

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ELIZ KARINA KOZIEL**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM SOLO DE CAMPO MOURÃO, COM ADIÇÃO  
DE AREIA, PARA USO EM PAREDES DE TAIPA DE PILÃO**

**CAMPO MOURÃO**

**2022**

**ELIZ KARINA KOZIEL**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM SOLO DE CAMPO MOURÃO, COM ADIÇÃO  
DE AREIA, PARA USO EM PAREDES DE TAIPA DE PILÃO**

**Study of the viability of a Campo Mourão soil, with the addition of sand, for use  
in rammed earth walls**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Profa. Dra. Fabiana Goia Rosa de  
Oliveira.

**CAMPO MOURÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ELIZ KARINA KOZIEL**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM SOLO DE CAMPO MOURÃO, COM ADIÇÃO  
DE AREIA, PARA USO EM PAREDES DE TAIPA DE PILÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30/novembro/2022

---

Fabiana Goia Rosa de Oliveira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Paula Cristina de Souza  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jucélia Kuchla Vieira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO**

**2022**

Dedico este trabalho aos meus amigos que me mostraram a satisfação que é sujar as mãos e trabalhar com a terra.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente à minha família, pelo suporte indispensável. Sem este apoio, dificilmente seria possível chegar até aqui.

Agradeço à minha orientadora Prof.(a) Dr.(a) Fabiana Goia Rosa de Oliveira, por toda dedicação e compreensão, por acolher as minhas ideias e me dar a liberdade necessária para nutri-las e desenvolve-las.

Deixo meu agradecimento também ao servidor Fábio Rodrigo Krüger, por todo o auxílio prestado no laboratório.

Agradeço a todos os professores que contribuíram com a minha formação, transmitindo o conhecimento necessário para a conclusão não só deste trabalho, mas de toda a minha graduação.

Não posso deixar de agradecer todos os amigos que fiz ao longo dessa jornada, e também todos os servidores que me acolheram e se tornaram amigos. Todos eles foram fundamentais para transformar a UTFPR em uma segunda casa.

Enfim, agradeço a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais utiliza materiais no mundo, com estimativas de consumo de mais de 50% do total de recursos naturais extraídos. Ao mesmo tempo, é o setor que mais gera resíduos sólidos, sendo responsável por cerca de 50% a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos no Brasil, causando sérios impactos ao meio ambiente. Na busca por mitigar estes impactos, o interesse pelo uso da terra crua (ou seja, sem passar por transformação através da queima) como material de construção vem aumentando cada vez mais. Técnicas construtivas com terra podem apresentar vantagens consideráveis em termos de sustentabilidade, por ser um material natural, abundante e com potencial para ser reciclável ao fim da vida. Como resultado que atesta esse notável interesse, pode-se citar o lançamento, em janeiro de 2022, da norma brasileira ABNT NBR 17014 – Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. A taipa de pilão é uma técnica construtiva milenar que consiste na construção de paredes monolíticas através da compactação de terra úmida em sucessivas camadas dentro de formas. Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade de um solo localizado no município de Campo Mourão para uso como material de construção em paredes de taipa de pilão. Estudos de caracterização realizados previamente mostraram que o solo utilizado é composto majoritariamente por silte e argila, e por esta razão, foi proposta a estabilização física do solo a partir da adição de areia para correção granulométrica. Foram estudadas três misturas com traços diferentes de solo e areia, que apresentaram resultados para ensaios de caracterização (limite de liquidez, índice de plasticidade e massa específica aparente seca) compatíveis com a norma. Entretanto, as três misturas apresentaram baixa resistência à compressão simples, e por este motivo se mostraram inviáveis para uso em paredes de taipa de pilão.

Palavras-chave: taipa de pilão; construção com terra; estabilização do solo.

## ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors that most uses raw materials in the world, with estimates of consumption of the total extracted natural resources higher than 50%. It's also the sector that generates the most solid waste, accounting between 50% and 70% of the total mass of urban solid waste in Brazil, causing serious impacts to the environment. In attempts to mitigate these impacts, the interest in using raw land (without it undergoing transformation through burning) as a construction material has seen an increase. Construction techniques with raw earth can present considerable advantages in terms of sustainability, as it is a natural, abundant material with the potential to be recycled at the end of its life. As a result of, and attesting to, this remarkable interest, we can mention the release of the Brazilian norm "ABNT NBR 17014 – Rammed earth: requirements, procedures and control", in January 2022. Rammed earth is an ancient construction technique that consists of the construction of monolithic walls through the compaction of damp earth in successive layers within casts. In view of the above, this work aimed to analyze the feasibility of a soil located in the municipality of Campo Mourão for use as a construction material in rammed earth walls. Characterization studies carried out previously showed that the soil used is mainly composed of silt and clay, and for this reason, physical stabilization of the soil was proposed with the addition of sand for granulometric correction. Three mixtures with different traces of soil and sand were studied, which characterization tests (liquidity limit, plasticity index and specific dry mass) resulted in values compatible with the norm. However, the three mixtures presented low resistance to simple compression, and for this reason they proved to be unfeasible for use in rammed earth walls.

Keywords: rammed earth; earth construction; soil stabilization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Técnicas construtivas com terra.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 2 – Processo de preenchimento das formas .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 3 – Estados de consistência do solo .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 4 – Local de coleta do solo .....</b>	<b>38</b>



## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Muralha da China .....	19
Fotografia 2 – Pirâmide do sol .....	19
Fotografia 3 – Cidade de Shibam, no Iêmen .....	20
Fotografia 4 – Edifício feito em taipa de pilão .....	20
Fotografia 5 – Igreja dos Santos Cosme e Damião .....	21
Fotografia 6 – Igreja Nossa Senhora do Rosário.....	22
Fotografia 7 – Construção de parede em terra compactada .....	24
Fotografia 8 – Exemplos de blocos de terra comprimida (BTC) .....	25
Fotografia 9 – Parede de terra sobre engradado de madeira .....	25
Fotografia 10 – Construção em taipa de pilão .....	27
Fotografia 11 – Baía de agregados da universidade .....	39
Fotografia 12 – Amostra de areia.....	40
Fotografia 13 – Peneiramento da areia.....	41
Fotografia 14 – Aparelho de Casagrande e cinzel.....	42
Fotografia 15 – Mistura de solo e areia .....	43
Fotografia 16 – Ensaio de limite de liquidez .....	44
Fotografia 17 – Placa de vidro esmerilhada e gabarito.....	45
Fotografia 18 – Preparo da mistura com água.....	45
Fotografia 19 – Cilindro e gabarito .....	46
Fotografia 20 – Cilindro de Proctor e soquete.....	47
Fotografia 21 – Mistura de solo e areia .....	48
Fotografia 22 – Compactação dentro do molde .....	49
Fotografia 23 – Extração do corpo de prova.....	50
Fotografia 24 – Corpos de prova .....	51
Fotografia 25 – Ruptura dos corpos de prova .....	52
Fotografia 26 – Corpo de prova rompido .....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia .....</b>	<b>54</b>
<b>Gráfico 2 – Linha de tendência para LL (mistura 1) .....</b>	<b>56</b>
<b>Gráfico 3 – Linha de tendência para LL (mistura 2) .....</b>	<b>57</b>
<b>Gráfico 4 – Curva de compactação (mistura 1) .....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 5 – Curva de compactação (mistura 2) .....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 6 – Curva de compactação (mistura 3) .....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice de plasticidade de acordo com Burmister (1949) .....	34
Tabela 2 – Limites de Atterberg de um solo de Campo Mourão .....	36
Tabela 3 – Composição granulométrica da areia .....	54
Tabela 4 – Traços das composições de solo e areia a serem estudadas .....	55
Tabela 5 – Teores de umidade para LL (mistura 1) .....	56
Tabela 6 – Teores de umidade para LP (mistura 1) .....	56
Tabela 7 – Teores de umidade para LL (mistura 2) .....	57
Tabela 8 – Teores de umidade para LP (mistura 2) .....	57
Tabela 9 – Resultados gerais dos Limites de Atterberg .....	58
Tabela 10 – Ensaio de compactação (mistura 1) .....	58
Tabela 11 – Ensaio de compactação (mistura 2) .....	59
Tabela 12 – Ensaio de compactação (mistura 3) .....	60
Tabela 13 – Compactação dos corpos de prova (mistura 1) .....	61
Tabela 14 – Resistência à compressão simples (mistura 1) .....	61
Tabela 15 – Compactação dos corpos de prova (mistura 2) .....	62
Tabela 16 – Resistência a compressão simples (mistura 2) .....	62
Tabela 17 – Compactação dos corpos de prova (mistura 3) .....	62
Tabela 18 – Resistência a compressão simples (mistura 3) .....	63
Tabela 19 – Média de resistência a compressão simples para as 3 misturas ...	63
Tabela 20 – Classificação do solo de acordo com a massa específica aparente seca .....	64
Tabela 21 – Granulometria da areia para a amostra 1 .....	71
Tabela 22 – Granulometria da areia para a amostra 2 .....	71
Tabela 23 – LL – Teores de umidade (mistura 1) .....	73
Tabela 24 – LP – Teores de umidade (mistura 1) .....	73
Tabela 25 – LL – Teores de umidade (mistura 2) .....	74
Tabela 26 – LP – Teores de umidade (mistura 2) .....	74
Tabela 27 – Compactação – Massa específica aparente (mistura 1) .....	77
Tabela 28 – Compactação – Massa específica aparente seca (mistura 1) .....	77
Tabela 29 – Compactação – Massa específica aparente (mistura 2) .....	77
Tabela 30 – Compactação – Massa específica aparente seca (mistura 2) .....	78
Tabela 31 – Compactação – Massa específica aparente (mistura 3) .....	78
Tabela 32 – Compactação – Massa específica aparente seca (mistura 3) .....	78
Tabela 33 – Corpos de prova – Massa específica aparente (mistura 1) .....	80
Tabela 34 – Corpos de prova – Massa específica aparente seca (mistura 1) ...	80
Tabela 35 – Resistência à compressão simples (mistura 1) .....	80
Tabela 36 – Corpos de prova – Massa específica aparente (mistura 2) .....	81
Tabela 37 – Corpos de prova – Massa específica aparente seca (mistura 2) ...	81
Tabela 38 – Resistência à compressão simples (mistura 2) .....	81
Tabela 39 – Corpos de prova – Massa específica aparente (mistura 3) .....	82
Tabela 40 – Corpos de prova – Massa específica aparente seca (mistura 3) ...	82
Tabela 41 – Resistência à compressão simples (mistura 3) .....	82

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>A terra como material de construção</b> .....	<b>17</b>
4.1.1	Panorama histórico.....	18
4.1.2	Técnicas construtivas com terra crua .....	22
4.1.3	Perspectivas atuais da construção com terra .....	26
<b>4.2</b>	<b>A taipa de pilão</b> .....	<b>27</b>
4.2.1	Requisitos mínimos da terra e da mistura compactada .....	28
4.2.2	Método de construção .....	28
<b>4.3</b>	<b>Propriedades do solo</b> .....	<b>30</b>
4.3.1	Características físicas do solo .....	31
<u>4.3.1.1</u>	<u>Granulometria do solo</u> .....	<u>31</u>
<u>4.3.1.2</u>	<u>Estados de consistência do solo: Limites de Atterberg</u> .....	<u>32</u>
<u>4.3.1.3</u>	<u>Umidade e Compactação</u> .....	<u>34</u>
4.3.2	Estabilização do solo .....	35
4.3.3	O solo da região do município de Campo Mourão .....	36
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>Método</b> .....	<b>39</b>
5.2.1	Correção da composição granulométrica do solo.....	39
5.2.2	Limites de Atterberg .....	41
<u>5.2.2.1</u>	<u>Determinação dos limites de liquidez</u> .....	<u>42</u>
<u>5.2.2.2</u>	<u>Determinação dos limites de plasticidade</u> .....	<u>44</u>
5.2.3	Ensaio de compactação .....	46
5.2.4	Ensaio de resistência à compressão simples .....	50
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>54</b>
<b>6.1</b>	<b>Correção da composição granulométrica do solo</b> .....	<b>54</b>
6.1.1	Composição granulométrica da areia .....	54

6.1.2	Definição dos traços para correção da composição granulométrica do solo .....	55
6.2	<b>Limites de Atterberg.....</b>	<b>55</b>
6.3	<b>Ensaio de compactação.....</b>	<b>58</b>
6.4	<b>Ensaio de resistência à compressão simples.....</b>	<b>60</b>
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A - Resultados – Ensaio de composição granulométrica da areia .....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE B - Resultados – Ensaos de determinação dos limites de liquidez e plasticidade .....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE C - Resultados – Ensaos de compactação .....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE D - Resultados – Ensaos de resistência à compressão simples dos corpos de prova .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais utiliza recursos naturais no mundo, com estimativa de consumo de cerca de mais de 50% dos recursos extraídos do planeta, dos quais pouco se reutiliza. Ao considerar somente a extração de minérios para a produção de cimento, cerâmica e agregados, estes representam 40% do total extraído (JOHN, 2017). Ao mesmo tempo, a construção civil é responsável pela geração de grande volume de resíduos sólidos, que podem representar de 50% a 70% de toda a massa de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Esta quantidade expressiva de resíduos sobrecarregam os sistemas de limpeza pública municipais, drenando escassos recursos públicos para o seu manejo, e sua disposição irregular pode causar sérios impactos ao meio ambiente (BRASIL, 2005).

Diante deste cenário, há um movimento crescente que busca adotar práticas mais sustentáveis com o intuito de mitigar os impactos ambientais causados pela indústria da construção, englobando pesquisas e implementação de materiais, tecnologias, gestão consciente dos recursos, desde a extração até a disposição no ambiente, e políticas públicas para direcionar estas práticas (CBCS, 2014). Neste contexto, o uso da terra como material de construção tem se tornado uma alternativa atraente, por se tratar de um material natural, abundante e com capacidade de ser reciclável ao fim da vida. Além do aspecto ambiental, as construções com terra podem apresentar considerável vantagem em relação ao desempenho térmico e acústico, quando comparadas com alvenarias convencionais, como as de blocos cerâmicos e de concreto (CALDAS; MARTINS; TOLEDO FILHO, 2021).

Dentre as diversas técnicas construtivas com terra crua existentes, pode-se destacar a taipa de pilão, técnica milenar que consiste na construção de paredes monolíticas através da compactação de terra úmida em sucessivas camadas dentro de formas. Esta técnica tem conquistado cada vez mais espaço no setor da construção, e em janeiro de 2022 teve sua prática regulamentada através de uma norma específica desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, a NBR 17014 – Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade de um solo localizado no município de Campo Mourão para emprego como material de construção em paredes de taipa de pilão. Estudos de caracterização realizados previamente por Batelo (2019) mostraram que o solo da região em que foi coletado é

composto majoritariamente por silte e argila, com pouca presença de areia, por esta razão, foi proposta a correção granulométrica do solo, dado que a recomendação para a construção de paredes de taipa de pilão é de que o solo utilizado seja composto por areia em porcentagens entre 50% a 80%.

## **2 OBJETIVOS**

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar a viabilidade de um solo localizado no município de Campo Mourão, estabilizado com correção granulométrica com areia, para uso como material de construção em paredes monolíticas de terra compactada (taipa de pilão), comparando os resultados de ensaios em laboratório com os requisitos mínimos definidos pela norma brasileira ABNT NBR 17014:2022 – Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar percentuais de adição de areia para a estabilização granulométrica do solo;
- Realizar ensaios de laboratório de caracterização e resistência das misturas de solo e areia, conforme propostos pela norma;
- Comparar os resultados dos ensaios com os parâmetros definidos pela norma;
- Avaliar, a partir dos resultados, a viabilidade do solo estabilizado para uso em construção de paredes de taipa de pilão.



### 3 JUSTIFICATIVA

Minimizar os impactos que a indústria da construção civil causa no meio ambiente é uma grande tarefa que o setor tem abraçado de todas as frentes possíveis, visto que, como já mencionado anteriormente, na introdução deste trabalho, grande parte do consumo dos materiais que são extraídos da natureza e a maior parte dos resíduos sólidos urbanos gerados advém das atividades do setor.

Dentre as ações tomadas com intuito de tornar a prática construtiva mais sustentável, está a busca por técnicas e materiais de construção e que sejam menos nocivos ao meio ambiente, que utilizem menor quantidade de matéria-prima, que sejam mais abundantes, renováveis, com maior durabilidade, menos toxicidade, que requerem menor energia para sua produção e manutenção, etc.

Considerando estes aspectos, técnicas que utilizam terra crua como material de construção podem ser vistas como uma alternativa vantajosa, entretanto, assim como qualquer outro material utilizado na construção civil, seu uso não pode ser feito de maneira impensada. Encontrar materiais sustentáveis, mas que também apresentem boas características físicas e mecânicas, requer estudo, pesquisa, investigação, teste. Por este motivo, este trabalho se torna relevante, e os resultados apresentados ao final podem vir a basear novos estudos e novos projetos construtivos, especialmente no município de Campo Mourão, por se tratar da análise de um solo da região.

Ademais, este trabalho também se mostra relevante devido a sua contribuição ao estado da arte por, além de apresentar uma investigação prática de um solo argiloso estabilizado com areia, através de ensaios de laboratório normatizados, ser um trabalho fundamento na ABNT NBR 17014, de 2022, uma norma recente que carece de trabalhos acadêmicos que tratam de sua aplicação.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Para se atingir os objetivos estabelecidos para este trabalho, entende-se que é fundamental trazer o panorama histórico da arquitetura e construção com terra no Brasil e no mundo, bem como as perspectivas atuais do uso da terra como material de construção; expor brevemente as mais diversas técnicas construtivas existentes, com atenção aprofundada à técnica taipa de pilão, por ser o foco desta pesquisa; e apresentar os conceitos relacionados ao solo e suas propriedades físicas e mecânicas.

Neste trabalho, serão empregados os termos terra, ou terra crua, como o solo utilizado como material de construção que foi seco ao ar livre e que não passou por processo de cozimento, ou seja, sem a queima a altas temperaturas em fornos (NEVES *et al.*, 2010).

Na Arquitetura e Construção com Terra – denominação dada a toda a produção arquitetônica que emprega o solo como a principal matéria-prima – o solo recebe denominações diversas tais como terra crua, terra sem cozer, terra para construir, porém, o usual e adotado neste trabalho, é o termo “terra”, que corresponde ao solo apropriado para construção. O termo “solo” é usado principalmente quando se envolvem classificações e caracterizações, que também são adotadas em outros campos da Engenharia, assim como são os termos solo-cimento, solo-cal e solo estabilizado, entre outros. (NEVES *et al.*, 2010, p. 6).

### 4.1 A terra como material de construção

A construção com terra está presente em todo o mundo. Apesar do avanço da industrialização dos processos construtivos com o uso de materiais industriais como o concreto e o aço, o uso da terra como material de construção persiste e vem ganhando cada vez mais espaço em diversos países (PACHECO-TORGAL; EIRES; JALALI, 2009).

O aumento do interesse pela arquitetura e construção com terra pode ser explicado pela busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse aspecto, a terra apresenta grande vantagem por ser um material natural, abundante, acessível, e que tende a ser menos poluente que os materiais convencionais de construção, além de poder apresentar boas propriedades higrotérmicas e acústicas, e pelo seu potencial de ser reciclável ao fim da vida (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2012). No entanto, existe grande resistência cultural que impede que seu uso seja ainda mais

disseminado. Para Santos (2015), a imagem negativa que as pessoas tem das construções com terra está relacionado à execução feita de maneira inadequada.

O desconhecimento leva ao emprego inadequado destas tecnologias. Segundo dados do Ministério da Saúde (2015), quase metade das casas de taipa registradas no Brasil não são revestidas com reboco ou emboço, promovendo o aninhamento de insetos nas paredes e a consequente proliferação de doenças. Este é um fator que comprometeu profundamente a imagem da terra como material de construção no Brasil, pois foi entendido como um problema do material e não da falta de educação da população, praticamente restringindo seu uso à população de baixa renda. (SANTOS, 2015, p. 38).

Há um grande esforço por parte de profissionais e organizações nacionais e internacionais que estão relacionados ao tema da construção com terra, para popularizar e valorizar as técnicas construtivas, através da busca por regulamentação, do desenvolvimento tecnológico, de pesquisas científicas e da divulgação das técnicas associando a sustentabilidade, economia e qualidade.

#### 4.1.1 Panorama histórico

O uso da terra crua como material de construção não é nenhuma novidade para o setor da construção civil, seu surgimento remonta às primeiras habitações feitas pelo homem, com registros históricos encontrados por todo o mundo: casas de adobe (blocos de terra) no Turquemenistão (construídas entre 8000 e 6000 a.C.); fundações de 5000 a.C. feitas de taipa de pilão (terra compactada) na Assíria; a Grande Muralha da China (Fotografia 1), feita originalmente de taipa, há 4000 anos atrás; as abóbadas no templo de Ramsés II em Gorna (Egito), feitas de adobe há 3200 anos; a cidadela de Bam, no Irã, que datam de 2500 anos atrás; o interior da Pirâmide do Sol (Fotografia 2) em Teotihuacan, no México, constituído de cerca de 2 milhões de toneladas de terra compactada (MINKE, 2006).

**Fotografia 1 – Muralha da China**



Fonte: Girardelli *et al.* (2020, p. 359)

**Fotografia 2 – Pirâmide do sol**



Fonte: Pachecho-Torgal; Eires; Jalali (2009, p. 13)

A cidade Shibam, no Iêmen (Fotografia 3), é um exemplo de cidade histórica ainda habitada composta por edifícios de 5 a 11 andares feitos com adobe. Sua origem data do século III, e as edificações que persistem até os dias de hoje são, em sua maioria, do século XVI (PACHECHO-TORGAL; EIRES; JALALI, 2009).

**Fotografia 3 – Cidade de Shibam, no Iêmen**



**Fonte: Pacheco-Torgal; Eires; Jalali (2009, p. 14)**

Na França, é possível ainda encontrar edifícios habitados de mais de 300 anos construídos em taipa de pilão. A Alemanha abriga o edifício mais alto feito de terra crua existente na Europa, retratado na Fotografia 4. Com 7 andares e 20 m de altura, este edifício foi construído com o emprego da técnica taipa de pilão, em 1826 (SANTOS, 2015).

**Fotografia 4 – Edifício feito em taipa de pilão**



**Fonte: Santos (2015, p. 75)**

No Brasil, a construção de edificações utilizando terra crua tem seu início datado do período colonial, influenciada pela arquitetura de Portugal da época. A Igreja dos Santos Cosme e Damião (Fotografia 5), considerada mais antiga do Brasil e localizada em Recife, foi feita originalmente em taipa de pilão, em 1535. Há diversas outras igrejas e casas espalhadas pelo Brasil que foram construídas com o uso das técnicas mais tradicionais e ainda estão de pé e em uso, como as igrejas Nossa Senhora das Necessidades (do ano de 1750) e Nossa Senhora da Lapa (ano de 1806) em Florianópolis, a igreja Nossa Senhora do Rosário (Fotografia 6), do ano de 1732, em Pirenópolis, a igreja do Rosário e São Benedito em Cuiabá, além de casas que utilizam técnicas mistas com estruturas de madeira na região sul do Brasil (SANTOS, 2015).

**Fotografia 5 – Igreja dos Santos Cosme e Damião**



**Fonte: Santos (2015, p. 80)**



**Fotografia 6 – Igreja Nossa Senhora do Rosário**



**Fonte: Girardelli et al. (2020, p. 359)**

#### 4.1.2 Técnicas construtivas com terra crua

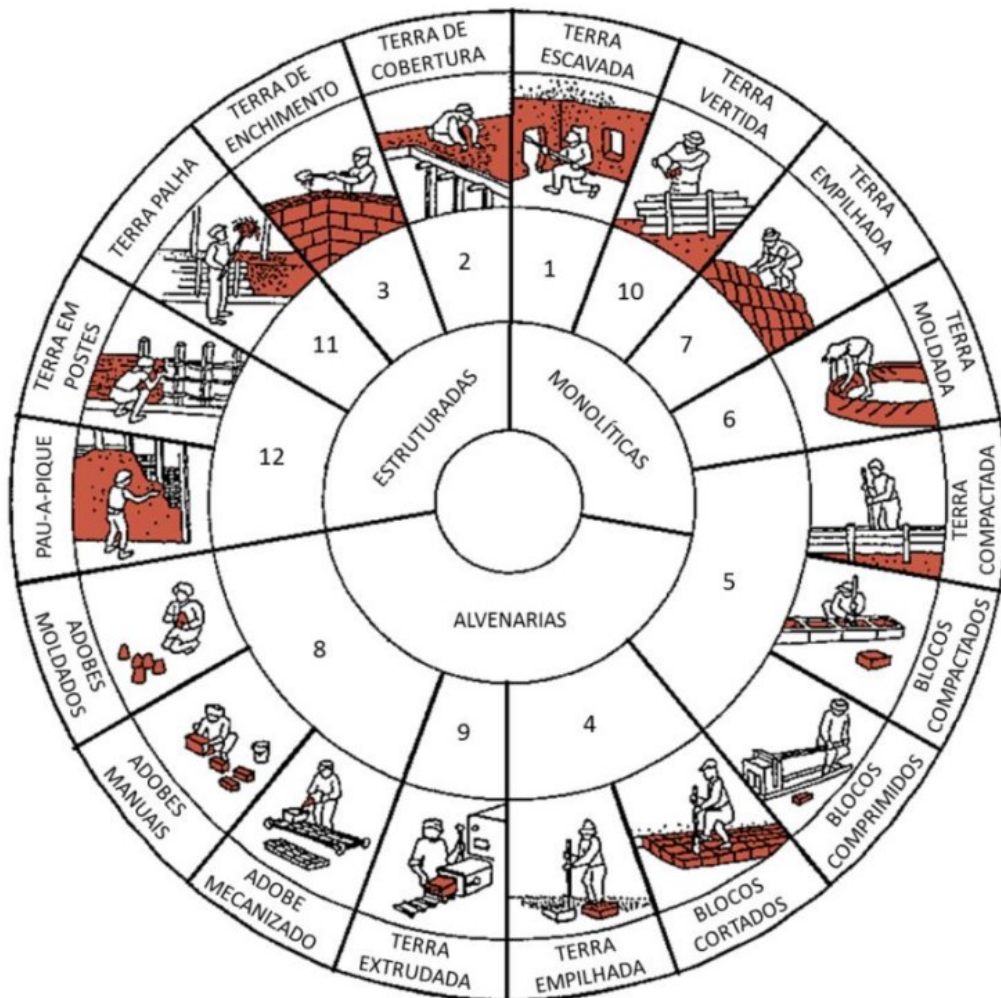
As técnicas construtivas com terra crua que são empregadas atualmente são baseadas em técnicas tradicionais e milenares que passaram por evoluções, sofrendo adaptações e transformações a partir do conhecimento adquirido ao longo do tempo através das investigações, das práticas e do meio socioeconômico e cultural onde elas são executadas (NEVES; FARIA, 2011).

Existem diversas técnicas que empregam a terra como material de construção (sintetizadas na Figura 1), que podem ser divididas em três grandes grupos em função de suas principais características:

- elementos monolíticos;
- alvenaria (por blocos/unidades);

- enchimento e/ou revestimento de estruturas.

Figura 1 – Técnicas construtivas com terra



Fonte: Santos (2015, p. 88)

As técnicas construtivas sob a forma monolítica correspondem a um método de construção de uma estrutura contínua que funciona como um único elemento resistente. Podem englobar diferentes métodos de produção: terra escavada; terra plástica; terra empilhada; terra modelada e terra compactada. A taipa de pilão, executada com método de terra compactada, é a técnica sob a forma monolítica mais conhecida e empregada a nível mundial (FERREIRA, 2015). A Fotografia 7 apresenta uma parede sendo construída com o uso do método de terra compactada.



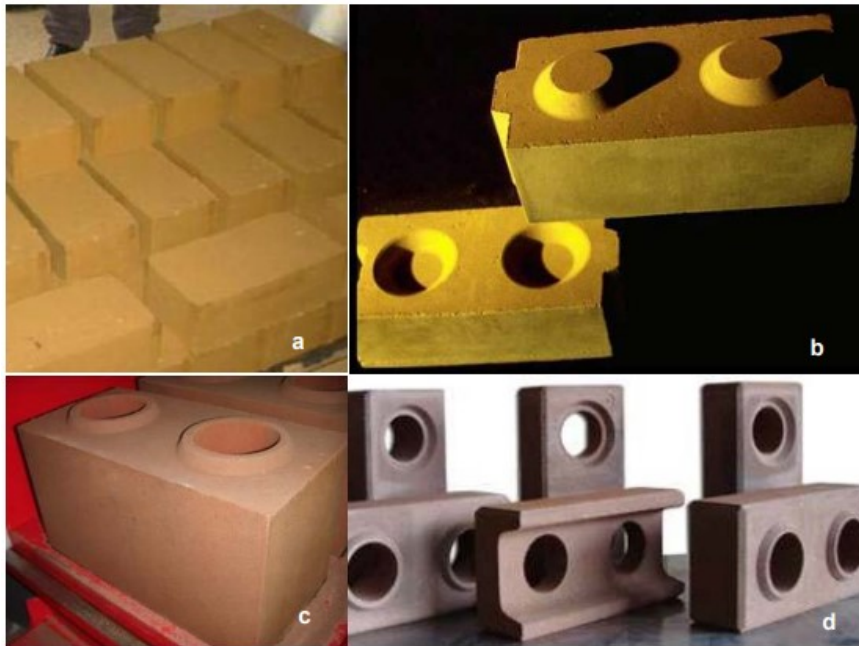
**Fotografia 7 – Construção de parede em terra compactada**

Fonte: Archdaily (2018, online)

Na construção de alvenarias com terra, são utilizados diferentes tipos de blocos pré-fabricados de acordo com a técnica empregada: blocos apilados, prensados e cortados, torrões, terra extrudida, e adobe mecânico, manual e moldado. O processo de construção é parecido com o de uma alvenaria convencional de blocos cerâmicos, sendo realizado o empilhamento de fiadas sucessivas de blocos unidos por uma argamassa que pode ser feita de terra também (FERREIRA, 2015).

Na Fotografia 8 são apresentados alguns exemplos de blocos de terra comprimida, amplamente utilizados em construções de alvenaria. Os exemplos na imagem são: a) bloco maciço de superfície lisa; b) bloco maciço com encaixes; c) bloco com furos, d) bloco com furos e encaixe.

**Fotografia 8 – Exemplos de blocos de terra comprimida (BTC)**



**Fonte: Neves; Milani (2011, p. 35)**

Nas técnicas por enchimento e/ou revestimento, a terra é empregada como enchimento dos vazios de uma estrutura portante normalmente feita de madeira, sendo comum a adição de fibras naturais à mistura de terra para melhorar suas características mecânicas. Estão entre as técnicas desse grupo: terra de recobrimento, terra sobre engradado, terra palha, terra de enchimento e terra de cobertura (FERREIRA, 2015). A Fotografia 9 apresentada a execução de uma parede feita com engradado de madeira preenchido com terra.

**Fotografia 9 – Parede de terra sobre engradado de madeira**



**Fonte: Taipal (2018, online)**

#### 4.1.3 Perspectivas atuais da construção com terra

As técnicas construtivas que utilizam terra crua passaram por um período de declínio com o início do processo de industrialização da construção, que começou a empregar de maneira ostensiva materiais industriais, como o cimento Portland e blocos cerâmicos. Entretanto, seu uso nunca foi extinguido por completo (NEVES; FARIA, 2011).

Na Europa, o uso da terra como material de construção já é considerado uma boa alternativa às técnicas tradicionais de alvenaria. Foi na Alemanha pós-guerra que as primeiras normas de construção com terra começaram a surgir para a reconstrução das cidades atingidas, por conta de sua acessibilidade e baixo custo (SANTOS, 2015). Também é possível encontrar na Alemanha cursos a nível de especialização em instituições universitárias sobre o tema (PACHECO-TORGAL; EIRES; JALALI, 2009).

Outros países, como Austrália, Espanha, Estados Unidos, Nova Zelândia, Zimbábwe, México e Brasil já possuem regulamentação para a construção com terra, através de normas técnicas e boletins informativos. Esse movimento de regulamentação por parte de instituições oficiais é importante para trazer segurança na aplicação das técnicas, contribuindo para a diminuição do preconceito que ainda existe no imaginário coletivo, que associa as construções com terra à baixa qualidade, e colocando-a de fato em disputa como uma alternativa às técnicas de construção convencionais (VIEIRA; RAMALHO, 2022).

Diversas organizações atuam por todo o mundo com o objetivo de disseminar o uso da arquitetura e construção com terra. Na França, vale destaque ao grupo CRATerre, criado em 1979, um laboratório de estudos e pesquisas ligado à Escola de Arquitetura de Grenoble. O CRATerre se tornou grande referência mundial em termos de construção com terra e desenvolvimento sustentável (PACHECO-TORGAL; EIRES; JALALI, 2009). Na Alemanha, a Associação DachverbandLehme.V., criada em 1992, é referência internacional, colaborando com a criação de regulamentos técnicos (FERREIRA, 2015). Na Itália, foi criado em 2001 a Associazione Nazionale Città della Terra Cruda, que tem como missão “promover e valorizar a cultura da terra crua, o patrimônio e o valor do território, para um desenvolvimento sustentável” (FERREIRA, 2015).

Na América Latina, tem-se a Rede Ibero-americana PROTERRA, rede internacional que reúne especialistas de diferentes países com o objetivo de promover

ações para o desenvolvimento da arquitetura e construção com terra. A Rede Terra Brasil se destaca como uma organização nacional, composta por profissionais e estudantes e congrega instituições, entidades de classe e toda a sociedade envolvida com o tema arquitetura e construção com terra, fortalecendo e disseminando o desenvolvimento científico e tecnológico, fomentando estudos e pesquisas (SANTOS, 2015).

#### 4.2 A taipa de pilão

Taipa de pilão é o nome popularmente utilizado no Brasil para a técnica construtiva de paredes monolíticas em terra crua compactada, e pode ser definida como uma “parede executada com terra no estado úmido, sem ou com estabilizante, compactada em sucessivas camadas, dentro de formas removíveis, com o uso de compactador manual ou mecânico” (ABNT, 2022a, p. 3).

**Fotografia 10 – Construção em taipa de pilão**



**Fonte: Taipal (2022, online)**

A taipa de pilão passou por um processo recente de normatização pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, que culminou no lançamento, em janeiro

de 2022, da NBR 17014 – Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Esta norma traz detalhes sobre o método de seleção da terra; ensaios preliminares para verificação dos requisitos mínimos da terra e da mistura compactada; execução das formas; execução das instalações elétricas e hidrossanitárias; proteção da taipa; e análise estrutural e térmica.

#### 4.2.1 Requisitos mínimos da terra e da mistura compactada

A NBR 17014 (ABNT, 2022a) estabelece que a terra a ser utilizada para construção de paredes de taipa de pilão deve atender às seguintes características:

- 100% de material que passe na peneira com abertura de malha de 50 mm para a taipa com espessura maior que 20 cm;
- 100% de material que passe na peneira com abertura de malha de 19 mm para a taipa com espessura entre 12 cm e 20 cm;
- 50% a 80% de material retido entre as peneiras com abertura de malha de 2 mm e 0,075 mm;
- 20% a 35% de material que passe na peneira com abertura de malha 0,075 mm;
- Limite de liquidez  $\leq 50\%$ ;
- Índice de plasticidade  $\leq 25\%$ . (ABNT, 2022a)

A NBR 17014 (ABNT, 2022a) também indica que a composição granulométrica da terra pode ser corrigida com adição de areia ou com a mistura de dois ou mais tipos de terra. Além disso, é permitido o uso de estabilizante em quantidade mínima para que a taipa atenda aos requisitos físico-mecânicos estabelecidos.

Ainda, de acordo com a NBR 17014 (ABNT, 2022a), a mistura compactada deve possuir massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ )  $\geq 1,750 \text{ g/cm}^3$  e resistência à compressão simples ( $f_c$ )  $\geq 1,3 \text{ MPa}$ .

#### 4.2.2 Método de construção

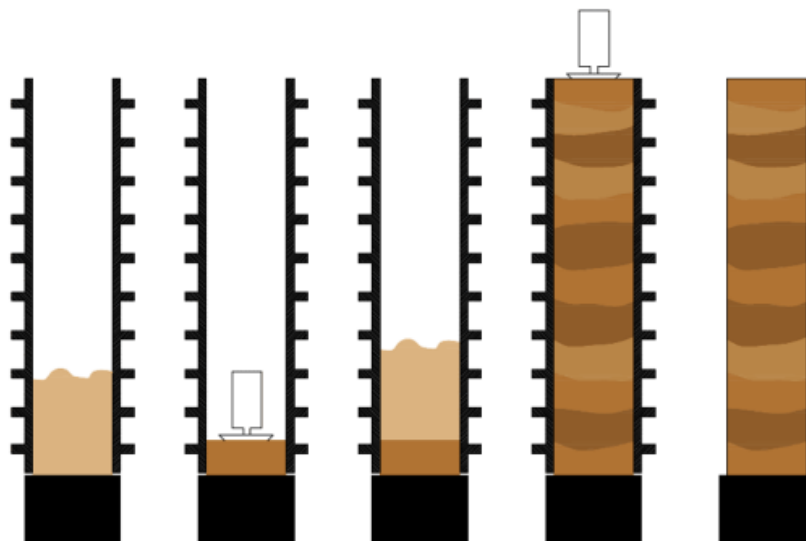
A construção com taipa de pilão segue o mesmo princípio em todos os lugares do mundo: deve-se compactar a mistura de terra úmida, com ou sem estabilizante, dentro de formas. Entretanto, a maneira como essa construção é executada pode variar a depender do tipo de forma a ser empregado, do método de seleção da matéria prima e preparo da mistura, que pode ser mais rudimentar ou mais tecnológico, da inserção ou não de estabilizantes, e do tipo de compactador adotado (manual ou mecanizado). Em países como Estados Unidos, Alemanha, França e Austrália, as

técnicas para se construir com taipa de pilão já acompanham uma indústria dedicada que segue evoluindo, com a criação de novas tecnologias, entre materiais, equipamentos e métodos (MENDES; BESSA, 2022).

De acordo com o que estabelece a NBR 17014 (ABNT, 2022a), o procedimento para se construir uma parede de taipa de pilão consiste basicamente nos seguintes passos:

- Estudo para seleção e melhoria da terra a ser utilizada, por meio de ensaios de laboratório e de campo;
- Projetar, construir e montar a forma;
- Coletar e preparar a terra: destorroar, secar e peneirar. A terra não pode apresentar matéria orgânica ou outros contaminantes;
- Adicionar estabilizante, se necessário;
- Adicionar gradativamente água até o ponto ótimo de umidade, conforme resultados de ensaio de compactação que deve ser realizado previamente;
- Homogeneização da mistura, que pode ocorrer de forma manual ou mecânica;
- Lançamento na forma, também chamada de molde ou taipal;
- Compactação com energia suficiente para atingir a massa específica máxima, usando compactadores manuais ou mecânicos.

**Figura 2 – Processo de preenchimento das formas**



Fonte: Silva (2018, p. 40)



A forma para a produção da taipa deve seguir projeto próprio que contemple o posicionamento das placas, guias, barras de suporte, travas e sequência de desmontagem. Os materiais e a montagem das formas devem garantir rigidez, resistência aos diversos agentes a que possam ser submetidas durante o processo de execução (tais como ações ambientais, cargas de estrutura auxiliar, cargas da taipa, ações causadas pelo lançamento e compactação da mistura), estanqueidade e resistência à abrasão. As formas também devem apresentar superfícies limpas e preparadas com agentes desmoldante para que não haja aderência da mistura à forma (ABNT, 2022a).

Quanto às instalações elétricas e hidrossanitárias, convém que sejam executadas externamente à taipa, devido à dificuldade em se realizar a manutenção de instalações embutida. Todavia, caso se opte pela execução das instalações por embutimento, estas podem ser realizadas tanto antes da compactação da terra, posicionando as tubulações rígidas dentro das formas, quanto após a finalização da parede e durante a secagem, com a abertura de sulcos que devem ser fechados posteriormente com uma mistura plástica de material compatível com a taipa (ABNT, 2022a).

A taipa de pilão deve ser executada sobre fundação impermeabilizada, de modo a impedir a infiltração da água por meio da capilaridade. Além disso, deve ter sua superfície externa protegida da chuva, com impermeabilização da superfície e/ou execução de coberturas e beirais. Nas aberturas de janelas e portas, deve-se executar vergas e contravergas em material estrutural, que devem exceder 1/5 do vão de cada lado, sendo 30 cm no mínimo (ABNT, 2022a).

### **4.3 Propriedades do solo**

Para a engenharia, o solo é definido como o agregado não-cimentado composto por uma mistura natural de diversos minerais e matéria orgânica decomposta, contendo líquido e gás ocupando os espaços vazios entre as partículas sólidas (DAS, 2007).

O solo é um produto gerado pela desagregação física e/ou decomposição química das rochas, causados por agentes diversos, e suas propriedades físicas são em função dos minerais constituintes da rocha da qual esse solo é derivado. A desagregação física dá origem às areias e pedregulhos, ao quebrar rochas grandes em pedaços menores sem alterar sua composição química, enquanto que a

decomposição química é causada por reações químicas que transformam os minerais existentes nas rochas em novos minerais, originando os siltes e as argilas (DAS, 2007).

A depender da sua origem, o solo pode ser denominado como residual, quando permanece no mesmo lugar de sua formação, sobre a rocha que lhe deu origem; sedimentar (transportado), quando é carregado por ação de um agente transportador (como vento, água, deslizamentos, etc) para longe da rocha que lhe deu origem; e orgânico, quando sua formação se dá pela mistura de sedimentos preexistentes e matérias orgânicas como restos de animais e vegetais (SANTIAGO, 2001).

#### 4.3.1 Características físicas do solo

A seguir serão apresentadas as principais características do solo, visando seu uso como material de construção.

##### 4.3.1.1 Granulometria do solo

O tamanho das partículas sólidas do solo é uma das principais características a se levar em consideração para a identificação e classificação do solo. A depender da faixa de tamanho em que as partículas se encontram, os solos podem ser chamados de pedregulho, areia, silte ou argila (DAS, 2007).

De acordo com a classificação dada pela NBR 6502 (ABNT, 2022c), os pedregulhos são pedaços de rochas formados por desagregação física que possuem dimensões entre 2,00 mm e 60 mm. As areias são partículas não coesivas e não plásticas, com dimensões entre 2,00 mm e 0,06 mm, e podem ainda ser divididas em areias finas (dimensões entre 0,06 mm a 0,2 mm), médias (dimensões entre 0,2 mm a 0,6 mm) e grossas (dimensões entre 0,6 mm a 2,0 mm). Os siltes consistem em grãos muito finos, com partículas microscópicas com faixa de tamanho entre 0,06 mm e 0,002 mm, e apresentam baixa ou nenhuma plasticidade. As argilas possuem granulação ainda mais fina que os siltes, com dimensões inferiores a 0,002 mm, e apresentam coesão e plasticidade.

As faixas de tamanho das partículas sólidas que compõem o solo são determinadas através da análise granulométrica, feita normalmente por dois métodos: peneiramento e sedimentação. O ensaio de peneiramento é feito para a fração grossa



do solo (partículas maiores que 0,075 mm) enquanto que o ensaio de sedimentação é designado para a fração fina do solo (partículas menores que 0,075 mm). Para a determinação do tamanho das partículas sólidas do solo, é utilizado os ensaios de peneiramento e sedimentação. Dos resultados dos ensaios, se constrói a curva de distribuição granulométrica, que vai apresentar, além do tamanho das partículas que compõem o solo, o tipo de distribuição dessas partículas (DAS, 2007).

Segundo Das (2007), a distribuição granulométrica pode ser:

- Bem-graduada ou desuniforme: quando o solo apresenta partículas distribuídas em uma ampla faixa de tamanhos;
- Mal graduada ou uniforme: quando o solo apresenta partículas concentradas em uma mesma faixa de tamanho, ou seja, apresentam uniformidade e tamanho;
- Descontínua: quando o solo apresenta uma combinação de duas ou mais frações com granulação uniforme, podendo ser observado um patamar na curva.

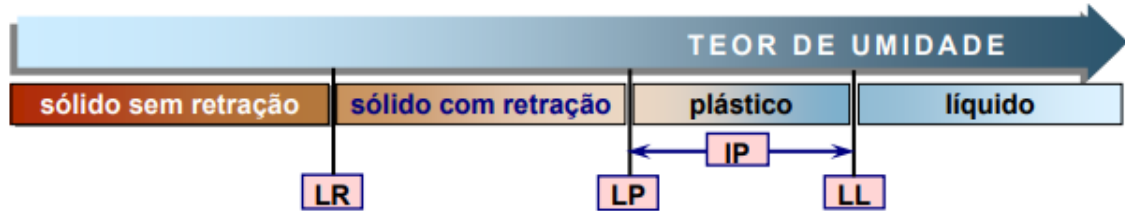
A partir dos ensaios para análise granulométrica, pode-se calcular a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF). A NBR 17054 (ABNT, 2022b) define o DMC como o valor, dado em milímetros, da abertura nominal da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada imediatamente inferior a 5%, em massa. Bauer (2008, p. 80) apresenta a classificação das areias de acordo com o seu módulo de finura: areia fina quando MF for menor que 2,4, areia média quando MF for maior que 2,4 e menor que 3,9; e areia grossa quando MF for maior que 3,9.

#### 4.3.1.2 Estados de consistência do solo: Limites de Atterberg

A depender do grau de umidade e da presença de argila em um solo, este pode apresentar a capacidade de ser moldado sem se esfarelar ou sofrer variações volumétricas e rupturas significativas. A essa propriedade dá-se o nome de plasticidade, e se deve à água adsorvida que envolve as partículas de argila. A consistência de um solo varia de acordo com a quantidade de água presente, quando pouca água pode se comportar como um sólido, e quando muita água pode se comportar como líquido. De acordo com o método desenvolvido por Atterberg, o

comportamento do solo pode ser dividido em quatro estados básicos: sólido, semissólido, plástico e líquido (DAS, 2007, p. 51).

Figura 3 – Estados de consistência do solo



Fonte: NEVES *et al.* (2010, p. 9)

No estado sólido, pode haver perda de peso do solo quando este passar por secagem, mas sem alteração de seu volume. No estado semissólido (também denominado sólido com retração), o solo aparenta estar no estado sólido, entretanto pode haver alterações em seu volume quando passar por secagem. No estado plástico, o solo apresenta plasticidade e se torna moldável. No estado líquido, o solo se comporta como um fluido e não apresenta resistência ao cisalhamento (SANTIAGO, 2001).

De acordo com Das (2007), os limites entre os estados de consistência são conhecidos como *limites de Atterberg* e podem ser encontrados através de ensaios de laboratório, e valem apenas para solos coesivos (com grande percentual de grãos finos). O limite de liquidez (LL) equivale ao teor de umidade em que ocorre a transição entre os estados plástico e líquido. O limite de plasticidade (LP) corresponde ao ponto de teor de umidade que divide os estados semissólido e plástico. É o ponto em que o solo passa a ser moldável.

A partir dos limites de liquidez e plasticidade, é possível determinar o índice de plasticidade (IP), calculado pela Equação (1).

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

O índice de plasticidade compreende a região do estado plástico do solo e é importante para a determinação do grau de plasticidade do solo. De acordo com Burmister (1949) *apud* Das (2007), um solo pode apresentar grau de plasticidade conforme o disposto na Tabela 1.

**Tabela 1 – Índice de plasticidade de acordo com Burmister (1949)**

IP (%)	Descrição
0	Não plástico
1-5	Ligeiramente plástico
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade media
20-40	Plasticidade alta
40	Plasticidade muito alta

Fonte: Burmister (1949) apud Das (2007, p. 57)

O limite de retração (LR) corresponde ao ponto de umidade em que o solo para de perder volume, alcançando um estágio de equilíbrio. Este ponto se localiza entre os estados sólido e semissólido (NEVES *et al.*, 2010).

#### 4.3.1.3 Umidade e Compactação

A compactação do solo está diretamente relacionada ao ganho de resistência do solo, pois é através da compactação que ocorre o aumento do peso específico do solo. Em termos gerais, a compactação é definida como o adensamento do solo por meio da remoção de ar, e exige a aplicação de energia mecânica para que aconteça (DAS, 2007).

A água tem papel de grande importância na compactação do solo, atuando como um agente amolecedor nas partículas sólidas do solo, que as fazem deslizar umas sobre as outras e se posicionar em uma formação compacta de alta densidade. Ao adicionar água gradualmente, mantendo a mesma energia de compactação, ocorre um aumento da massa específica, até atingir uma massa específica máxima. Ao extrapolar determinado teor de umidade, a massa específica tende a diminuir, pois a água passa a ocupar o volume que seria ocupado pelas partículas sólidas (DAS, 2007).

O teor de umidade correspondente à massa específica aparente seca máxima é denominado teor de umidade ótimo. Nesta condição, o solo apresenta a melhor compactação, além de menor porosidade, o que torna o solo mais resistente mecanicamente (NEVES *et al.*, 2010).

O teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima é determinado por meio do ensaio de compactação descrito na norma NBR 7182 (ABNT, 2016d). Neste ensaio, é compactado uma amostra de solo dentro de um molde, chamado cilindro de Proctor. A partir da compactação de diferentes amostras de solo, com teores de umidade distintos, é construído a curva de compactação, da

qual se extrai a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima (que são os valores correspondentes ao vértice da curva).

Além da umidade, existem outros fatores que podem afetar o grau de compactação de um solo, tais como o tipo de solo (distribuição granulométrica, a forma dos grãos, o peso específico dos solos e a quantidade e o tipo de minerais de argila presentes) e a energia de compactação aplicada (DAS, 2007).

#### 4.3.2 Estabilização do solo

Estabilização do solo é “o processo de introdução de modificações nas propriedades de um solo de modo a conseguir-se melhorar as características do mesmo” (SANTIAGO, 2001, p. 58). Quando se pretende empregar o solo como material de construção, ao se estudar suas propriedades físicas pode ser identificado a necessidade de melhorias em suas propriedades para adequá-lo à finalidade a que se destina. É possível atingir melhorias como o aumento da resistência à compressão e resistência ao impacto do solo, redução das fissuras dos elementos construídos com solo, redução da porosidade e permeabilidade, redução da expansão e contração e consequente variação dimensional (FREIRE; 2003).

Existem diversas maneiras de melhorar as características do solo, com o emprego de técnicas ou materiais que podem se subdividir nos seguintes grupos, de acordo com Santiago (2001):

- mecânica: quando há um rearranjo das partículas sólidas do solo, com o uso de algum equipamento, sem que seja preciso adicionar outras substâncias;
- física: quando há intervenção na textura do solo, através da mistura controlada de grãos ou da adição de fibras, assim como por tratamento térmico;
- química: quando um produto químico é introduzido, de modo a alterar as características iniciais do solo utilizado, através de reações entre as partículas do solo e o material ou produto usado, ou por meio da criação de uma matriz;
- mista: quando se utiliza uma combinação de alguns dos tipos de estabilização supramencionados.

A estabilização com a adição de materiais pode ser feita com materiais naturais ou industriais, sendo comum o emprego de fibras vegetais (como palhas, pó de serra, feno, cânhamo, fibras de bambu, etc) e sintéticas (celofane, aço, fibra de vidro), e aditivos químicos como cimento, cal, resinas, betume, entre outros (SANTIAGO, 2001).

A estabilização de um solo deve ser feita com base em estudos das propriedades do solo, através dos ensaios de laboratório e de campo, que vão apresentar o estado atual do solo e indicar se há ou não necessidade de melhorias, a depender da finalidade do uso, e qual propriedade deverá ser melhorada. A partir destas análises é que será possível fazer a escolha do método mais adequado para a estabilização. Para Santiago (2001), além das características do solo e da propriedade que se deseja melhorar, os principais pontos a se levar em consideração para se fazer uma estabilização são os custos da obra, bem como o cronograma, e a técnica de construção a ser empregada, pois há métodos de estabilização que se adaptam a algumas técnicas, mas não funcionam para outras técnicas. Aspectos socioculturais e ambientais também devem ser considerados na hora de definir o tipo de intervenção que será feito (NEVES *et al.*, 2010).

#### 4.3.3 O solo da região do município de Campo Mourão

A formação geológica do município de Campo Mourão se localiza na Bacia do Paraná, um compartimento geológico do Estado do Paraná, que se caracteriza por extensos derrames de rochas ígneas, com predominância do basalto (MINEROPAR, 2001). O basalto, por sua vez, é uma rocha ígnea, de textura fina e rica em minerais como plagioclásio, piroxênios e olivina (DAS, 2007).

As propriedades físicas do solo localizado nas intermediações da UTFPR, campus Campo Mourão, foram estudadas por Batelo (2019), que realizou ensaios de laboratório para a caracterização e classificação do solo, apresentando os Limites de Atterberg indicados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Limites de Atterberg de um solo de Campo Mourão**

<b>Propriedade</b>	<b>Valor médio</b>
Limite de Liquidez	55%
Limite de Plasticidade	29%
Índice de plasticidade	26%

**Fonte: Adaptado de Batelo (2019, p. 62)**

Em relação à análise granulométrica, o solo apresentou os seguintes percentuais: areia grossa variando de 0,4% a 1,2%; areia média de 1,5% a 2,8%; areia fina de 4,0% a 7,9%; silte de 29,7% a 40,7%; argila de 48,6% a 62,3% (BATELO, 2019).

Por fim, Batelo (2019) classificou o solo como: argilo-siltoso, de acordo com o sistema de classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas; argila de alta plasticidade (solo do tipo CH), de acordo com o sistema de classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação do Solos); e solo argiloso do grupo A-7-6, de acordo com o sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

## 5 MATERIAIS E MÉTODO

Nesta seção, será detalhada a metodologia que foi empregada para que fosse possível atingir os objetivos previamente definidos.

### 5.1 Materiais

Os materiais que estão descritos nesta seção compõem a mistura que foi submetida aos ensaios de caracterização e resistência que serão detalhados na seção seguinte. São eles: o solo, a areia e a água. Outros materiais utilizados para a realização dos ensaios, tais como ferramentas, equipamentos e máquinas, serão apresentados na descrição metodológica de cada ensaio.

O solo foi coletado nas intermediações da UTFPR – Campo Mourão, próximo aos locais em que Batelo (2019) realizou as suas coletas para a classificação do solo da região. A intenção foi obter um solo com as características mais próximas possíveis do solo estudado por Batelo. Para a coleta, removeu-se uma camada do solo que foi descartada por conter alto teor de matéria orgânica, e separou-se para os ensaios uma porção de solo de uma camada a uns 50 cm de profundidade. Em seguida, o solo foi distribuído em bandejas para secagem ao ar.

**Figura 4 – Local de coleta do solo**



**Fonte: Google Earth (2022, online)**

A areia utilizada foi disponibilizada pela UTFPR. Após a coleta na baía de agregados da universidade, a amostra foi levada para secagem em estufa por 24h à 105°C.

**Fotografia 11 – Baía de agregados da universidade**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para os ensaios de determinação de limite de liquidez e plasticidade, utilizou-se água destilada e para os ensaios de compactação e resistência à compressão utilizou-se água potável disponível no laboratório de mecânica dos solos da UTFPR – Campo Mourão.

## **5.2 Método**

Para realizar este estudo, primeiramente foi determinado a composição granulométrica da areia que seria adicionada à mistura com o intuito de corrigir a composição granulométrica do solo. Em seguida, foram propostos três traços de composição de solo e areia para serem submetidos aos ensaios de caracterização e resistência. Para a caracterização das misturas, foram realizados os ensaios de determinação dos limites de liquidez e plasticidade e o ensaio de compactação para obter a massa específica aparente seca e o teor de umidade ótimo. Para a determinação da resistência das misturas, foi realizado o ensaio de resistência a compressão simples em corpos de prova cilíndricos.

### **5.2.1 Correção da composição granulométrica do solo**

Os resultados dos ensaios de caracterização trazidos por Batelo (2019) mostraram que o solo das intermediações da UTFPR de Campo Mourão possui parâmetros que não atendem aos requisitos mínimos exigidos pela norma NBR 17014 (ABNT, 2022a), por esse motivo, optou-se por realizar a estabilização do solo a partir da correção granulométrica com areia de construção, com o intuito de melhorar as características físicas e buscar atender aos requisitos exigidos pela norma.



Para determinar a composição de solo corrigido com areia, foi necessário determinar inicialmente a composição granulométrica da areia a ser utilizada. O ensaio foi feito seguindo a NBR 17054 – Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio (ABNT, 2022b).

Os equipamentos utilizados para este ensaio foram:

- balança com resolução de 0,1g;
- peneiras da série normal, com tampa e fundo;
- agitador mecânico;
- bandeja metálica e escova.

Foram separadas duas porções de amostras de areia para o ensaio, com massas aproximadas. As amostras foram secadas em estufa e em seguida esfriadas à temperatura ambiente. Em seguida, as amostras, uma por vez, foram dispostas na peneira superior do conjunto de peneiras da série normal, encaixadas com aberturas na ordem crescente da base para o topo.

**Fotografia 12 – Amostra de areia**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Cada amostra passou por agitação mecânica para separação e classificação prévia dos grãos e, em seguida, cada peneira (começando pela superior até a base) foi destacada do conjunto e passou por agitação manual, e com o auxílio de uma escova metálica o material foi colocado em um recipiente para determinação da massa. Com as massas determinadas, foi feita a curva granulométrica.

**Fotografia 13 – Peneiramento da areia**



**Fonte: Aatoria própria (2022)**

Com base nos resultados da composição granulométrica da areia e dos resultados de caracterização do solo obtidos nos estudos de Batelo (2019), foram definidas as composições de solo e areia a serem submetidas aos ensaios de caracterização e resistência.

### 5.2.2 Limites de Atterberg

Os ensaios para a determinação dos limites de liquidez e limites de plasticidade, também chamados de Limites de Atterberg, estão descritos a seguir.

### 5.2.2.1 Determinação dos limites de liquidez

A determinação dos limites de liquidez das misturas foi realizada conforme a norma NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016b). Os processos descritos a seguir foram feitos para todas as composições de solo e areia definidas.

Os equipamentos utilizados para este ensaio foram:

- cápsula de porcelana com aproximadamente 120 mm de diâmetro;
- espátula de lâmina flexível;
- aparelho de Casagrande;
- cinzel;
- balança com resolução de 0,01g;
- capsulas metálicas para determinação da umidade;
- estufa.

**Fotografia 14 – Aparelho de Casagrande e cinzel**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

A preparação das amostras foi feita de acordo com a NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016a), conforme item 5 – Preparação de amostras para ensaios de caracterização, com secagem prévia. Após secagem e destorroamento, tomou-se uma porção de material que foi passado na peneira 0,42 mm. O material obtido constituiu então a amostra a ser ensaiada.

**Fotografia 15 – Mistura de solo e areia**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para a determinação do limite de liquidez, tomou-se metade da quantidade da amostra preparada. A amostra foi colocada em uma cápsula de porcelana e a água foi adicionada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo com o auxílio de uma espátula, até obter uma pasta homogênea. Em seguida, a pasta foi transferida para o aparelho de Casagrande, de modo que a espessura na parte central fosse da ordem de 10mm. Com o cinzel, a massa foi dividida ao meio, de maneira que uma ranhura foi aberta na parte central, conforme Fotografia 16. Em seguida, foram aplicados sucessivos golpes com o aparelho, para que as bordas inferiores da ranhura se unissem ao longo de pelo menos cerca de 13 mm de comprimento. Imediatamente após o fechamento da ranhura, cerca de 10g do material foi transferido para um recipiente para ter a sua umidade determinada.



**Fotografia 16 – Ensaio de limite de liquidez**



**Fonte: Aatoria própria (2022)**

Esse procedimento foi feito de maneira a se obter 5 pontos de ensaio, adicionando a cada vez um novo incremento de água, cobrindo um intervalo entre 15 e 35 golpes para fechar a ranhura. Com os resultados obtidos, foi construído um gráfico no qual as ordenadas fossem os números de golpes e as abscissas os teores de umidade. O limite de liquidez é encontrado através da equação da reta obtida e é o teor de umidade correspondente a 25 golpes. Na impossibilidade de se obter a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, deve-se considerar a mostra como não apresentando limite de liquidez (NL).

#### 5.2.2.2 Determinação dos limites de plasticidade

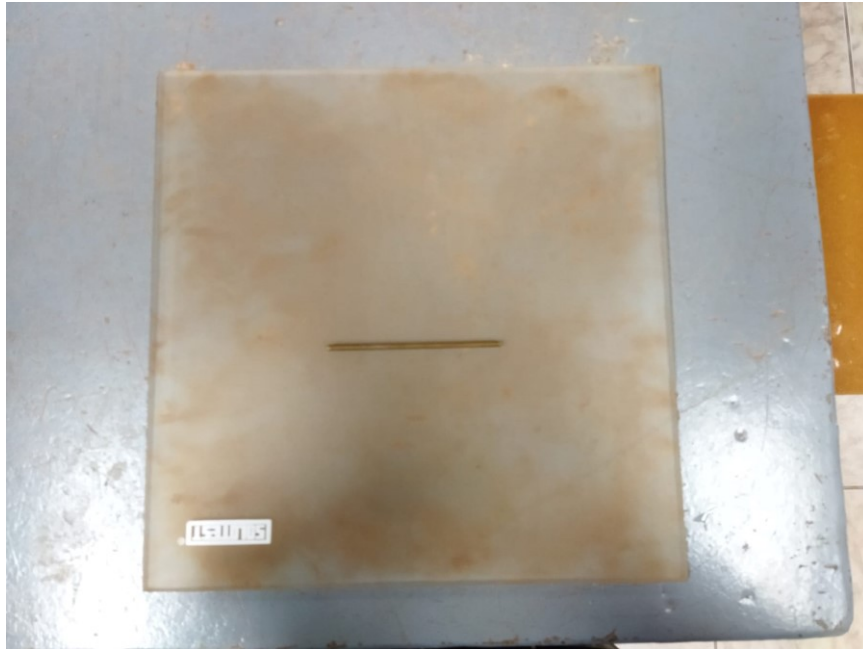
O ensaio para a determinação do limite de plasticidade foi realizado conforme a NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016c).

Os equipamentos utilizados para esse ensaio foram:

- capsula de porcelana de aproximadamente 120mm de diâmetro;
- espátula de lâmina flexível;
- capsulas metálicas;
- balança com resolução de 0,01g;

- placa de vidro de superfície esmerilhada com cerca de 30 cm de lado;
- gabarito cilíndrico com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

**Fotografia 17 – Placa de vidro esmerilhada e gabarito**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para este ensaio, a amostra preparada foi colocada em uma cápsula de porcelana. Foi adicionado água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo com o auxílio de uma espátula de maneira a se ter uma pasta homogênea de consistência plástica.

**Fotografia 18 – Preparo da mistura com água**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Em seguida, tomou-se uma pequena porção da amostra para formar uma pequena bola com as mãos, que foi rolada sobre uma placada de vidro com pressão suficiente da palma da mão para dar a forma de um cilindro. O intuito foi formar um cilindro que se fragmentasse ao atingir um diâmetro de 3 mm e um comprimento de 100 mm, se a amostra se fragmentasse antes, era adicionado um novo incremento de água, se a amostra passasse dos 100 mm, era amassada novamente de modo a repetir o procedimento. Quando a amostra atingia as espessuras desejadas, uma porção da amostra era imediatamente transferida para um recipiente de modo a se obter o teor de umidade.

**Fotografia 19 – Cilindro e gabarito**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Esse ensaio foi realizado de modo a se obter três valores de teores de umidade, sendo que o resultado final para o limite de plasticidade é a média dos três valores, expresso em porcentagem. Na impossibilidade de se obter um cilindro com 3 mm de diâmetro, deve-se considerar a mostra como não apresentando limite de plasticidade (NP).

### 5.2.3 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado seguindo os procedimentos definidos na NBR 7182 – Solo – Ensaio de Compactação (ABNT, 2016d). O ensaio foi feito para as três composições de solo e areia determinados previamente e as amostras foram preparadas conforme NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os equipamentos para a realização deste ensaio foram:

- balanças com resolução de 1g e 0,01 g;
- peneira de 4,75 mm;
- estufa;
- capsulas metálicas para a determinação da umidade;
- bandeja metálica de 75 cm por 50 cm;
- cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor), compreendendo o molde cilíndrico, sua base e o cilindro complementar de mesmo diâmetro;
- soquete pequeno, metálico e com massa de 2500 g, dotado de dispositivo de controle de altura de queda;
- provetas de vidro com capacidade de 100 cm<sup>3</sup> e 500 cm<sup>3</sup>;
- desempenadeira de madeira;
- extrator de corpo de prova;
- papel filtro para colocar na base do molde e evitar a aderência da mistura ao molde.

**Fotografia 20 – Cilindro de Proctor e soquete**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Utilizou-se o ensaio com reuso de material, sobre amostras preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. Foram preparados os corpos de prova



com teor de umidade presumível inicial de 10%, sendo incrementado a cada vez 2% de água, obtendo assim os pontos da curva de compactação.

**Fotografia 21 – Mistura de solo e areia**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Como procedimento, tomou-se a amostra preparada em uma bandeja e acrescentou-se a água aos poucos, revolvendo continuamente até obter uma mistura homogênea. Em seguida, procedeu-se com a compactação: foi disposto no molde cilindro pequeno uma porção da mistura, de modo que após a compactação desta camada, a mistura compactada ocupasse cerca de um terço do cilindro. Para a energia normal de compactação para o cilindro pequeno, são necessárias três camadas de compactação, sendo que se aplicam 26 golpes em cada camada com o soquete pequeno, distribuídos uniformemente por toda a superfície de cada camada.

**Fotografia 22 – Compactação dentro do molde**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Após a compactação do corpo de prova, o conjunto de molde cilíndrico e mistura compactada foram pesados, e em seguida o corpo de prova foi extraído do cilindro com o auxílio de um extrator manual e desmanchado a fim de se retirar duas pequenas porções de amostras do centro do cilindro, que foram transferidas para uma capsula e pesadas imediatamente para a determinação da massa da mistura úmida. Esse procedimento foi feito para todos os corpos de provas, e as capsulas com as amostras foram levadas à estufa por cerca de 24h.

Com os resultados das massas da mistura úmida e da mistura seca, foi possível calcular os teores de umidade e correspondente massa específica aparente seca, e assim foi construída a curva de compactação utilizando-se coordenadas cartesianas normais, em que as abcissas indicam os teores de umidade e as ordenadas as massas específicas aparentes secas. A partir da curva de compactação, foi possível encontrar a massa específica aparente seca máxima, que é o valor correspondente à ordenada máxima na curva de aproximação, e seu correspondente teor de umidade, denominado teor de umidade ótimo.

**Fotografia 23 – Extração do corpo de prova**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

#### 5.2.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Para a determinação da resistência à compressão simples, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para cada traço de mistura de solo e areia. A moldagem dos corpos de prova seguiu o procedimento estabelecido na NBR 12024 (ABNT, 2012a), conforme determina o Anexo A da NBR 17014 (ABNT, 2022a).

As misturas foram homogeneizadas em uma bandeja e foi acrescentada a quantidade de água correspondente ao teor de umidade ótimo obtido na curva de compactação de cada amostra, com aproximadamente 1 ponto percentual acima, de maneira a compensar a perda de água por evaporação. Após a homogeneização, a mistura foi compactada seguindo o mesmo procedimento do ensaio de compactação, com energia normal de compactação, de modo a atingir massa específica aparente seca obtida na curva de compactação para cada amostra.

Com os resultados da massa específica aparente seca para cada corpo de prova, foi calculado o grau de compactação (GC), expresso em porcentagem, conforme Equação (2):

$$GC = \frac{\gamma_c}{\gamma_d} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$\gamma_c$  é a massa específica aparente seca do corpo de prova, expressa em  $\text{g/cm}^3$ ;

$\gamma_d$  é a massa específica aparente seca máxima encontrada na curva de compactação, expressa em  $\text{g/cm}^3$ .

De acordo com o Anexo A da NBR 17014 (ABNT, 2022a), os corpos de prova devem apresentar grau de compactação entre 95% e 105%, caso fiquem fora desse intervalo devem ser descartados.

**Fotografia 24 – Corpos de prova**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os corpos de prova foram extraídos do molde com o auxílio do extrator manual, sendo devidamente identificados e em seguida foram acondicionados em ambiente controlado de temperatura e umidade relativa ao ar, onde ficaram curando por 7 dias.

Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, conforme procedimento descrito no Anexo C da



NBR 17014 (ABNT, 2022a). Cada corpo de prova teve seu diâmetro medido com o auxílio de um paquímetro, para cálculo da área da seção transversal, e em seguida foram colocados em instrumento capaz de aplicar cargas de modo progressivo e sem choques. Para regularização das imperfeições nas faces do corpo de prova foi colocado um disco de Neoprene (um material feito de borracha para este propósito), em substituição ao capeamento com pasta de cimento. Foi aplicado carregamento contínuo com velocidade constante até a ruptura do corpo de prova e a carga de ruptura foi devidamente registrada.

**Fotografia 25 – Ruptura dos corpos de prova**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Com a carga de ruptura obtida através do ensaio, foi calculado, utilizando a Equação (3), o valor individual de resistência à compressão simples de cada corpo de prova cilíndrico.

$$f_c = \frac{F_{rup}}{A_{rup}} \quad (3)$$

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão simples do corpo de prova, expresso em megapascals (MPa);

$F_{rup}$  é a carga de ruptura, expressa em newtons (N);

$A_{rup}$  é a área da seção transversal do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios de caracterização e resistência de três composições de solo e areia. Os apêndices A, B, C e D complementam os resultados.

### 6.1 Correção da composição granulométrica do solo

Os resultados encontrados a partir do ensaio da composição granulométrica da areia, bem como os traços das misturas de solo e areia que foram definidos, estão dispostos a seguir.

#### 6.1.1 Composição granulométrica da areia

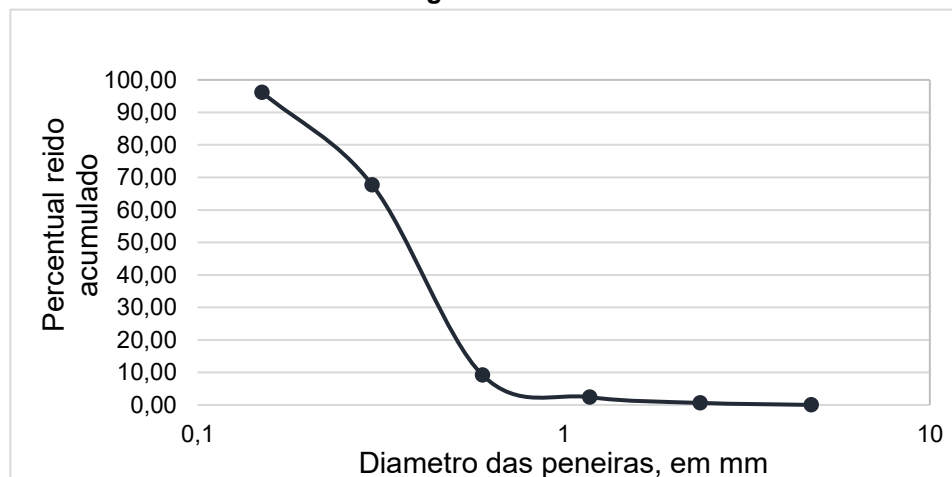
A composição granulométrica da areia utilizada foi encontrada a partir da média de duas amostras analisadas. Os resultados individuais obtidos para cada amostra constam no Apêndice A. A curva granulométrica apresentada no Gráfico 1 foi construída com base nos resultados médios, constantes na Tabela 3.

**Tabela 3 – Composição granulométrica da areia**

Abertura da malha da peneira (mm)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média retida acumulada (%)
4,75	0,02	0,02
2,36	0,62	0,64
1,18	1,76	2,40
0,6	6,79	9,19
0,3	58,45	67,64
0,15	28,54	96,18
Fundo	3,82	100

Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados da composição granulométrica mostraram que a areia contém maior porcentagem de areia fina e média (grãos entre 0,06 mm e 0,6 mm), com uma pequena quantidade (menos de 4%) de silte e argila e não contendo porcentagens expressivas de areia grossa. A areia também apresentou dimensão máxima característica igual a 1,18 mm e módulo de finura igual a 2,76 mm. Portanto, a areia foi classificada como areia média. Estes resultados mostram que areia é adequada para ser utilizada, no entanto, uma areia melhor graduada seria o ideal.

#### 6.1.2 Definição dos traços para correção da composição granulométrica do solo

A definição dos traços foi feita com base em um estudo de Araújo, Ferreira e César (2010), que analisou 8 composições de solos argilosos com adição de areia, e indicou que, para a técnica taipa de pilão, as composições com traços entre 1:1 e 1:2 foram as que apresentaram melhor desempenho. Alguns autores (TORRALBA; EIRE; JALALI (2009), FREIRE (2003)) também sugerem que os solos mais indicados para a construção de taipa de pilão são solos que possuem entre 50% a 70% de teor de areia em sua composição.

As três composições das misturas definidas estão apresentadas na Tabela 4. O traço foi definido a partir da massa, sendo que o traço 1:1, por exemplo, significa que para cada 1 kg de solo acrescenta-se 1 kg de areia, e assim por diante.

**Tabela 4 – Traços das composições de solo e areia a serem estudadas**

Mistura	Traço (solo:areia)
1	1:1
2	1:1,5
3	1:2

Fonte: Autoria própria (2022)

## 6.2 Limites de Atterberg

Foram realizados os ensaios para determinação de limite de liquidez (LL) e limite plasticidade (LP) para as 3 misturas. O Apêndice B complementa todos os resultados apresentados nesta seção.

Os teores de umidade encontrados no ensaio de limite de liquidez para a mistura 1 estão dispostos na Tabela 5, com os correspondentes números de golpes necessários para fechar a ranhura.

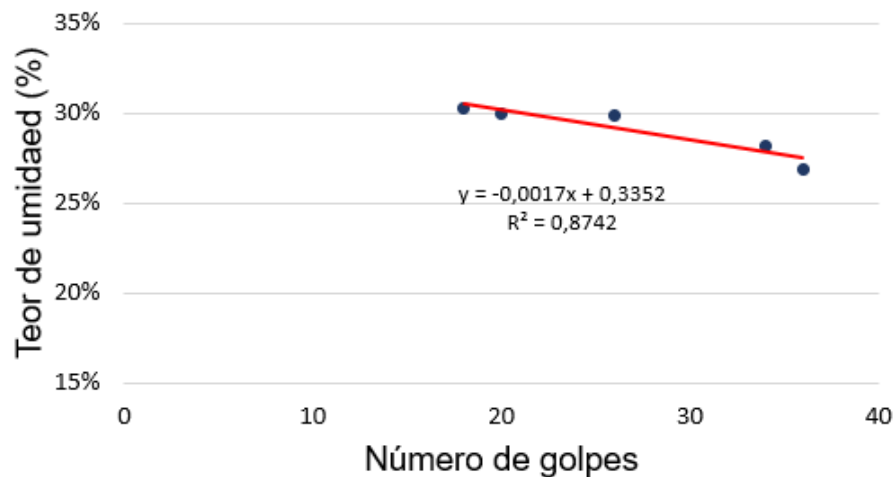


**Tabela 5 – Teores de umidade para LL (mistura 1)**

Amostra	1	2	3	4	5
Umidade (%)	30,23	30,00	29,86	28,17	26,89
Número de golpes	18	20	26	34	36

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir destes resultados, foi construído o Gráfico 2. O limite de liquidez é o teor de umidade correspondente a 25 golpes, e pode ser encontrado através da equação da linha de tendência, em vermelho no gráfico.

**Gráfico 2 – Linha de tendência para LL (mistura 1)**

Fonte: Autoria própria (2022)

Para a mistura 1, o limite de liquidez encontrado foi de 29%.

A Tabela 6 apresenta os teores de umidade encontrados no ensaio de limite de plasticidade para a mistura 1.

**Tabela 6 – Teores de umidade para LP (mistura 1)**

Amostra	Teor de umidade (%)	Umidade média (%)
1	17	18
2	19	
3	18	

Fonte: Autoria própria (2022)

O limite de plasticidade corresponde à média dos três teores de umidade. Portanto, da tabela, tem-se limite de plasticidade igual a 18%. O índice de plasticidade (IP) para a mistura 1, calculado de acordo com a Equação (2), foi de 11%.

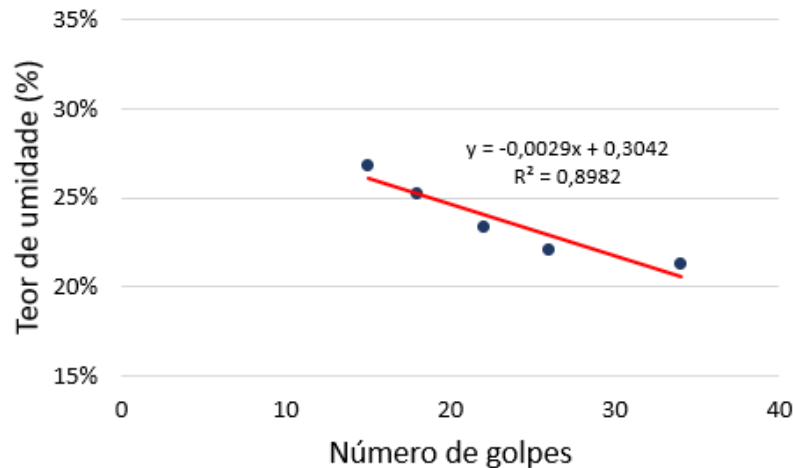
A Tabela 7 traz os resultados para os teores de umidade e correspondentes números de golpes necessários para fechar a ranhura para a mistura 2.

**Tabela 7 – Teores de umidade para LL (mistura 2)**

Amostra	1	2	3	4	5
Teor de Umidade (%)	26,81	25,22	23,37	22,11	21,27
Número de golpes	15	18	22	26	34

Fonte: Autoria própria (2022)

O limite de liquidez para a mistura 2, encontrado a partir da equação da linha de tendência do Gráfico 3, foi de 23%.

**Gráfico 3 – Linha de tendência para LL (mistura 2)**

Fonte: Autoria própria (2022)

O resultado para o limite de plasticidade para a mistura 2 foi de 20%, conforme apresentado na Tabela 8. O índice de plasticidade obtido foi de 3%.

**Tabela 8 – Teores de umidade para LP (mistura 2)**

Amostra	Teor de umidade (%)	Umidade média (%)
1	20	20
2	21	
3	20	

Fonte: Autoria própria (2022)

Para a mistura 3, não foi possível obter o fechamento da ranhura com mais de 25 golpes, portanto, a mistura não apresentou limite de liquidez (NL). Em relação ao limite de plasticidade, não foi possível moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, portanto a mistura também não apresentou limite de plasticidade (NP), e consequentemente não apresentou índice de plasticidade. Estes resultados foram condizentes com solos com alto teor de areia, devido à falta de coesão que a areia proporciona. Resultados de estudos do solo feitos por Araújo, Ferreira e César (2010) e Vieira (2017) também não apresentaram limites de liquidez e plasticidade para solos corrigidos com aproximadamente a mesma quantidade adicionada de areia.

Todos os resultados para os limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade foram sumarizados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Resultados gerais dos Limites de Atterberg**

Mistura	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
1	29	18	11
2	23	20	3
3	NL	NP	NP

Fonte: Aatoria própria (2022)

A NBR 17014 (ABNT, 2022a) estabelece que o limite de liquidez deve ser menor ou igual a 50% e índice de plasticidade menor ou igual a 25%.

Os resultados obtidos para as misturas 1 e 2 ficaram abaixo dos limites estabelecidos por norma, atendendo aos requisitos. Quanto aos resultados para a mistura 3, não há impedimentos mencionados em norma quanto ao uso de solos que não apresentam limites de liquidez e plasticidade.

De acordo com a classificação em função do índice de plasticidade apresentada na Tabela 1, a mistura 1 (traço 1:1) apresentou uma mistura com plasticidade média, a mistura 2 (traço 1:1,5) apresentou uma mistura ligeiramente plástica e a mistura 3 (traço 1:2) apresentou uma mistura não plástica.

### 6.3 Ensaio de compactação

A seguir serão apresentados os principais resultados do ensaio de compactação, bem como a curva de compactação para as 3 misturas estudadas. O Apêndice C complementa, em detalhes, todos os resultados apresentados nesta seção.

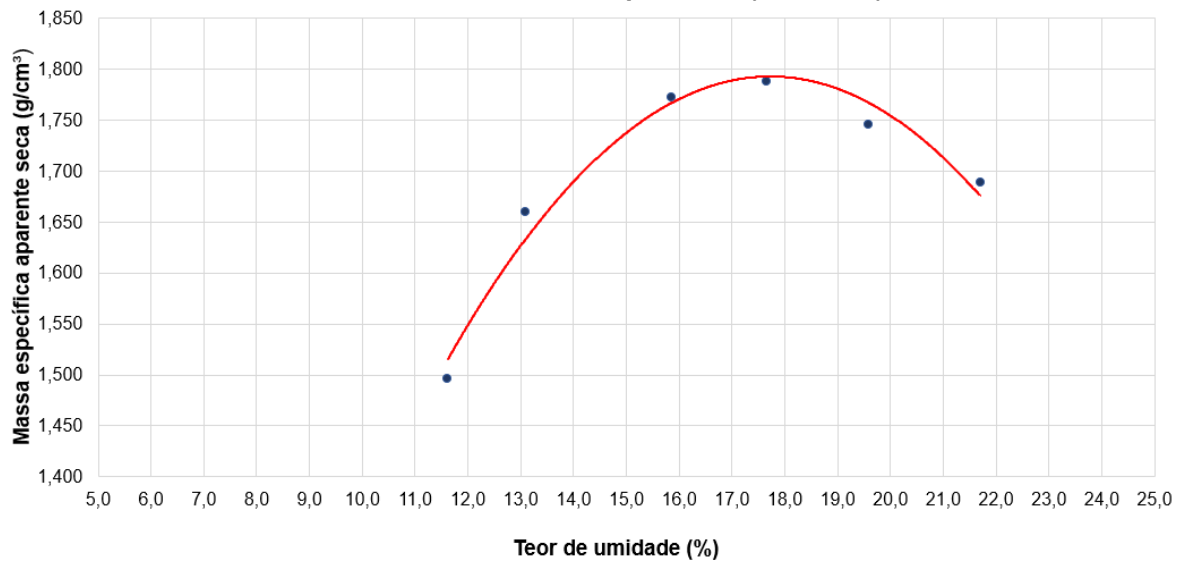
Para compor a curva de compactação para a mistura 1, foram moldados inicialmente 5 corpos de prova, entretanto, durante a execução do ensaio julgou-se necessário a moldagem de mais um corpo de prova para que fosse possível construir a curva de compactação, resultando assim em 6 corpos de prova com 6 teores de umidade diferentes, obtendo 6 pontos de ensaio, dispostos na Tabela 10.

**Tabela 10 – Ensaio de compactação (mistura 1)**

Ponto	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )
1	11,6	1,496
2	13,1	1,660
3	15,9	1,772
4	17,7	1,788
5	19,6	1,746
6	21,7	1,689

Fonte: Aatoria própria (2022)

Com os resultados da Tabela 10, foi construída a curva de compactação expressa no Gráfico 4, obtendo uma massa específica aparente seca máxima de 1,79 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade ótimo de 18%.

**Gráfico 4 – Curva de compactação (mistura 1)**

Fonte: Autoria própria (2022)

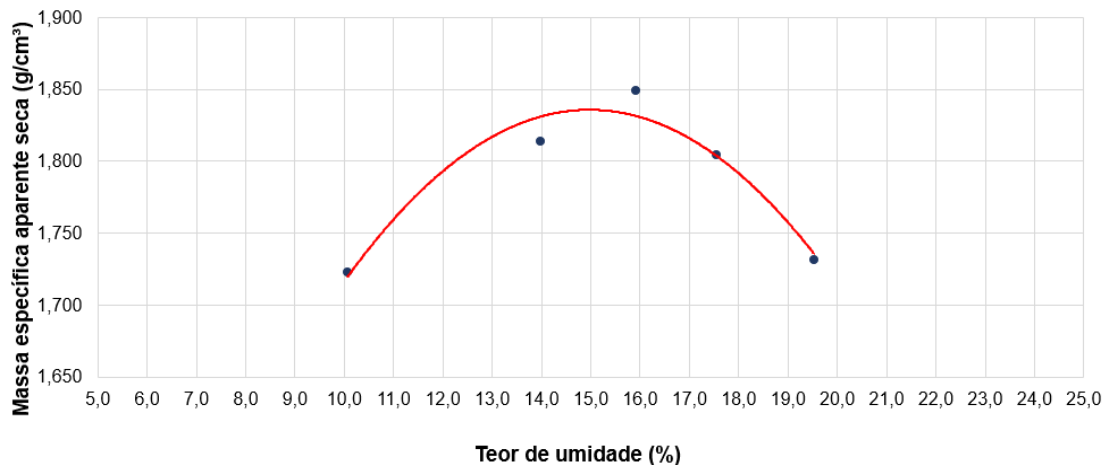
Para o ensaio de compactação da mistura 2, foram moldados 5 corpos de prova com teores de umidade diferentes, obtendo assim os 5 pontos de ensaio da Tabela 11.

**Tabela 11 – Ensaio de compactação (mistura 2)**

Ponto	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
1	10,1	1,723
2	14,0	1,814
3	15,9	1,849
4	17,6	1,804
5	19,5	1,731

Fonte: Autoria própria (2022)

Com os resultados da Tabela 11, foi construída a curva de compactação expressa no Gráfico 5, obtendo uma massa específica aparente seca máxima de 1,84 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 15%.

**Gráfico 5 – Curva de compactação (mistura 2)**

Fonte: Autoria própria (2022)

Para o ensaio de compactação da mistura 3, foram moldados 5 corpos de prova com teores de umidade diferentes, obtendo 5 pontos de ensaio (Tabela 12).

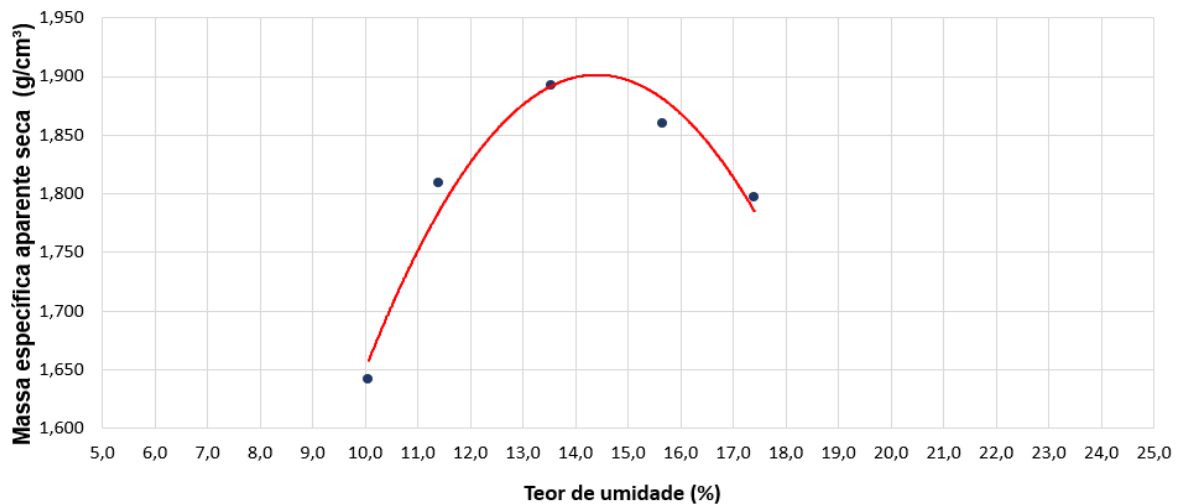
**Tabela 12 – Ensaio de compactação (mistura 3)**

Ponto	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )
1	10,1	1,642
2	11,4	1,810
3	13,5	1,893
4	15,6	1,860
5	17,4	1,797

Fonte: Autoria própria (2022)

Da curva de compactação para a mistura 3 (Gráfico 6), obteve-se uma massa específica aparente seca máxima de 1,90 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade ótimo de 14,5%.

**Gráfico 6 – Curva de compactação (mistura 3)**



Fonte: Autoria Própria (2022)

#### 6.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Com base nos valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo obtidos nos ensaios de compactação, foram moldados os corpos de prova para as 3 misturas. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples após 7 dias de cura. O Apêndice D complementa os resultados trazidos nesta seção.

Os corpos de prova para a mistura 1 foram moldados de modo a se obter teor de umidade próximo a 18%, com respectiva massa específica aparente seca de 1,79 g/cm<sup>3</sup>, obtidos na curva de compactação. Os resultados de compactação estão expressos na Tabela 13.

**Tabela 13 – Compactação dos corpos de prova (mistura 1)**

Corpo de prova	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de compactação (%)
1	19,6	1,724	96
2	18,8	1,764	99
3	18,6	1,781	99
4	19,9	1,719	96
5	19,6	1,749	98
6	19,3	1,752	98
<b>Média</b>		<b>1,748</b>	

Fonte: Aatoria própria (2022)

Os 6 corpos apresentaram grau de compactação entre 95% e 105%, sendo todos considerado aptos para o ensaio de resistência. Entretanto, os corpos de prova 1, 4 e 5 apresentaram uma massa específica aparente seca abaixo do requisito mínimo dado pela norma, que é  $(\gamma_d) \geq 1,750 \text{ g/cm}^3$ , e a média das massas específicas aparentes secas também ficou abaixo do requisito mínimo. Esses resultados podem ser explicados pela dificuldade que se teve de se atingir um grau de compactação mais próximo a 100%, causada pela presença de um teor de umidade maior do que o esperado. A diferença entre os teores de umidade dos corpos de prova e o teor de umidade ótimo pode ser explicado porque durante a execução do ensaio, além da quantidade da água adicionada equivalente ao teor de umidade ótimo, foi adicionada aproximadamente 1% a mais considerando uma possível perda de água por evaporação, conforme sugere a norma.

O ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova para a mistura 1 apresentou os resultados que estão na Tabela 14.

**Tabela 14 – Resistência à compressão simples (mistura 1)**

Corpo de prova	Força de ruptura (kN)	Resistencia à compressão simples (MPa)
1	3,50	0,45
2	5,10	0,67
3	6,10	0,80
4	5,20	0,68
5	5,20	0,67
6	5,80	0,76

Fonte: Aatoria própria (2022)

A NBR 17014 (ABNT, 2022a) determina que os corpos de prova avaliados devem atender ao valor individual de resistência a compressão simples  $(f_c) \geq 1,3 \text{ Mpa}$ . Conforme exposto pela Tabela 14, todos os corpos de prova apresentaram valores de resistência a compressão simples muito abaixo do requisito dado pela norma.

Os corpos de prova para a mistura 2 foram moldados de modo a se obter teor de umidade próximo a 15%, com respectiva massa específica aparente seca de  $1,84 \text{ g/cm}^3$ , obtidos na curva de compactação.

**Tabela 15 – Compactação dos corpos de prova (mistura 2)**

Corpo de prova	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de compactação (%)
1	15,4	1,779	97
2	15,7	1,805	98
3	15,0	1,824	99
4	16,0	1,741	95
5	15,8	1,818	99
6	15,7	1,836	100
<b>Média</b>		<b>1,800</b>	

Fonte: Autoria própria (2022)

Todos os corpos de prova foram considerados aptos para o ensaio de resistência, pois apresentaram grau de compactação entre 95% e 105%. As massas específicas aparentes secas de todos os corpos de prova ficaram acima de  $(\gamma_d) \geq 1,750 \text{ g/cm}^3$ , atendendo ao requisito da norma.

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão simples dos corpos de prova para a mistura 2.

**Tabela 16 – Resistência a compressão simples (mistura 2)**

Corpo de prova	Força de ruptura (kN)	Resistencia à compressão simples (MPa)
1	3,50	0,45
2	5,30	0,68
3	5,20	0,66
4	4,60	0,59
5	6,50	0,84
6	6,50	0,83

Fonte: Autoria própria (2022)

Assim como acontece para os corpos de prova da mistura 1, todos os corpos de prova da mistura 2 apresentaram valores de resistência a compressão simples abaixo do valor mínimo definido pela norma.

Os corpos de prova para a mistura 3 foram moldados de modo a se obter o teor de umidade próximo a 14,5% com respectiva massa específica aparente seca de  $1,90 \text{ g/cm}^3$ , obtidos na curva de compactação. A Tabela 17 apresenta os resultados para a mistura 3.

**Tabela 17 – Compactação dos corpos de prova (mistura 3)**

Corpo de prova	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de compactação (%)
1	14,0	1,792	94
2	14,7	1,805	95
3	13,9	1,845	97
4	14,3	1,748	92
5	14,1	1,797	95
6	14,1	1,845	97
<b>Média</b>		<b>1,823</b>	

Fonte: Autoria própria (2022)

Nem todos os corpos de prova moldados com a mistura 3 apresentaram grau de compactação satisfatório. Os corpos de prova 1 e 4 tiveram grau de compactação abaixo do intervalo indicado (entre 95% e 105%). O Anexo A da norma NBR 17014 (ABNT, 2022a) determina que o corpo de prova com grau de compactação fora desse intervalo deve ser descartado.

Para os ensaios de resistência à compressão simples, foram considerados somente os corpos de prova que atenderam ao requisito do grau de compactação, e os resultados se encontram na Tabela 18.

**Tabela 18 – Resistência a compressão simples (mistura 3)**

Corpo de prova	Força de ruptura (kN)	Resistência à compressão simples (MPa)
2	4,70	0,60
3	5,50	0,70
5	4,30	0,55
6	5,20	0,66

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os valores de resistência a compressão simples de todos os corpos de prova para a amostra 3 também ficaram abaixo do requisito mínimo determinado.

A média dos valores de resistência a compressão simples para as três misturas, apresentada na Tabela 19, ficaram aproximadas, demonstrando não haver influência da porcentagem de adição de areia na resistência deste solo.

**Tabela 19 – Média de resistência a compressão simples para as 3 misturas**

Mistura	Média de resistência à compressão simples (MPa)
1	0,67
2	0,68
3	0,63

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Quando comparadas aos requisitos para outros materiais de construção com mesma aplicação (construção de paredes de vedação), como tijolos cerâmicos, resistência de 1,5 MPa de acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2022a), tijolos de solo-cimento, com resistência de 1,7 MPa segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012c), e misturas compactadas para uso em parede monolítica de solo-cimento, que requer resistência mínima de 1,0 MPa de acordo com a NBR 13553 (ABNT, 2012b), as três misturas de solo e areia apresentaram um suporte de carga muito baixo.

Quando analisadas perante valores trazidos pela literatura, as misturas apresentaram valores coerentes com os que Pacheco-Torgal, Eires e Jalali (2009) trazem em seus estudos. Estes autores apresentaram valores para a resistência à compressão de diversos solos compactados com energia normal de compactação, que variavam de 0,57 MPa a 1,89 MPa. Dos 9 solos apresentados por estes autores,



5 possuíam composição granulométrica aproximada com as misturas estudadas neste trabalho.

Quanto à massa específica aparente seca, pode-se analisar os resultados obtidos para as misturas comparando-os com a classificação dada pelo grupo CRAterre (Tabela 20). De acordo com a classificação dada por esse grupo, a mistura 1 apresentou uma mistura de solo medíocre, enquanto que as misturas 2 e 3 apresentaram uma mistura muito satisfatória.

**Tabela 20 – Classificação do solo de acordo com a massa específica aparente seca**

<b>Massa específica aparente seca</b>	<b>Classificação</b>
1,650 – 1,760	Medíocre
1,760 – 2,100	Muito satisfatório
2,100 – 2,200	Excelente
2,200 – 2,400	Excepcional

**Fonte: Doat et al. (1979) apud por Pacheco-Torgal; Eires; Jalali (2009, p. 63).**

A adição de areia ao solo para correção da granulometria contribuiu para o aumento da massa específica aparente seca, no entanto, não se mostrou vantajosa no que diz respeito ao aumento da capacidade de carga da mistura compactada.

A Fotografia 26 apresenta uma imagem do tipo de fissura dos corpos de prova rompidos, que consistiram em fissuras verticais por todo o corpo de prova e que aumentavam conforme o aumento da carga aplicada. Além disso, os corpos de prova com traços com maior teor de areia se mostraram esfarelar com mais facilidade que os corpos de prova com maior teor de argila, o que é coerente, uma vez que a presença da argila aumenta a coesão do solo.

**Fotografia 26 – Corpo de prova rompido**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito deste trabalho foi de apresentar o potencial da terra crua como material de construção. Abundante na natureza, a terra é utilizada há milhares de anos na construção de edificações e é uma alternativa com diversas vantagens em termos de sustentabilidade. Por meio de esforços realizados por entidades e profissionais, o tema vem ganhando cada vez mais atenção, com o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias dedicadas ao aperfeiçoamento dos materiais e das técnicas. Pode-se destacar como resultado de sucesso destes esforços no Brasil, o recente lançamento de uma norma específica para a taipa de pilão, a NBR 17014 (ABNT, 2022a), norma esta que fundamentou a análise apresentada neste trabalho.

O solo da região da UTFPR – Campo Mourão é um solo argiloso, com baixíssimo teor de areia, e apresenta limites de liquidez e plasticidade fora dos limites estabelecidos pela norma para a construção de paredes de taipa de pilão. Por esse motivo, este trabalho se fundamentou na realização da estabilização física do solo com correção granulométrica com areia e consequente análise por meio de ensaios em laboratório com o intuito de verificar sua viabilidade para emprego como material principal em paredes de taipa de pilão. Foram propostas três composições diferentes de solo e areia: mistura 1, com traço 1:1; mistura 2, com traço 1:1,5; e mistura 3, com traço 1:2.

Os ensaios laboratoriais para a determinação dos limites de liquidez e índice de plasticidade retornaram resultados que atenderam aos parâmetros definidos pela norma para as misturas 1 e 2. A mistura 3 não apresentou limites de liquidez e plasticidade, devido ao alto teor de areia presente, no entanto, estes resultados não sugerem uma mistura inadequada.

Em relação à massa específica aparente seca, as misturas 2 e 3 apresentaram melhores resultados de compactação, com valores acima do requisito mínimo definido por norma. A mistura 1 teve uma média de massa específica aparente seca abaixo do requisito mínimo. Foi possível notar que o aumento do teor de areia na mistura influenciou no aumento da massa específica aparente seca.

Quanto à resistência à compressão, a estabilização física com correção granulométrica não foi suficiente para garantir um bom resultado, e as três misturas estudadas apresentaram valores muito abaixo da resistência mínima requerida pela NBR 17014 (ABNT, 2022a). Ainda que a massa específica aparente seca tenha

aumentado conforme o aumento do teor de areia, este fato não pareceu influenciar na resistência, pois as três misturas tiveram médias de resistência aproximadas.

A partir dos resultados expostos, foi possível observar que as misturas propostas não se mostraram viáveis para emprego em construções de parede de taipa de pilão, devido à baixa resistência que apresentaram. Entretanto, não se descarta a possibilidade de implementar outras melhorias neste solo com o intuito de aumentar a sua resistência, empregando outros métodos de estabilização. Vale ressaltar que a escolha do método de estabilização deve ser pensada com cautela, levando em consideração aspectos econômicos, ambientais e socioculturais. Não fez parte do escopo deste trabalho investigar a influência de aditivos químicos, por exemplo, pois se queria analisar o potencial do uso do solo preservando sua capacidade de reciclagem e descarte no ambiente sem contaminantes. Para estudos futuros, a sugestão é que se escolham métodos de estabilização que sejam menos nocivos ao meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- ARCHDAILY. **Debris House / Wallmakers**. 2018. Disponível em: <https://www.archdaily.com/903691/debris-house-wallmakers>. Acesso em: 24 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024**: Solo-Cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13553**: Materiais de emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17014**: Taipa de pilão – Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c.
- ARAÚJO, G. B.; FERREIRA, E. A. N.; CÉSAR, S. F. **O solo para construções com terra crua**: um estudo de caso. 6 ATP, 9 SIACOT. 2010.
- BAUER, Falcão. **Materiais de construção**. Volume 1. 5.ed. revisada (reimpress.). LTC. Rio de Janeiro, 2008.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução Conama 307/2002**. 2005.

CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. de S.; TOLEDO FILHO, R. D. **Construção com terra no Brasil**: avaliação ambiental da taipa de pilão. PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 12, p. e021015, 2021.

CBCS. **Aspectos da construção sustentável no brasil e promoção de políticas**. Brasil: Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, São Paulo, nov. 2014.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6 ed. São Paulo: Thomson, 2007.

FERREIRA, L. M. R. **Arquitetura de Terra**: das técnicas construtivas ao desenvolvimento de competências. Porto, Portugal, 2015.

FREIRE, W. J. Materiais alternativos de construção. *In*: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L (coord.). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

GIRALDELLI, M. A.; *et al.* **Construção com Terra**: Breve Histórico e Técnica. Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde, vol. 24, no 4, dezembro de 2020.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em 10 out. 2022.

JOHN, V. M. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

MENDES, L. C.; BESSA, S. A. L. **Análise da Evolução Tecnológica da Taipa de Pilão Contemporânea**. Mix Sust. v.8., n.1, p.66-77. Florianópolis, 2022.

MINKE, G. **Building with Earth**: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Basel-Berlin-Boston: Birkhauser-Publishers for Architecture. Kassel, Germany, 2006.

MINEROPAR S.A. **Atlas comentado da geologia e dos recursos minerais do estado do paraná**. Curitiba: Mineropar, 2001.

NEVES, C. M. M.; *et al.* **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero-americana PROTERRA. 2010.

NEVES, C.; FARIA, O. B. **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011.

NEVES, C.; MILANI, A. P. Bloco de Terra Comprimida – BTC. *In*: NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011.

PACHEGO-TORGAL, F.; EIRES, R.M. G.; JALALI, S. **Construção em Terra**. Guimarães. Publidisa, 2009.

PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S. **Earth construction**: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Construction and Building Materials, v. 29. Guimaraes - Portugal, 2012.

SANTIAGO, C. C. **O solo como material de construção**. 2ª ed. Salvador: EDUFBA, 2001.

SANTOS, C. A. D. **Construção com terra no Brasil**: panorama, normatização e prototipagem com terra ensacada. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC.

TAIPAL. Construções em terra. **Obras realizadas**. Disponível em: <https://www.taipal.com.br>. Acesso em: 15 out. 2022.

VIEIRA, G. H. V. **Avaliação de blocos de solo-cimento utilizando o solo de Pato Branco corrigido com areia natural ou areia de britagem**. 80p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

VIEIRA, B. M.; RAMALHO, J. A. N. **As normas da arquitetura e construção com terra e seus agentes promotores**. VIII Congresso de arquitetura e construção com terra no Brasil. Florianópolis, 2022.

**APÊNDICE A - Resultados – Ensaio de composição granulométrica da areia**

Este apêndice apresenta os resultados obtidos nos ensaios da composição granulométrica para duas amostras de massas aproximadas da areia utilizada. No capítulo Resultados e Discussões, seção 6.1, foi apresentada a média das duas amostras, bem como a curva granulométrica obtida a partir da média.

**Tabela 21 – Granulometria da areia para a amostra 1**

<b>Amostra 1 (M1 = 500,05g)</b>				
<b>Abertura da malha da peneira (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Massa retida acumulada (g)</b>	<b>Percentual retido (%)</b>	<b>Percentual retido acumulado (%)</b>
4,75	0	0	0	0
2,36	2,76	2,76	0,55	0,55
1,18	8,73	11,49	1,75	2,30
0,6	34,1	45,59	6,82	9,12
0,3	291,92	337,51	58,38	67,50
0,15	143,64	481,15	28,73	96,23
Fundo	18,86	500,01	3,77	100,00

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Tabela 22 – Granulometria da areia para a amostra 2**

<b>Amostra 2 (M2 = 500,04g)</b>				
<b>Abertura da malha da peneira (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Massa retida acumulada (g)</b>	<b>Percentual retido (%)</b>	<b>Percentual retido acumulado (%)</b>
4,75	0,22	0,22	0,04	0,04
2,36	3,4	3,62	0,68	0,72
1,18	8,86	12,48	1,77	2,50
0,6	33,83	46,31	6,77	9,26
0,3	292,55	338,86	58,52	67,79
0,15	141,7	480,56	28,35	96,13
Fundo	19,34	499,9	3,87	100,00

**Fonte: Autoria própria (2022)**



**APÊNDICE B - Resultados – Ensaio de determinação dos limites de liquidez e plasticidade**

Este apêndice apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade que complementam os resultados apresentados no capítulo Resultados e Discussões, na seção 6.2.

### Composição 1 (traço 1:1)

A Tabela 23 apresenta os valores obtidos no ensaio do limite de liquidez (LL) que foram necessários para se calcular os teores de umidade para cada amostra.

**Tabela 23 – LL – Teores de umidade (mistura 1)**

Amostra	1	2	3	4	5
Identificação da cápsula	31	21	32	22	24
Massa Solo + Água + Cápsula (g)	11,4	11,84	11,15	11,41	13,5
Massa Solo + Capsula (g)	10,62	10,94	10,32	10,61	12,4
Massa Água (g)	0,78	0,9	0,83	0,8	1,1
Massa Solo (g)	2,58	3	2,78	2,84	4,09
Massa Cápsula (g)	8,04	7,94	7,54	7,77	8,31
Teor de Umidade (%)	30,23	30,00	29,86	28,17	26,89
Número de golpes	18	20	26	34	36

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Na Tabela 24, constam todos os valores obtidos no ensaio de limite de plasticidade (LP) feito para a composição 1. A partir desses valores é que foi possível calcular os teores de umidade para cada amostra e o teor de umidade médio, que equivale ao limite de plasticidade.

**Tabela 24 – LP – Teores de umidade (mistura 1)**

Amostra	1	2	3
Identificação da cápsula	25	47	38
Massa Solo + Água + Cápsula (g)	10,97	10,85	11,31
Massa Solo + Capsula (g)	10,5	10,41	10,9
Massa Água (g)	0,47	0,44	0,41
Massa Solo (g)	2,72	2,32	2,24
Massa Cápsula (g)	7,78	8,09	8,66
Teor de Umidade (%)	17	19	18

**Fonte: Autoria própria (2022)**

### Composição 2 (traço 1:1,5)

A Tabela 25 apresenta os valores obtidos no ensaio do limite de liquidez que foram necessários para se calcular os teores de umidade para cada amostra.

**Tabela 25 – LL – Teores de umidade (mistura 2)**

Amostra	1	2	3	4	5
Capsula	27	31	21	32	22
Solo Água Capsula (g)	13,82	13,38	14,28	14,02	12,48
Solo Capsula (g)	12,6	12,25	13,13	12,89	11,71
Água (g)	1,22	1,13	1,15	1,13	0,77
Solo (g)	4,55	4,48	4,92	5,11	3,62
Capsula (g)	8,05	7,77	8,21	7,78	8,09
Teor de Umidade (%)	26,81	25,22	23,37	22,11	21,27
Número de golpes	15	18	22	26	34

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Na Tabela 26, constam todos os valores obtidos no ensaio de limite de plasticidade feito para a composição 1. A partir desses valores é que foi possível encontrar os teores de umidade para cada amostra e o teor de umidade médio, que equivale ao limite de plasticidade.

**Tabela 26 – LP – Teores de umidade (mistura 2)**

Amostra	1	2	3
Identificação da cápsula	24	40	31
Massa Solo + Água + Cápsula (g)	11,23	11,46	11,35
Massa Solo + Capsula (g)	10,74	10,9	10,79
Massa Água (g)	0,49	0,56	0,56
Massa Solo (g)	2,43	2,67	2,75
Massa Cápsula (g)	8,31	8,23	8,04
Teor de Umidade (%)	20	21	20

**Fonte: Autoria própria (2022)**

## **APÊNDICE C - Resultados – Ensaio de compactação**

Este apêndice apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios de compactação que complementam os resultados apresentados no capítulo Resultados e Discussões, na seção 6.3.

### Informações gerais

O molde cilíndrico utilizado no ensaio de compactação apresentou massa  $M_c = 6216$  g e volume útil  $V_c = 1006,06$  mm<sup>3</sup>.

As tabelas 27, 29 e 31 apresentam para as misturas 1, 2 e 3, respectivamente, os valores:

- $M_{mu,c}$  = massa do conjunto mistura úmida compactada e molde cilíndrico, pesada durante a realização do ensaio;
- $M_{mu}$  = massa somente da mistura úmida compactada (após subtração da massa do molde cilíndrico);
- $\gamma$  = massa específica aparente, obtida através da equação:

$$\gamma = \frac{M_{mu}}{V_c}$$

De cada corpo de prova, foram extraídos duas pequenas porções de mistura compactada, que foram pesados ainda úmidos e em seguida levados para a estufa, onde ficaram por 24h. Após esse período foram pesados novamente. Com esses valores, foi calculado o teor de umidade de cada corpo de prova.

As tabelas 28, 30 e 32 apresentam para as misturas 1, 2 e 3, respectivamente, os valores:

- $M_{c,m,a}$  = massa do conjunto cápsula metálica, mistura solo/areia e água (pesada durante o ensaio);
- $M_{c,m}$  = massa do conjunto cápsula metálica e mistura solo/areia (pesada após secagem em estufa);
- $M_c$  = massa da cápsula (pesada isoladamente);
- $M_a$  = massa da água, obtida através da equação:

$$M_a = M_{c,m,a} - M_{c,m}$$

- $M_m$  = massa da mistura solo/areia, obtida através da equação:

$$M_m = M_{c,m} - M_c$$

- $W$  = umidade (%), obtida através da equação:

$$W = \frac{M_a}{M_m} * 100$$

- $\gamma_d$  = massa específica aparente seca, obtida através da equação:

$$\gamma_d = \frac{M_{mu} \times 100}{M_c \times (100 + W)}$$

### Mistura 1 (traço 1:1)

Para a mistura 1, foram moldados 6 corpos de provas que correspondem a 6 pontos de coletas de dados.

**Tabela 27 – Compactação – Massa específica aparente (mistura 1)**

Ponto	$M_{mu,c}$ (g)	$M_{mu}$ (g)	Massa específica aparente ( $g/cm^3$ )
1	7896	1680	1,67
2	8104	1888	1,88
3	8282	2066	2,05
4	8332	2116	2,10
5	8316	2100	2,09
6	8284	2068	2,06

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 28 – Compactação – Massa específica aparente seca (mistura 1)**

Ponto	Cápsula	$M_{c,m,a}$ (g)	$M_{c,m}$ (g)	$M_c$ (g)	$M_a$ (g)	$M_m$ (g)	W (%)	W (média) (%)	$\gamma_d$ ( $g/cm^3$ )
1	26	15,67	14,88	8,21	0,79	6,67	11,84	11,6	1,496
	27	17,43	16,47	8,05	0,96	8,42	11,40		
2	25	14,15	13,39	7,78	0,76	5,61	13,55	13,1	1,660
	31	11,61	11,21	8,04	0,4	3,17	12,62		
3	24	21,68	19,87	8,31	1,81	11,56	15,66	15,9	1,772
	40	19,65	18,07	8,23	1,58	9,84	16,06		
4	32	16,91	15,51	7,54	1,4	7,97	17,57	17,7	1,788
	46	18,78	17,15	7,97	1,63	9,18	17,76		
5	21	19,27	17,41	7,91	1,86	9,5	19,58	19,6	1,746
	22	19,14	17,28	7,78	1,86	9,5	19,58		
6	43	21,98	19,49	8,04	2,49	11,45	21,75	21,7	1,689
	44	17,82	16,14	8,38	1,68	7,76	21,65		

Fonte: Autoria própria (2022)

### Mistura 2 (traço 1:1,5)

Para a mistura 2, foram moldados 5 corpos de provas que correspondem a 5 pontos de coletas de dados.

**Tabela 29 – Compactação – Massa específica aparente (mistura 2)**

Ponto	$M_{mu,c}$ (g)	$M_{mu}$ (g)	Massa específica aparente ( $g/cm^3$ )
1	8124	1908	1,90
2	8296	2080	2,07
3	8372	2156	2,14
4	8350	2134	2,12
5	8298	2082	2,07

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 30 – Compactação – Massa específica aparente seca (mistura 2)**

Ponto	Cápsula	Mc,m,a (g)	Mc,m (g)	Mc (g)	Ma (g)	Mm (g)	W (%)	W (média) (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	44	17,39	16,7	8,38	0,69	8,32	8,29	10,1	1,723
	27	21,84	20,38	8,05	1,46	12,33	11,84		
2	32	20,23	18,66	7,54	1,57	11,12	14,12	14,0	1,814
	43	15,93	14,97	8,04	0,96	6,93	13,85		
3	21	18,04	16,66	7,91	1,38	8,75	15,77	15,9	1,849
	40	16,54	15,39	8,23	1,15	7,16	16,06		
4	24	19,83	18,12	8,31	1,71	9,81	17,43	17,6	1,804
	31	19,42	17,71	8,04	1,71	9,67	17,68		
5	25	22,2	19,85	7,78	2,35	12,07	19,47	19,5	1,731
	46	19,81	17,87	7,97	1,94	9,9	19,60		

Fonte: Autoria própria (2022)

### Mistura 3 (traço 1:1,5)

Para a mistura 3, foi foram moldados 5 corpos de provas que correspondem a 5 pontos de coletas de dados.

**Tabela 31 – Compactação – Massa específica aparente (mistura 3)**

Ponto	Mmu,c (g)	Mmu (g)	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	8034	1818	1,81
2	8244	2028	2,02
3	8378	2162	2,15
4	8380	2164	2,15
5	8338	2122	2,11

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 32 – Compactação – Massa específica aparente seca (mistura 3)**

Ponto	Cápsula	Mc,m,a (g)	Mc,m (g)	Mc (g)	Ma (g)	Mm (g)	W (%)	W (média) (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	22	13,82	13,24	7,77	0,58	5,47	10,60	10,1	1,642
	38	16,02	15,38	8,66	0,64	6,72	9,52		
2	35	17,64	16,67	7,99	0,97	8,68	11,18	11,4	1,810
	42	23,42	21,81	7,95	1,61	13,86	11,62		
3	41	17,6	16,43	7,88	1,17	8,55	13,68	13,5	1,893
	33	17,61	16,46	7,88	1,15	8,58	13,40		
4	34	19,58	18	7,94	1,58	10,06	15,71	15,6	1,860
	36	16,7	15,55	8,17	1,15	7,38	15,58		
5	26	25,31	22,81	8,21	2,5	14,6	17,12	17,4	1,797
	47	18,81	17,2	8,09	1,61	9,11	17,67		

Fonte: Autoria própria (2022)

**APÊNDICE D - Resultados – Ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova**



Este apêndice apresenta todos os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples, que complementam os resultados apresentados no capítulo Resultados e Discussões, na seção 6.4. Os cálculos para massa específica aparente seca foram feitos de acordo com o apresentado no Apêndice C. Os cálculos para a resistência à compressão simples foram feitos conforme o descrito no capítulo Materiais e Métodos, na seção 5.2.4.

### Mistura 1 (traço 1:1)

**Tabela 33 – Corpos de prova – Massa específica aparente (mistura 1)**

CP	M <sub>mu,c</sub> (g)	M <sub>mu</sub> (g)	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	8290	2074	2,06
2	8325	2109	2,10
3	8340	2124	2,11
4	8290	2074	2,06
5	8320	2104	2,09
6	8320	2104	2,09

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 34 – Corpos de prova – Massa específica aparente seca (mistura 1)**

CP	Cápsula	Mc,m,a (g)	Mc,m (g)	Mc (g)	Ma (g)	Mm (g)	W (%)	W (média) (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1	44	12,78	12,05	8,36	0,73	3,69	19,78	19,6	1,724
	47	14,84	13,74	8,06	1,1	5,68	19,37		
2	27	16,81	15,42	8,05	1,39	7,37	18,86	18,8	1,764
	32	16,42	15,01	7,51	1,41	7,5	18,80		
3	40	12,99	12,24	8,23	0,75	4,01	18,70	18,6	1,781
	21	13,57	12,69	7,91	0,88	4,78	18,41		
4	43	13,38	12,49	8,04	0,89	4,45	20,00	19,9	1,719
	31	17,87	16,24	8,04	1,63	8,2	19,88		
5	24	13,76	12,87	8,3	0,89	4,57	19,47	19,6	1,749
	25	14,7	13,56	7,78	1,14	5,78	19,72		
6	46	16,03	14,72	7,97	1,31	6,75	19,41	19,3	1,752
	36	14,54	13,51	8,17	1,03	5,34	19,29		

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 35 – Resistência à compressão simples (mistura 1)**

CP	Força de ruptura (kN)	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Resistencia a compressão simples (Mpa)
1	3,5	99,20	7728,821	0,45
2	5,1	98,70	7666,617	0,67
3	6,1	98,80	7697,687	0,79
4	5,2	99,00	7697,687	0,68
5	5,2	98,85	7713,246	0,67
6	5,8	98,55	7651,105	0,76

Fonte: Autoria própria (2022)

## Mistura 2 (traço 1:1,5)

**Tabela 36 – Corpos de prova – Massa específica aparente (mistura 2)**

CP	M <sub>mu,c</sub> (g)	M <sub>mu</sub> (g)	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	8282	2066	2,05
2	8316	2100	2,09
3	8326	2110	2,10
4	8248	2032	2,02
5	8334	2118	2,11
6	8352	2136	2,12

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 37 – Corpos de prova – Massa específica aparente seca (mistura 2)**

CP	Cápsula	Mc,m,a (g)	Mc,m (g)	Mc (g)	Ma (g)	Mm (g)	W (%)	W (média) (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1	21	14,38	13,51	7,91	0,87	5,6	15,54	15,4	1,779
	36	13,58	12,86	8,17	0,72	4,69	15,35		
2	27	12,71	12,08	8,05	0,63	4,03	15,63	15,7	1,805
	32	13,95	13,08	7,54	0,87	5,54	15,70		
3	24	12,75	12,18	8,31	0,57	3,87	14,73	15,0	1,824
	25	13,32	12,59	7,78	0,73	4,81	15,18		
4	43	12,82	12,16	8,04	0,66	4,12	16,02	16,0	1,741
	46	14,5	13,6	7,97	0,9	5,63	15,99		
5	33	12,1	11,53	7,88	0,57	3,65	15,62	15,8	1,818
	26	12,35	11,78	8,21	0,57	3,57	15,97		
6	38	15,02	14,15	8,66	0,87	5,49	15,85	15,7	1,836
	36	35	14,55	13,67	7,99	0,88	5,68		

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 38 – Resistência à compressão simples (mistura 2)**

CP	Força de ruptura (kN)	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Resistência a compressão simples (Mpa)
1	3,5	99,5	7775,638	0,45
2	5,3	99,45	7760,017	0,68
3	5,2	99,7	7853,982	0,66
4	4,6	99,45	7775,638	0,59
5	6,5	99,45	7744,411	0,84
6	6,5	99,45	7791,274	0,83

Fonte: Autoria própria (2022)

### Mistura 3 (traço 1:2)

**Tabela 39 – Corpos de prova – Massa específica aparente (mistura 3)**

CP	M <sub>mu,c</sub> (g)	M <sub>mu</sub> (g)	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	8272	2056	2,04
2	8298	2082	2,07
3	8330	2114	2,10
4	8226	2010	2,00
5	8278	2062	2,05
6	8334	2118	2,11

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 40 – Corpos de prova – Massa específica aparente seca (mistura 3)**

CP	Cápsula	Mc,m,a (g)	Mc,m (g)	Mc (g)	Ma (g)	Mm (g)	W (%)	W (média) (%)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1	34	14,3	13,53	7,94	0,77	5,59	13,77	14,0	1,792
	41	16,9	15,77	7,88	1,13	7,89	14,32		
2	40	14,77	13,92	8,23	0,85	5,69	14,94	14,7	1,805
	31	14,39	13,59	8,04	0,8	5,55	14,41		
3	48	12,53	11,99	8,11	0,54	3,88	13,92	13,9	1,845
	39	12,95	12,32	7,78	0,63	4,54	13,88		
4	42	11,58	11,12	7,95	0,46	3,17	14,51	14,3	1,748
	22	11,74	11,25	7,77	0,49	3,48	14,08		
5	49	12	11,52	8,04	0,48	3,48	13,79	14,1	1,797
	50	13,78	13,07	8,12	0,71	4,95	14,34		
6	37	13,14	12,57	8,51	0,57	4,06	14,04	14,1	1,845
	36	45	14,37	13,6	8,18	0,77	5,42		

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 41 – Resistência à compressão simples (mistura 3)**

CP	Força de ruptura (kN)	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Resistência a compressão simples (Mpa)
2	4,70	54,65	7791,275	0,60
3	5,50	99,9	7822,597	0,70
5	4,30	99,7	7822,597	0,55
6	5,20	99,75	7838,282	0,66

Fonte: Autoria própria (2022)