	2	3	4	5
Peso Bruto Úmido (g)	13,16	14,27	13,37	12,95	12,73
Peso Bruto Seco (g)	12,85	13,79	13,14	12,74	12,54
Tara da Cápsula (g)	11,02	11,34	11,62	11,45	11,40
Peso da água (g)	0,31	0,48	0,23	0,21	0,19
Peso Solo Seco (g)	1,83	2,45	1,52	1,29	1,14
Umidade (%)	16,9%	19,6%	15,1%	16,3%	16,7%

Fonte: autor (2023).

Com os valores de umidade, foi possível realizar a média desses valores, resultando no Limite de Plasticidade correspondendo a 16,92%.

4.1.5 Índice de plasticidade

Na Tabela 11 estão dispostos os valores dos índices de consistência do solo, sendo o índice de plasticidade calculado pela Equação 7.

Tabela 11 - Índice de plasticidade do solo.

LL	LP	IP
26,86%	16,92%	9,94%

Fonte: autor (2023).

Comparando com os requisitos da Tabela 1, que resume os requisitos da NBR 10833 (ABNT, 2012), o solo em estudo é aprovado para confecção de tijolos de solo-cimento ($IP \leq 18\%$). É importante destacar que, por possuir índice de plasticidade entre 5 e 10%, esse solo é classificado como de baixa plasticidade. Configurando-se também pelo baixo índice de argila em sua composição e boa trabalhabilidade com materiais de construção (CAPUTO, 2016).

4.2 Ensaio de absorção de água

Nas tabelas 12, 13, 14 e 15 estão dispostos todos os valores obtidos durante o ensaio de absorção de água realizado de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2013) com idade de 14 dias de confeccionados. Para obtenção dos valores de absorção, foi utilizada a Equação 8.

Tabela 12 - Absorção de água (0%).

Corpo de prova	Massa seca – m ₁ (g)	Massa úmida – m ₂ (g)	Absorção (%)
8	1553	1787	15,07
9	1528	1750	14,53
10	1641	1883	14,75
Média			14,78
Desvio-padrão			0,27
Coefficiente de variação			1,82%

Fonte: autor (2023).

Tabela 13 - Absorção de água (10%).

Corpo de prova	Massa seca – m ₁ (g)	Massa úmida – m ₂ (g)	Absorção (%)
8	1423	1659	16,58
9	1438	1688	17,38
10	1404	1637	16,60
Média			16,85
Desvio-padrão			0,45
Coefficiente de variação			2,67%

Fonte: autor (2023).

Tabela 14 - Absorção de água (15%).

Corpo de prova	Massa seca – m ₁ (g)	Massa úmida – m ₂ (g)	Absorção (%)
8	1336	1566	17,21
9	1402	1647	17,47
10	1426	1665	16,76
Média			17,14
Desvio-padrão			0,39
Coefficiente de variação			2,27%

Fonte: autor (2023).

Tabela 15 - Absorção de água (20%).

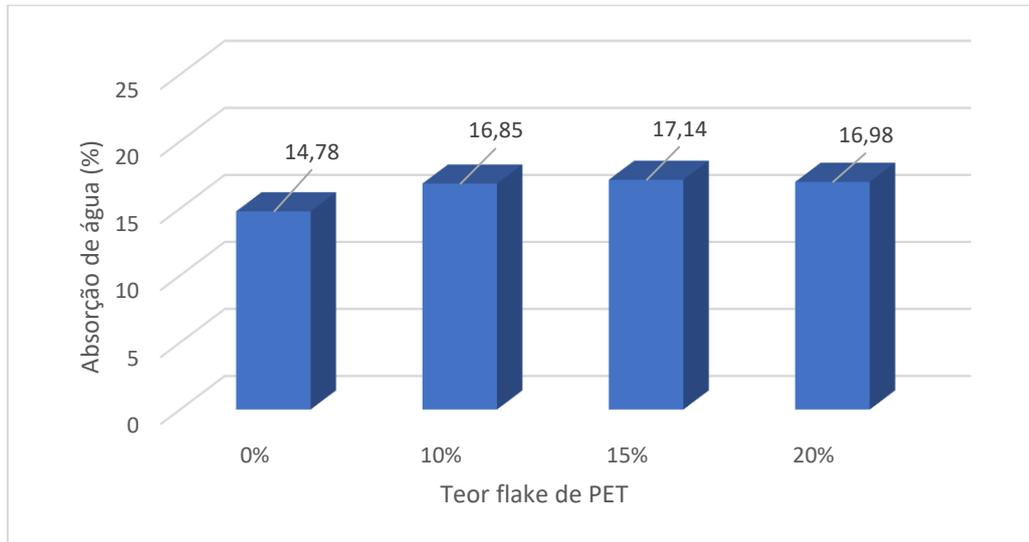
Corpo de prova	Massa seca – m ₁ (g)	Massa úmida – m ₂ (g)	Absorção (%)
8	1382	1614	16,78
9	1385	1618	16,82
10	1361	1597	17,34
Média			16,98
Desvio-padrão			0,31
Coefficiente de variação			1,82%

Fonte: autor (2023).

A partir dos dados informados, é possível verificar que todas as médias referentes a cada porcentagem não apresentam valores maiores do que 20% nem valores individuais superiores a 22%. Portanto, cumprem os requisitos da NBR 8492 (ABNT, 2013). Além disso,

foram calculados o desvio padrão e coeficiente de variação para melhor análise dos resultados. No Gráfico 9, é possível visualizar as médias de absorção dos tijolos de acordo com suas porcentagens.

Gráfico 9 - Médias de absorção dos tijolos de solo-cimento.



Fonte: autor (2023).

Visto que todos os valores em média e individuais de absorção dos blocos estão dentro dos parâmetros exigidos em norma, é válido considerar também que os tijolos com a adição de *flake* de PET obtiveram índices de absorção maiores que os tijolos comuns (0%). Além disso, o coeficiente de variação para cada porcentagem apresentou valores próximos, evidenciando que a diferença entre as porcentagens não foi tão significativa.

Fazendo uma análise do percentual de ganho de absorção de água em relação ao tijolo de 0%, verificou-se que: os de 10% tiveram um aumento de 14%, os de 15% um aumento de 15,97% e os de 20% um aumento de 14,88%. Ou seja, apresentaram aumento semelhante, conseqüentemente um comportamento parecido.

De acordo com FONSECA & MARTINS (2011), quando o coeficiente de variação é de até 10%, considera-se que a distribuição possui baixa dispersão e, portanto, os dados são homogêneos; quando está entre 10% e 20%, os dados são de média dispersão; e quando é maior que 20%, os dados são considerados de alta dispersão, ou seja, heterogêneos. Portanto, todas as amostras para este ensaio apresentaram baixa dispersão, sendo assim homogêneas.

4.3 Ensaio de resistência à compressão simples

O ensaio foi realizado conforme as recomendações da NBR 8492 (ABNT,2013) com idade de 14 dias de confeccionados. Em vista disso, nas Tabelas 16, 17, 18 e 19 constam os valores obtidos a partir desse ensaio. Para efeitos de cálculo foi necessário uso da Equação 9 para obtenção da tensão (MPa). Os valores de área foram obtidos a partir do processo descrito no item 3.8 (Figura 30).

Tabela 16 - Dados resistências à compressão tijolos (0%).

Corpo de prova	Área – S (mm²)	Força (N)	Tensão (MPa)
1	10239,82	7000	0,68
2	9903,37	10300	1,04
3	11232,03	15200	1,35
4	9991,76	10500	1,05
5	10354,58	8700	0,84
6	10215,24	12900	1,26
7	9820,25	8200	0,84
Média			1,01
Desvio Padrão			0,24
Coefficiente de variação			23,76%

Fonte: autor (2023).

Tabela 17 - Dados resistências à compressão tijolos (10%).

Corpo de prova	Área – S (mm²)	Força (N)	Tensão (MPa)
1	10477,52	8800	0,84
2	9859,91	8500	0,86
3	10320,94	8400	0,81
4	10064,69	11500	1,14
5	10257,47	10000	0,97
6	9969,74	8100	0,81
7	10270,57	9600	0,94
Média			0,91
Desvio Padrão			0,13
Coefficiente de variação			14,28%

Fonte: autor (2023).

Tabela 18 - Dados resistências à compressão tijolos (15%).

Corpo de prova	Área – S (mm²)	Força (N)	Tensão (MPa)
1	10459,70	12000	1,15
2	10100,12	10600	1,05
3	10245,49	11800	1,15
4	10126,03	9400	0,93
5	10083,06	11200	1,11
6	9963,66	12600	1,26
7	10049,89	9900	0,99
Média			1,09
Desvio Padrão			0,1135
Coefficiente de variação			10,41%

Fonte: autor (2023).

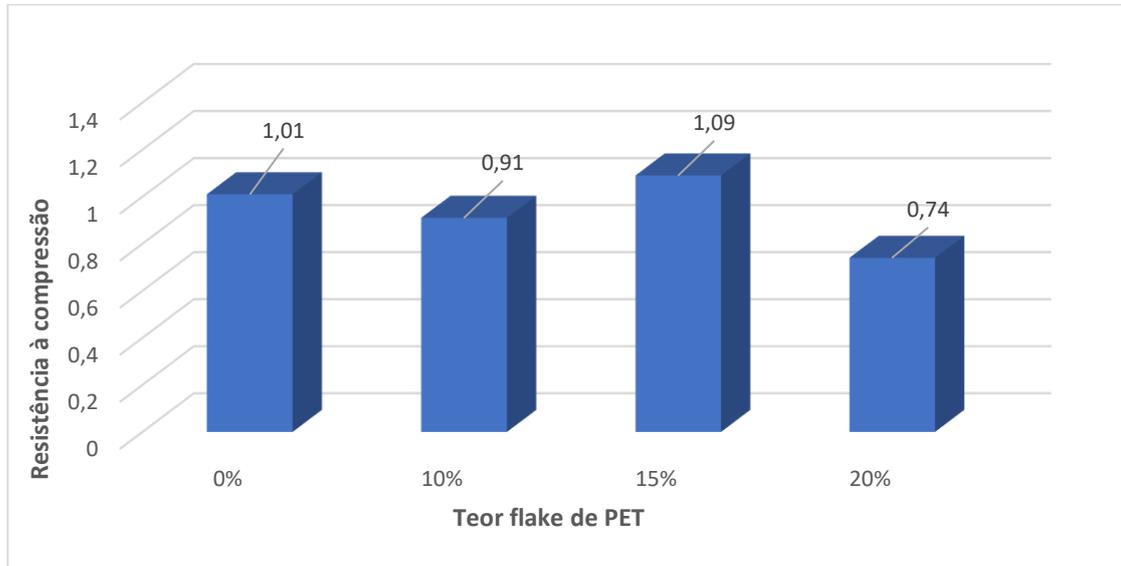
Tabela 19 - Dados resistências à compressão tijolos (20%).

Corpo de prova	Área – S (mm²)	Força (N)	Tensão (MPa)
1	9777,25	7500	0,77
2	9264,71	7400	0,80
3	8874,02	7000	0,79
4	9571,85	7000	0,73
5	9487,09	6500	0,69
6	9077,02	6100	0,67
7	9475,77	7100	0,74
Média			0,74
Desvio Padrão			0,049
Coefficiente de variação			6,62%

Fonte: autor (2023).

Conforme estabelecido pela NBR 8491 (ABNT, 2012), os corpos de prova não podem apresentar a média dos valores de resistência à compressão menores do que 2,0 MPa, nem valores individuais inferiores a 1,7 MPa, com idade mínima de sete dias. Sendo assim, ao analisar os dados apresentados nas tabelas 17 a 19, nenhum dos CP chegaram ao valor mínimo estabelecido. No Gráfico 10 estão dispostos os valores em média para melhor visualização.

Gráfico 10 - Médias ensaio resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento.



Fonte: autor (2023).

Dentre as médias apresentadas, verifica-se que os tijolos de 15% obtiveram melhor comportamento mecânico em relação aos demais quando submetidos ao esforço de compressão. Quanto aos de 20%, configura-se que para o traço escolhido, quanto mais resíduo sólido (*flake* de PET), menor a resistência. Para melhor análise dos resultados, foram calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostras.

Dessa forma, os tijolos de 0% apresentam alta dispersão, os de 10 e 15% apresentam média dispersão, já os de 20%, baixa dispersão, portanto, homogêneos. Fazendo uma análise do percentual da perda de resistência à compressão em relação ao tijolo de 0%, verificou-se que: os de 10% tiveram uma perda de 9,90%, os de 15% um ganho de 7,92% e os de 20% uma perda de 26,73%. Ou seja, quanto mais *flake* de PET, maior é a perda de resistência em relação ao tijolo de solo-cimento convencional.

Apesar do PET ser considerado um material de alta resistência quando não submetido ao calor, os valores de baixa resistência obtidos podem estar relacionados ao formato do PET escolhido (*flake*), uma vez que sua aderência no processo de confecção pode ter contribuído para um menor grau de compactação (Figura 33). Em vista disso, a escolha do formato granulométrico é de suma importância para próximas pesquisas ou até mesmo realizar mudanças no traço escolhido. Ademais, o tempo de cura dos tijolos pode ter influenciado nos resultados.

Figura 33 - Visão corte tijolo de solo-cimento confeccionado pós cura (15%).



Fonte: autor (2023).

4.4 Ensaio de análise dimensional

Toda a análise dimensional foi realizada conforme as recomendações da NBR 8492 (ABNT, 2013). É válido lembrar que o formato dos tijolos confeccionados nessa pesquisa corresponde ao tipo A (ver Tabela 3). Nas Tabelas 20, 21, 22 e 23 estão todos os dados obtidos a partir dessa análise.

Tabela 20 - Análise dimensional dos tijolos (0%).

CP	C (mm)	L(mm)	H(mm)	D(mm)	E(mm)
1	198,70	99,22	55,64	50,52	25,80
2	198,38	97,70	54,02	50,23	25,73
3	198,70	100,03	54,28	50,31	25,94
4	198,82	100,10	56,08	50,64	26,33
5	199,24	100,32	58,47	50,81	25,99
6	198,82	100,46	58,80	51,73	26,77
7	198,46	100,29	52,79	50,08	25,55
8	198,94	100,25	56,48	50,77	26,52
9	198,53	100,20	52,93	50,18	25,39
10	198,85	100,39	58,74	51,60	26,05
Média	198,74	99,90	55,82	50,69	26,00
Desvio padrão	0,25	0,72	5,35	0,33	0,43
Coefficiente de variação	0,12%	0,72%	9,58%	0,65%	1,65%

Fonte: autor (2023).

Tabela 21 - Análise dimensional dos tijolos (10%).

CP	C (mm)	L(mm)	H(mm)	D(mm)	E(mm)
1	200,87	100,75	50,49	50,48	25,09
2	199,98	99,47	50,75	50,87	26,05
3	200,46	101,48	49,36	50,68	25,96
4	200,87	100,78	52,67	51,81	25,07
5	199,94	99,46	50,85	50,92	26,01
6	200,74	100,86	50,78	50,90	25,08
7	200,98	101,67	52,07	51,11	25,76
8	200,65	100,50	49,69	50,22	25,07
9	200,83	100,63	52,31	50,29	25,09
10	199,36	99,20	50,76	51,64	26,06
Média	200,47	100,48	50,97	50,89	25,52
Desvio padrão	0,53	0,84	1,08	0,52	0,47
Coefficiente de variação	0,26%	0,83%	2,11%	1,02%	1,84%

Fonte: autor (2023).

Tabela 22 - Análise dimensional dos tijolos (15%).

CP	C (mm)	L(mm)	H(mm)	D(mm)	E(mm)
1	200,86	100,84	49,90	50,75	25,09
2	199,83	100,93	50,02	51,14	25,08
3	200,68	101,57	50,05	50,93	25,74
4	200,54	99,90	51,20	50,21	25,09
5	199,06	101,58	50,15	51,04	25,04
6	200,02	100,89	51,35	50,89	26,94
7	200,67	102,05	49,21	50,97	25,08
8	199,78	99,53	51,93	51,45	26,90
9	200,63	100,93	50,98	50,56	25,02
10	200,99	101,02	51,12	51,03	25,73
Média	200,30	100,93	50,60	50,90	25,57
Desvio padrão	0,60	0,75	0,84	0,33	0,76
Coefficiente de variação	0,29%	0,74%	1,66%	0,64%	2,97%

Fonte: autor (2023).

Tabela 23 - Análise dimensional dos tijolos (20%).

CP	C (mm)	L(mm)	H(mm)	D(mm)	E(mm)
1	199,08	100,71	52,86	50,49	25,09
2	200,78	100,58	51,41	50,55	25,01
3	200,30	100,10	52,24	51,53	25,15
4	199,43	100,87	52,63	50,71	25,89
5	200,09	101,01	51,56	50,95	25,09
6	200,62	100,42	50,90	51,91	26,02
7	200,48	100,25	51,05	50,41	25,82
8	200,12	100,78	50,87	50,10	25,94
9	199,88	101,02	51,72	50,18	25,91
10	199,74	100,26	50,65	50,22	25,03
Média	200,05	100,60	51,58	50,70	25,49
Desvio padrão	0,53	0,33	0,77	0,59	0,44
Coefficiente de variação	0,26%	0,32%	1,49%	1,16%	1,72%

Fonte: autor (2023).

É possível verificar que o coeficiente de variação de todas as amostras foi de até 10% para todas as dimensões, assim, é considerado que a distribuição possui baixa dispersão e, portanto, os dados são homogêneos. Visto que as amostras de ensaio devem estar de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012) e satisfazer as tolerâncias permitidas nas dimensões nominais dos tijolos de $\pm 3,00$ mm para o comprimento (C), largura (L) e altura (H), distância entre furos (d) e espessura das paredes (e), todas as amostras (%) confeccionadas foram aprovadas perante essa norma (ver Tabela 24).

Tabela 24 - Resumo da média dados obtidos para ensaio de análise dimensional.

	C (mm)	L(mm)	H(mm)	D(mm)	E(mm)
NBR 8492 (ABNT, 2012) - Tipo A -	200	100	50	≥ 50	≥ 25
Média tijolos solo-cimento confeccionados	199,89	100,32	52,24	50,80	25,65

Fonte: autor (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados dos ensaios obtidos e comparados com as exigências técnicas da NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 10833 (ABNT, 2013), conclui-se que:

1. Os materiais utilizados foram de fácil aquisição, destacando-se as garrafas PET, que são descartadas em grande escala, surgindo a necessidade de reciclá-las, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental;

2. O processo de confecção dos tijolos de solo-cimento com e sem a adição do PET em todas as porcentagens foi positivo, uma vez que, não ocorreu emperramento da prensa mecânica manual e o tempo de realização do processo de confecção não foi duradouro;

3. O solo utilizado demonstrou ser adequado para a fabricação de blocos de solo-cimento;

4. Os ensaios de absorção de água apresentaram resultados satisfatórios em todas as porcentagens utilizadas;

5. Os ensaios de análise dimensional apresentaram resultados satisfatórios em todas as porcentagens utilizadas;

6. Os ensaios de resistência à compressão apresentaram resultados insatisfatórios em todas as porcentagens utilizadas, apenas o lote de tijolos de 15% apresentou aumento de resistência em relação ao lote de tijolos de 0%. Ainda assim, abaixo do exigido em norma.

7. Apesar dos ensaios de absorção de água e análise dimensional apresentarem resultados positivos, o lote de todas as porcentagens configura-se como rejeitado. Uma vez que os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão apresentaram resultados insatisfatórios.

8. Os tijolos de solo-cimento confeccionados e avaliados não cumprem em sua totalidade com os requisitos técnicos exigidos em norma. Portanto, não podem ser utilizados como elemento construtivo na execução de alvenaria de vedação.

9. O uso do PET reciclado triturado na confecção de tijolos de solo-cimento, pode possibilitar uma alternativa de aproveitamento dessa matéria prima, desde que sejam testados novos formatos resultantes dessa trituração, como por exemplo o formato granulométrico. A partir disso, possibilitar uma destinação viável do ponto de vista ambiental, econômico e social. Para assim, contribuir significativamente para construções sustentáveis.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos posteriores, recomenda-se:

1. Utilizar o formato granulométrico do PET na confecção dos tijolos de solo-cimento;
2. Análise de ensaios com resíduos (PET) no formato granulométrico até 15%;
3. Realizar a confecção de tijolos com a adição do PET reciclado com outros traços.

REFERÊNCIAS

ARANTES, S.; STADLER, A.; MAIOLI, M., R. **Organizações e Desenvolvimento Sustentável**. 1ª. ed. atual. [S. l.]: Editora Intersaberes, 2012. 180 p. Vol.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET. **Benefícios da Reciclagem**. 2022. Disponível em:<<https://abipet.org.br/beneficios-da-reciclagem/>>. Acesso em 03 out.2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET. **12º CENSO DE RECICLAGEM DO PET NO BRASIL**. 2022. Disponível em< https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil-Novembro_2022.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET. **História do PET**. 2022. Disponível em< <https://abipet.org.br/historia-da-embalagem-pet/>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Boletim Técnico: **Tipos de cimento Portland**. São Paulo, 2018. Disponível em:< <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez**. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solo**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade**. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica**. São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491 - Tijolo de solo-cimento - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492 - Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004- Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17053- Agregado Miúdo – Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro, 2022.

- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Ação sustentável: reciclagem de garrafas PET na construção civil.** 2022. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/reciclagem-de-garrafas-pet-na-construcao-civil,b42904406b622810VgnVCM100000d701210aRCRD>>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- AGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento.** 1995 Disponível em:<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/528199/mod_resource/content/0/Agenda%2021.pdf> Acesso em 18 out.2022.
- ALROMA – **Máquinas para Tijolos Ecológicos.** Disponível em: <<https://www.alroma.com.br>>. Acesso em: 20 nov. 2022.
- BAUER, L.A. FALCÃO. **Materiais de Construção.** Vol.2 – 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 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. Brasília. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- BRUNDTLAND, G. H. 1987. **“Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development.”** United Nations Commission. Disponível em:<<https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>>. Acesso em: 21 out.2022.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A.,2016.256p.
- CARVALHO, A. R. O.; POROCA, J. S. (1995). **Como fazer e usar tijolos prensados de solo estabilizado.** Brasília. IBICT. 38p.
- CATHERINE, SARAH. 2022. **Consumo de produtos sustentáveis mais que dobrou no país.** Disponível em:<<https://claudia.abril.com.br/sua-vida/consumo-de-produtos-sustentaveis-no-brasil/>>. Acesso em 23 out.2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET. **Censo da Reciclagem no Brasil.** 2022. Disponível em:<https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil-Novembro_2022.pdf>. Acesso em 20 dez. 2022.
- CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DE ALAGOAS. **Saiba como as garrafas PET estão sendo utilizadas na construção civil.** 2019. Disponível em: <<https://www.crea-al.org.br/2019/01/inovacao-e-sustentabilidade-como-as-garrafas-pet-estao-servindo-de-insumo-para-construcao-civil/>>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- CRAIG. R. F. **Mecânica dos Solos.** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2012.365p.
- CRUZ, ISABEL SILVA. **Consumo sustentável e ambiente: o papel do Estado e das políticas públicas na inculcação de disposições ambientalistas.** Sociologia, Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Vol. XXXII, pp. 33 – 60. 2016.

CRUZ, I.; KATZ-GERRO, T. “*Urban public transport companies and strategies to promote sustainable consumption practices*”, Journal of Cleaner Production, p. 28-33. 2016

ECYCLE. **Garrafa PET: o que é, dicas e impactos ambientais**. 2021. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/garrafa-pet/>>. Acesso em: 27 out. 2022.

FONSECA, J. S da; Martins, G. de A. **Curso de Estatística**. Atlas: São Paulo - SP, 2011.

GALLI, B. **Uso de garrafas de polo-tereftalato de etileno – PET como insumo alternativo na construção de edificações residenciais**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS. 2011. Passo Fundo: IMED, 2011. p. 1-7

GODINHO, N. C. **A importância da educação ambiental na escola para despertar uma consciência sustentável relacionada aos resíduos sólidos domésticos na sociedade**. 2009.58f. Monografia. (Graduação em Ciências Biológicas) Faculdade Patos de Minas, Patos de Minas.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003. 165p.

GRISA, C. D.; CAPANEMA, L. **Resíduos Sólidos Urbanos**. 2018 Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16284/1/PRCapLiv214209_residuos%20sólidos_compl_P.pdf>. Acesso em 20 nov.2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis**. 2019 Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9340/1/Cadernos_ODS_Objetivo_11_Tornar%20as%20cidades%20e%20os%20assentamentos%20humano%20inclusivos.pdf>. Acesso em 12 out.2022.

KANTAR. **WHO CARES, WHO DOES**. 2022a. Disponível em <<https://www.kantar.com/campaigns/who-cares-who-does-in-the-fmcg-industry>>. Acesso em 22 dez.2022.

KANTAR. **Sustainability Sector Index 2022: what matters to consumers in your sector**. 2022b. Disponível em: <<https://www.kantar.com/campaigns/sustainability-sector-index>>. Acesso em 26 dez. 2022.

LIMA, S. V.; GUSMÃO, M. R. P.; SILVA, M. **Tijolo ecológico – inclusão de resíduos plásticos em sua composição**. Universidade São Francisco, 2021. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/tijolo-ecologico-inclusao-de-residuos-plasticos-em-sua-composicao/8432247/>>. Acesso em 02 jan.2023.

MACHADO, M. A. T. C.; OLIVEIRA, K. A. **Verificação da durabilidade de concretos produzidos a partir de garrafas PET**. In: ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO. 8, 2014, Dourados. Anais. Dourados: UEM, 2014. p-300-309.

- MIRANDA, R. A. C. (2007). **Viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás.
- MOTA, J. D.; OLIVEIRA, D. F.; SOUSA, A. A. P.; LARANJEIRA, E.; MONTEIRO, M. R. S. **Utilização do resíduo proveniente do desdobramento de rochas ornamentais na confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento**. 3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos. Campina Grande – Paraíba. 2010.
- NETO, J. L. **Melhoramento do tijolo de solo-cimento com adição do resíduo do corte de mármore e granito (RCMG)**. 2019. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2015.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>>. Acesso em 20 de nov.2022.
- PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**. 2010/2018. Disponível em:<<https://abrelpe.org.br/>>. Acesso em 21 set.2022.
- PAZ, F. J.; ISERHARD, F., Z; KIPPER, L.; M. **Indicadores para sustentabilidade organizacional em empresas da região do Pampa gaúcho: um estudo exploratório**. Revista Eletrônica de Ciência Administrativa - RECADM, v. 14, n. 2, p. 92–109, 2015. Disponível em: <<http://www.periodicosibepes.org.br/index.php/recadm/article/view/2094>>. Acesso em: 07 jan. 2023.
- PETRY, J. Estudo de Caso: **Responsabilidade ambiental: reciclagem e reutilização de garrafas PET**. Revista Interdisciplinar Científica Aplicada, Blumenau, p. 72, 86.2012.
- PIZA, A; WELLINTON A.; MENDES, B.; ISSA, B.; MATHÊUS, C. **Anuário de Reciclagem**. 2022.Disponível em:<https://uploads-ssl.webflow.com/609063d326f8d4cb6e852de0/63ac4964a8bd71442db83ded_Anu%C3%A1rio%20da%20Reciclagem%202022.pdf>. Acesso em 21 nov.2022.
- RESTELLI, R., E. **Inovação no Processo de Produção de Tijolos Ecológicos**. 2021. 154f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.
- RIBEIRO, J. A.; VEIGA, R. T. **Proposição de uma escala de consumo sustentável**. Revista de Administração, 46(1), 45-60, 2011.
- SANTOS, A. **Construção civil amplia uso de PET reciclado em obras**: Aprimoramento de tecnologias que utilizam material em sistemas construtivos melhora desempenho termoacústico. Portal Itambé, 2020. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/construcao-civil-amplia-uso-de-pet-reciclado-em-obras/>>. Acesso em: 13 mar. 2023.
- SANTOS, A. F. R.; BAUMGART, L. N.; Woiciokoski M.; Tabarelli Jr. O.; Jatzak S.; Nicoletti V. **Utilização de resíduos da construção civil em tijolos ecológicos**. Trabalho Interdisciplinar, Administração da Produção II. Associação do Vale do Itajaí Mirim, 2009.

SAVITZ, A. W.; WEBER, K. **A empresa sustentável: o verdadeiro sucesso é o lucro com responsabilidade social e ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

SCHALCH, Valdir; LEITA, W.; JÚNIOR, J.; CASTRO, M. **Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. 2002. Disponível em:<
http://www.deecc.ufc.br/Download/Gestao_de_Residuos_Solidos_PGTGA/Apostila_Gestao_e_Gerenciamento_de_RS_Schalch_et_al.pdf>. Acesso em 22 dez.2022.

SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. 2020. Disponível em: <
https://smastr16.blob.core.windows.net/conesan/sites/253/2020/11/pnrs_2020.pdf>. Acesso em:<25 nov.2022.

SILVA, P.; SOUZA, R., M., L.; OLIBEIRA, F.C; MELO, S, T. **Estudo da viabilidade de utilização de garrafa PET triturada na produção de tijolos ecológicos**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil, 2021.

SILVA, R.S. **Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Belo Horizonte: ESCOLA DE ENGENHARIA. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2005.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. 2019. **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em:< <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/rs>>. Acesso em: 20 dez.2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2018. Disponível em:< <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/rs>>. Acesso em: 20 dez. 2022

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2021. Disponível em:< <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/rs>>. Acesso em: 20 dez.2022

SANTOS, I., D., P. **O uso de solo-cimento com adição de pó de pneu recauchutado na fabricação de tijolos ecológicos**. 74 f. 2021.Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2021.

TAGLIANI, S. **Inovação e Sustentabilidade: como as garrafas PET estão servindo de insumo para a construção civil**. 2023. Disponível em:<<https://engenharia360.com/inovacao-e-sustentabilidade-como-as-garrafas-pet-estao-servindo-de-insumo-para-a-construcao-civil/>>. Acesso em 06 mai.2023.

VALORA, 2021. **Guia da Reciclagem e Coleta Seletiva**. Disponível em: <<https://valorareciclaveis.com.br/wp-content/uploads/2021/09/GUIA-DA-RECICLAGEM-E-COLETA-SELETIVA-VALORA-compactado.pdf>>. Acesso em 02 jan.2023.

WILLIAM, D. CALLISTER.; RETHWISCH Jr., D., G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução** /. 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.