

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GUSTAVO MAFFORT DE OLIVEIRA**

**SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR AGREGADO RECICLADO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA SOLO-CAL**

**CAMPO MOURÃO**

**2023**

**GUSTAVO MAFFORT DE OLIVEIRA**

**SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR AGREGADO RECICLADO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA SOLO-CAL**

**Soil replacement by recycled aggregate on the mechanical behavior of lime-soil mixture**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. José Wilson dos Santos Ferreira.

**CAMPO MOURÃO**

**2023**



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

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

**GUSTAVO MAFFORT DE OLIVEIRA**

**SUBSTITUIÇÃO DE SOLO POR AGREGADO RECICLADO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURA SOLO-CAL**

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: 16 de novembro de 2023

---

Prof. Dr. José Wilson dos Santos Ferreira  
Doutorado em Geotecnia  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves da Fonseca  
Doutorado em Geotecnia  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Profa. Dra. Eliana Fernandes dos Santos  
Doutorado em Infraestrutura de Transportes  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente quero agradecer a Deus por todas as bênçãos que ele me enviou e por atender a todas as minhas preces quando eu simplesmente me encontrava sem rumo, e Ele de alguma forma me guiou para o melhor caminho possível.*

*Agradecer e enaltecer a minha querida Mãe, pela mulher batalhadora e justa que fez esse momento acontecer, pois ela que abriu todas as portas dos meus sonhos e das minhas paixões, e que em momento algum descreditou da onde eu podia chegar e que almejava ver esse momento.*

*Agradecer a todos os meus amigos de dentro e fora da universidade que de alguma forma contribuíram, seja em estudos, ensinamentos, risadas, conversas, desespero, etc. Destacar os meus amigos Camila Yukari, Livia Vanessa, Débora Kimberly, Helena Yakuda, Felipe Romero, Isabella Lopes, Paulo Gabriel e João Vitor por serem as melhores pessoas que poderia ter conhecido dentro da Universidade e que quero levar para a vida.*

*Ainda em agradecimento a amigos, dizer que dedico esse TCC ao meu melhor amigo Antonio Lima, que fez de tudo para me ajudar e que foi o meu pilar de apoio em momento de desespero e abalos, e que não negou forças para poder me ajudar. Muito obrigado.*

*Agradecer e gratular o meu Professor e Orientador José Wilson Ferreira por tudo o que ele fez e dizer que você é um profissional e uma pessoa incrível. Quero que saiba que foi uma honra ter sido seu orientando e que você me ensinou muito, obrigado.*

*Agradecer ao Fábio Kruger por toda ajuda nos ensaios, paciência na hora de ensinar, as conversas, risadas e favores que você prestou.*

*Quero deixar meu muito obrigado ao Laboratório Multiusuário de Apoio à pesquisa do campus de Apucarana, que se prontificou a realizar o teste de Fluorescência de raios-x.*

## RESUMO

No ramo da engenharia civil, várias pesquisas estão sendo conduzidas a fim de transpor os desafios na área. Uma dessas dificuldades é a inserção da sustentabilidade junto à expansão da construção civil. Dentre as formas de conciliar essas duas partes, uma delas é a aplicação dos resíduos da construção civil (RCC) na área geotécnica, com o intuito de diminuir a exploração de recursos naturais e aumentar a vida útil dos aterros sanitários. Associado a isso, quando projetos geotécnicos não atendem os parâmetros necessários, uma alternativa é a estabilização química do solo, como o uso de cal como agente estabilizante. Assim, o presente estudo tem como objetivo verificar o efeito da substituição de solo por 25% de agregado reciclado nos parâmetros de compactação e comportamento mecânico da mistura estabilizada com 8% de cal. Para isso, foram empregados solo argiloso de Campo Mourão, cal hidratada do tipo CH-III e RCC, realizando ensaios de massa real dos grãos, granulometria, fluorescência de raios-x e ensaios de compactação e resistência à compressão simples (RCS) envolvendo o solo puro, misturas solo-RCC e solo-RCC-cal. A partir da caracterização, foi observado que cada material tem suas particularidades de composição, como o solo que apresenta altos teores de alumínio e ferro. No RCC predominou quantidades de cálcio, ferro e silício, que confirmou a presença de argamassa e material cerâmico na sua composição. Em quesito de compactação, foi perceptivo que a inserção de 25% de RCC na mistura resultou em aumento de massa específica seca máxima e a diminuição do teor de umidade ótima, o que leva a entender que a trabalhabilidade do solo na mistura está preenchendo vazios. A inserção da cal teve um efeito oposto quando comparado a mistura de solo-RCC, pois a massa seca específica seca máxima diminuiu e o teor de umidade ótima aumentou. Quanto aos resultados de RCS, observou-se resultados semelhantes entre o solo e solo-RCC, indicando substituição sem prejuízo de comportamento mecânico. Já ao inserir a cal, houve aumento nesse parâmetro, os quais ocorreram ao longo do período de cura.

Palavras-chave: cal; agregado reciclado; compactação; estabilização.

## ABSTRACT

In the field of civil engineering, several researches are being conducted to overcome the challenges in the area. One of these difficulties is the inclusion of sustainability in the expansion of civil construction. Among the ways to reconcile these two parts, one of them is the application of construction waste (CW) in the geotechnical area, with the aim of reducing the exploitation of natural resources and increasing the useful life of landfills. Associated with this, when geotechnical projects do not meet the necessary parameters, an alternative is chemical stabilization of the soil, such as the use of lime as a stabilizing agent. Therefore, the present study aims to verify the effect of replacing soil with 25% recycled aggregate on the compaction parameters and mechanical behavior of the mixture stabilized with 8% lime. For this, clayey soil from Campo Mourão, hydrated lime of the type CH-III and CW were used, carrying out tests on real grain mass, granulometry, x-ray fluorescence and compaction and unconfined compressive strength (UCS) for the pure soil, soil-CW and soil-CW-lime mixtures. From the characterization, it was observed that each material has its particular compositional characteristics, such as the soil that has high levels of aluminum and iron. In the CW, quantities of calcium, iron and silicon predominated, which confirmed the presence of mortar and ceramic material in its composition. In terms of compaction, it was clear that the inclusion of 25% CW in the mixture resulted in an increase in the maximum dry mass and a decrease in the optimum moisture content, which leads to the understanding that the workability of the soil in the mixture is filling voids. The inclusion of lime had an opposite effect when compared to the soil-CW mixture, as the maximum specific dry mass decreased and the optimum moisture content increased. As for the UCS results, similar results were observed between soil and soil-CW, indicating replacement without compromising mechanical behavior. When adding lime, there was an increase in this parameter, which occurred throughout the curing period.

Keywords: lime; recycled aggregate; compaction; stabilization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Curva Granulométrica solo argiloso .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2 – Sistema de Classificação AASHTO .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3 – Sistema Unificado de classificação de solo (baseado em material passante) ..</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 – Carta de Plasticidade .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5 – Curva de compactação a) visão geral; b) efeito do tipo de solo .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 6 – Solo para secagem ao ar livre .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 7 – Preparação do solo: (a) peneiramento; (b) almofariz e mão de gral.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 8 – Solo preparado: (a) armazenamento; (b) cápsula.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 9 – Ensaio de pH: (a) preparação de amostras; (b) medidor de pH.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 10 – Etapa de sedimentação: (a) copo dispersor; (b) densímetro; (c) ensaio .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 11 – Amostras Retiras para fluorescência de raio-x .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 12 – Prensa Hidráulica para ensaio de RCS.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 13 – Curva granulométrica do solo .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 14 – Curva granulométrica do RCC .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 15 – FRX dos materiais: (a) solo; (b) cal; (c) RCC. ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 16 – Resultado dos testes de pH do solo trabalhado .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 17 – Curva de compactação do Solo.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 18 – Curva de compactação da mistura Solo-RCC.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 19 – Curva de compactação da mistura Solo-Cal-RCC .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 20 – RCS em função do material e tempo de cura. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 21 – Calibração do Picnomêtro: (a) 500 ml; (b) 1000 ml.....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 – Classificação dos tipos Resíduos (CONAMA) .....</b>	<b>24</b>
<b>Quadro 2 – Resultado do peneiramento fino .....</b>	<b>34</b>
<b>Quadro 3 – Resultados do ensaio de sedimentação sem defloculante.....</b>	<b>34</b>
<b>Quadro 4 – Granulometria por peneiramento (Amostra 1).....</b>	<b>36</b>
<b>Quadro 5 – Granulometria por peneiramento (Amostra 2).....</b>	<b>36</b>
<b>Quadro 6 – Parâmetros de Compactação.....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP's	Corpos de prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FRX	Fluorescência de Raios-x
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Normas Brasileiras
PIB	Produto Interno Bruto
RCC	Resíduo de Construção Civil
RCS	Resistência de compressão simples
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_{\omega}$	Massa da amostra úmida
$M_h$	Massa do solo úmido compactado
$M_s$	Massa do solo seco
$\rho_h$	Massa específica aparente do solo úmido
Ca	Cálcio
GC	Grau de compactação
$\omega$	Teor de umidade
Mg	Magnésio
P	Pressão
T	Temperatura
V	Volume
$\rho_d$	Massa específica do solo seco
$\Delta\omega$	Varição de umidade
$\rho_w$	Massa específica água
$\rho_s$	Massa específica dos sólidos do solo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do Solo.....</b>	<b>15</b>
4.1.1	Granulometria .....	15
4.1.2	Limites de Atterberg .....	17
<b>4.2</b>	<b>Classificação do Solo .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3</b>	<b>Estabilização do solo.....</b>	<b>20</b>
4.3.1	Estabilização Física .....	21
4.3.2	Estabilização Mecânica .....	21
4.3.3	Estabilização Química .....	22
<b>4.4</b>	<b>Cal .....</b>	<b>23</b>
4.4.1	Estabilização Solo-Cal.....	23
<b>4.5</b>	<b>Agregado reciclado .....</b>	<b>24</b>
4.5.1	Situação do Brasil .....	24
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>26</b>
<b>5.2</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>26</b>
5.2.1	Preparação do Solo .....	26
5.2.2	Determinação do Teor de Cal e de Agregado Reciclado.....	28
5.2.3	Caracterização dos materiais .....	29
5.2.4	Determinação dos Parâmetros de Compactação.....	31
5.2.5	Condições de Moldagem .....	32
5.2.6	Resistência à Compressão.....	32
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>6.1</b>	<b>Caracterização física e classificação do solo.....</b>	<b>33</b>
<b>6.2</b>	<b>Caracterização do agregado reciclado.....</b>	<b>35</b>
<b>6.3</b>	<b>Fluorescência de raios-x .....</b>	<b>37</b>
<b>6.4</b>	<b>Método do pH.....</b>	<b>39</b>
<b>6.5</b>	<b>Compactação .....</b>	<b>40</b>
<b>6.6</b>	<b>Ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS) .....</b>	<b>42</b>

<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>7.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O ramo da engenharia civil é uma área que está em constante mudança e aperfeiçoamento. Várias técnicas, procedimentos, pesquisas estão sendo criadas e estudadas diariamente a fim de proporcionar segurança e/ou apresentar soluções criativas e eficientes para sanar dificuldades projetuais. Uma das grandes dificuldades encontradas, é o descarte de resíduos produzidos diariamente e como são manuseados, pois mesmo com a criação de conselhos e associações, a demanda e descarte incorreto é alta.

Atualmente um dos temas mais abordados é referente a sustentabilidade, devido à grande geração de resíduos que vem aumentando com o passar dos anos no setor da construção civil. No ano de 2022, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgou um crescimento de 9,7% do Produto Interno Bruto (PIB) da construção civil comparado ao ano de 2021, mostrando a crescente que o mercado vem experienciando e, ao mesmo tempo, expressando de forma indireta o aumento na geração de resíduos (IBGE, 2022).

Segundo o relatório de 2022 apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, em 2021 foram coletados cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção civil (RCC), o que representa um aumento de 2,9% em relação ao ano de 2020 (cerca de 47 milhões de toneladas de RCC). O estado do Paraná foi responsável por cerca de 6,6 milhões de toneladas de RCC, equivalente a 13,6% da produção nacional (ABRELPE, 2021; ABRELPE, 2022).

No Brasil, o material mais encontrado nos RCC é de argamassa de concreto, representando 63%. Com isso o material reciclável produzido em maior quantidade é de bica ou brita corrida reciclada (cerca de 38%), seguida por concreto e blocos (29%), areia reciclada (18%) e britas 1,2 e 3 recicladas (13%) (ABRECON, 2015; SINIR 2020).

Como alternativa para a redução de RCC, alguns países vêm adotando a redução da utilização de agregados naturais e a aplicação de agregados recicláveis em áreas como estruturas e pavimentação, com o intuito de diminuir os níveis de poluição ambiental proveniente desta geração e a redução de consumo de recursos naturais (Holanda *et al.*, 2021).

Para que essa aplicação seja feita de forma coerente, estudos técnicos devem ser realizados de acordo com cada área de aplicação, devido à grande diversidade do solo e das propriedades dos RCC e solicitações características dos projetos. Assim, se faz necessário um estudo particular considerando as condições locais de contorno, tipo de solo, solicitações de projeto, motivando o estudo da avaliação do comportamento mecânico de uma mistura solo-cal com inserção de agregado reciclável na região de Campo Mourão – PR.

## **2 OBJETIVOS**

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar o efeito da inserção de cal no comportamento mecânico de mistura com substituição parcial do solo argiloso de Campo Mourão por agregado reciclado.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para que se cumpra o objetivo geral, se estabelecem como objetivos específicos:

- caracterizar o agregado reciclado;
- verificar a eficiência do método do pH na dosagem;
- avaliar o efeito da inserção de agregado reciclado nos parâmetros de compactação;
- analisar a resistência à compressão simples da mistura estabilizada com cal com porcentagem de 25% de agregado reciclado aos 3,7, e 28 dias, comparando com a mistura solo-RCC.

### 3 JUSTIFICATIVA

A construção civil é uma das principais áreas responsáveis pela geração de resíduos, e de praxe tem destinação incorreta para seu descarte. Desse modo, percebe-se a necessidade da aplicação desses resíduos em áreas como pavimentação e estruturas, visando a redução de uso de matéria prima natural e a diminuição do descarte inadequado desses materiais.

A aplicação desses resíduos deve obedecer às legislações nacionais, federais, estaduais e municipais, como é o caso da Lei Federal Nº 12.305 de agosto de 2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos e estabelece diretrizes relativas a gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos e a Lei Municipal Nº 4.174, de 23 de dezembro de 2020, que institui o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil no município de Campo Mourão, onde eles dispõem sobre diretrizes técnicas, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

Essas diretrizes norteiam a possibilidade da reaplicação dos resíduos da construção civil, o que diminui a incidência de descarte nos aterros sanitários e, conseqüentemente, aumenta a vida útil dos aterros. Vale observar que a disposição excessiva de resíduos acarreta na construção de novos aterros, que no ponto de vista da expansão urbana é precária, pois impede a construção perto dessas áreas e pode incidir na contaminação do lençol freático. Já com a destinação correta e a possibilidade da trabalhabilidade desses resíduos novamente na própria área da construção, traz uma viabilidade maior, pois auxilia na diminuição da exploração de recursos naturais e mão de obra para as atividades que possam ser aplicadas esse reuso.

O uso do agregado reciclável pode ser visto em umas grandes variedades de aplicações, como em misturas cimentadas para pavimentação (Cremasco, 2022), aplicação em estruturas de contenção (Holanda *et al.*, 2021), aplicação em pisos intertravados (Suave, 2022), produção de blocos de concreto vazados para vedação, dentre outras.

Muitos projetos na área da engenharia civil têm grande trabalho quando partem para a viabilidade do solo em questão e sua adequação nas condições de projeto, o que demanda tempo e mão de obra excessiva. Nesse contexto, a estabilização do solo local com a inserção de resíduos de agregado reciclado demonstra grande potencial, requerendo o estudo para verificar as condições de viabilidade socioeconômicas.

## **4 REVISÃO DA LITERATURA**

Um dos materiais mais antigos utilizados no ramo da engenharia civil, o solo é todo material inconsolidado na superfície terrestre formado através de intemperismo das rochas e processo de pedogênese. O tipo de rocha e os agentes envolvidos nesse processo de transformação influenciam diretamente no tipo de solo que vai ser encontrado em cada região do país.

Para Das (2011), o solo é definido como um aglomerado de grãos minerais que são formados através do intemperismo das rochas, com líquidos, matéria orgânica e ar (elementos trifásicos) dentro da sua composição. Esses grãos formados apresentam tamanhos, formatos e composição química diferentes devido ao tipo de rocha-parental envolvida no processo.

Devido a complexibilidade do material, é exigido um estudo aprofundado dos profissionais da área, pois todos os solos têm suas particularidades a serem estudadas e como devem ser trabalhadas, a fim de cumprir com os critérios de projeto.

Na perspectiva de Caputo (2012), os solos são materiais provenientes da desintegração e do intemperismo das rochas, isto é, agentes físicos como água, temperatura, vegetação e vento, e pela decomposição química onde envolve a oxidação, carbonatação e hidratação dessas partículas. Segundo o autor, todos esses processos podem ocorrer simultaneamente, porém, dependendo da localidade, condições climáticas, relevo, rocha-mãe, um mecanismo pode ser mais predominante que o outro.

Os solos são materiais providos do intemperismo das rochas por meio natural. Ainda enfatiza que esse material é conceituado para construção civil, porém deve ser levado em conta o estudo das várias ciências que envolvem os solos, sendo elas a geologia que é importante para distinguir a mecânica dos solos, a pedologia para o estudo da mecânica das rochas e a geomorfologia que foca em distinguir as propriedades e comportamento do solo (Maciel Filho, 1997).

### **4.1 Caracterização do solo**

Nessa subseção aborda-se a caracterização do solo para fins de projeto de engenharia.

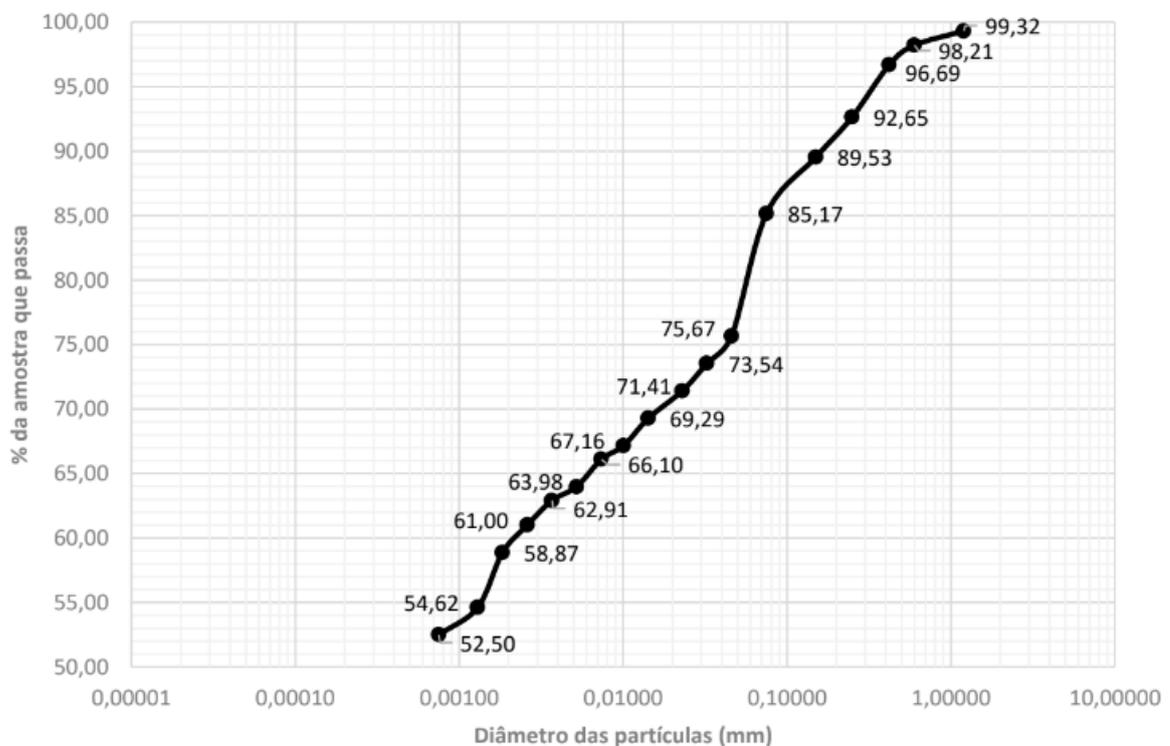
#### **4.1.1 Granulometria**

A análise granulométrica parte do conceito de determinar a proporção relativa em porcentagem dos diferentes tamanhos dos grãos que constituem o solo, ou seja, diante das dimensões de suas partículas que o solo apresenta, ele recebe uma das denominações adequadas

quanto à fração presente. Segundo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6502 (1995), as porções podem ser classificadas como pedregulho, partículas cujo os diâmetros equivalentes estão entre 60 e 2,0 mm, areia, que varia entre 2,0 e 0,06 mm, silte, que está entre 0,06 e 0,002 mm, e argila, que tem dimensões inferiores a 0,002 mm.

Dentro de todas essas denominações das partículas, chama-se essa determinação de análise granulométrica (Figura 1).

**Figura 1 – Curva Granulométrica solo argiloso**



Fonte: Mendes (2023, p. 41)

Para correta determinação da granulometria dos solos são realizados os ensaios de sedimentação e peneiramento conjuntamente. O ensaio de peneiramento é subdividido em dois processos, ambos com ênfase para solos granulares, sendo um com dimensões acima de 2 mm (solos granulares grossos) e o outro para solos com proporções entre 2mm e 0,075mm (solos granulares finos). Já o ensaio de sedimentação engloba o agregado com tamanhos menores que 0,075 mm (ABNT NBR 7181, 2016).

### 4.1.2 Limites de Atterberg

Os índices de consistência foram criados pelo cientista sueco Atterberg em meados do século XX, com intuito de descrever a consistência e comportamento dos solos finos utilizando teores de umidade variados (Das, 2011).

O primeiro índice é o Limite de Liquidez (LL), definido como o teor de umidade de um solo que serve de transição entre o comportamento plástico e comportamento líquido (Sousa, 2011).

A determinação do limite de liquidez (LL) é realizada pelo aparelho de Casagrande, que consiste em um prato de latão em forma de concha, sobre um suporte de ebonite. Por meio de um excêntrico, imprime-se ao prato repetidamente, quedas de altura de 10 mm e intensidade constante (Caputo, 2012). Este ensaio que tem padronização nacional seguida pela NBR 6459 (ABNT NBR 6459, 2017).

Já o Limite de Plasticidade (LP) trabalha com a porcentagem de umidade entre o estado plástico e estado quebradiço, ou seja, é o limite entre o comportamento moldável e o friável (Sousa, 2011).

Para se executar o teste do limite de plasticidade é simples, pois demanda somente moldar manualmente e repetidamente uma massa de solo em formato elipsoidal sobre uma placa de vidro, e tem os seus procedimentos guiados pela norma D-4318, da ASTM, levando em consideração os parâmetros de padronização (ABNT NBR 7180, 2016).

Da diferença entre os limites de liquidez e plasticidade obtém-se o Índice de Plasticidade (Equação 1), importante parâmetro para a classificação dos solos (Das, 2011).

$$IP = LL - LP \quad (\text{Eq. 1})$$

## 4.2 Classificação do solo

Das (2011), fundamenta que os diferentes tipos de solos podem ser classificados em grupos e subgrupos de acordo de como se apresentam, entretanto, há uma variedade muito grande de classificações que podem ser utilizadas, quanto a origem, gênese, comportamento. No ramo da engenharia tem como base as classificações que utilizam os limites de Atterberg, como os que foram supracitados acima, embora nenhum dos sistemas é totalmente definitivo pela variabilidade de cada tipo de solo e pela divergência das metodologias de classificação oriundas de países de clima temperado quando empregadas em solos brasileiros.

A classificação textural é relativamente fácil, porém é muito voltada para a análise granulométrica, sendo que os argilominerais presentes no solo fazem grandes relevâncias nas

propriedades físicas de cada solo, sendo assim, os engenheiros buscam sistemas que levam em conta o índice de plasticidade para interpretar melhor e de forma mais adequada os resultados para cada tipo de uso.

Frente a demanda de um método mais elaborado e completo, os profissionais utilizam os Sistemas de Classificação da Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*), que é muito utilizado na área de pavimentação, bem como o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) que a grande maioria dos engenheiros optam por utilizarem.

O Sistema de classificação da AASHTO é dividido em 7 grandes grupos, variando de A-1 até A-7. Para distinguir quais solos se encaixam em determinado grupo verifica-se inicialmente se até 35% é passante na peneira de nº200, sendo pertencentes aos grupos que variam entre A-1 à A-3. Caso contrário, os solos passantes estarão localizados entre os grupos A-4 à A-7. Além de verificar a quantidade passante nesse sistema, são avaliados o limite de liquidez e índice de plasticidade, para definir o subgrupo que o solo é classificado.

Na Figura 2, verifica-se todos os critérios utilizados e a classificação indicada para cada tipo de solo. Vale pontuar que ao final da classificação é apresentado um indicativo do comportamento do material como subleito, sendo as principais divergências dessa metodologia em solos brasileiros pertencentes às areias finas e solos argilosos (Ferreira, 2019).

**Figura 2 – Sistema de Classificação AASHTO**

Classificação geral	Materiais granulares (35% ou menos da amostra total passante pela peneira nº 200)							
	A-1		A-3	A-2				A-2-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6		
Ensaio de peneiramento (porcentagem passante)								
nº 10	50 no máximo		51					
nº 40	30 no máximo	50 no máximo	no mínimo					
nº 200	15 no máximo	25 no máximo	10 no máximo	35 no máximo	35 no máximo	35 no máximo	35 no máximo	
Características da fração passante nº 40								
Limite de liquidez				40 no máximo	41 no mínimo	40 no máximo	41 no mínimo	
Índice de plasticidade	6 no máximo		NP	10 no máximo	10 no máximo	11 no mínimo	11 no mínimo	
Tipos comuns de materiais constituintes significantes	Fragmentos de pedra, pedregulho e areia		Areia fina	Silte ou pedregulho argiloso e areia				
Avaliação geral como subleito	De excelente a bom							
Classificação geral	Materiais de silte-argila (mais de 35% da amostra total passante pela nº 200)							
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 <sup>a</sup> A-7-6 <sup>b</sup>				
Ensaio de peneiramento (porcentagem passante)								
nº 10								
nº 40								
nº 200	36 no mínimo	36 no mínimo	36 no mínimo	36 no mínimo				
Características da fração passante nº 40								
Limite de liquidez	40 no máximo	41 no mínimo	40 no máximo	41 no mínimo				
Índice de plasticidade	10 no máximo	10 no máximo	11 no mínimo	11 no mínimo				
Tipos comuns de materiais constituintes significantes	Solos com silte		Solos argilosos					
Avaliação geral como subleito	De fraco a ruim							

<sup>a</sup>Para A-7-5,  $IP \leq LL - 30$

<sup>b</sup>Para A-7-6,  $IP > LL - 30$

Fonte: Das (2011, p. 87)

A metodologia SUCS foi inicialmente idealizada para trabalhos de campos de aviação, porém esse sistema foi revisado no ano 1952 e atualmente é utilizado amplamente por engenheiros visando atender a Norma D-2487 da *American Society for Testing and Materials* – ASTM. Esse sistema é classificado em apenas duas grandes categorias (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**), sendo eles para solos de granulação grossa e solos de granulação fina. Os solos grossos são caracterizados pelos pedregulhos ou areias, cujo material fica 50% da amostra trabalhada retida na peneira de n.º 200. Já solos finos são caracterizados pelos siltes e argilas, sendo que o material passante trabalhado fica mais de 50% na peneira de n.º 200. Das (2011) corrobora ainda que os solos finos ainda são subdivididos em duas partes, pois levam em conta o limite de liquidez que cada amostra apresenta, sendo que amostras com o índice maior que 50% tem resultados distintos das amostras com o índice menor (Das, 2011). Esse índice de plasticidade pode ser representado graficamente (Figura 4).

**Figura 3 – Sistema Unificado de classificação de solo (baseado em material passante)**

Critérios para atribuir símbolos aos grupos			Símbolo de grupo	
<b>Solos grossos</b> Mais de 50% de material retido na peneira nº 200	<b>Pedregulhos</b> Mais de 50% da fração grossa retida na peneira nº 4	Pedregulhos puros	$C_u \geq 4$ e $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW
		Menos de 5% de finos <sup>a</sup>	$C_u < 4$ e/ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3^c$	GP
		Pedregulhos com finos	$IP < 4$ ou representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3)	GM
	<b>Areias</b> 50% ou mais da fração grossa passa pela peneira nº 4	Mais de 12% de finos <sup>a,d</sup>	$IP > 7$ e representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3)	GC
		Areias puras	$C_u \geq 6$ e $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW
		Menos de 5% de finos <sup>b</sup>	$C_u < 6$ e/ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3^c$	SP
		Areia com finos	$IP < 4$ ou representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3)	SM
	Mais de 12% de finos <sup>b,d</sup>	$IP > 7$ e representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3)	SC	
<b>Solos finos</b> 50% ou mais do material passa pela peneira nº 200	<b>Siltes e argilas</b> Limite de liquidez menor que 50	Inorgânicos	$IP > 7$ e representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3) <sup>e</sup>	CL
			$IP < 4$ ou representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3) <sup>e</sup>	ML
	<b>Siltes e argilas</b> Limite de liquidez de 50 ou mais	Orgânicos	Limite de liquidez – seco em estufa < 0,75; veja a Figura 5.3; zona OL Limite de liquidez – sem secagem	OL
		Inorgânicos	$IP$ representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3)	CH
			$IP$ representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3)	MH
		Orgânicos	Limite de liquidez – seco em estufa < 0,75; veja a Figura 5.3; zona OH Limite de liquidez – sem secagem	OH
Solos altamente orgânicos	Matéria essencialmente orgânica, de cor escura e odor orgânico		Pt	

<sup>a</sup>Pedregulhos com 5 a 12% de finos exigem classificação com dois símbolos: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

<sup>b</sup>Areias com 5 a 12% de finos exigem classificação com dois símbolos: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

<sup>d</sup>Se  $4 \leq IP \leq 7$  e é representado na área hachurada na Figura 5.3, use classificação com dois símbolos GC-GM ou SC-SM.

<sup>e</sup>Se  $4 \leq IP \leq 7$  e é representado na área hachurada na Figura 5.3, use classificação com dois símbolos CL-ML.

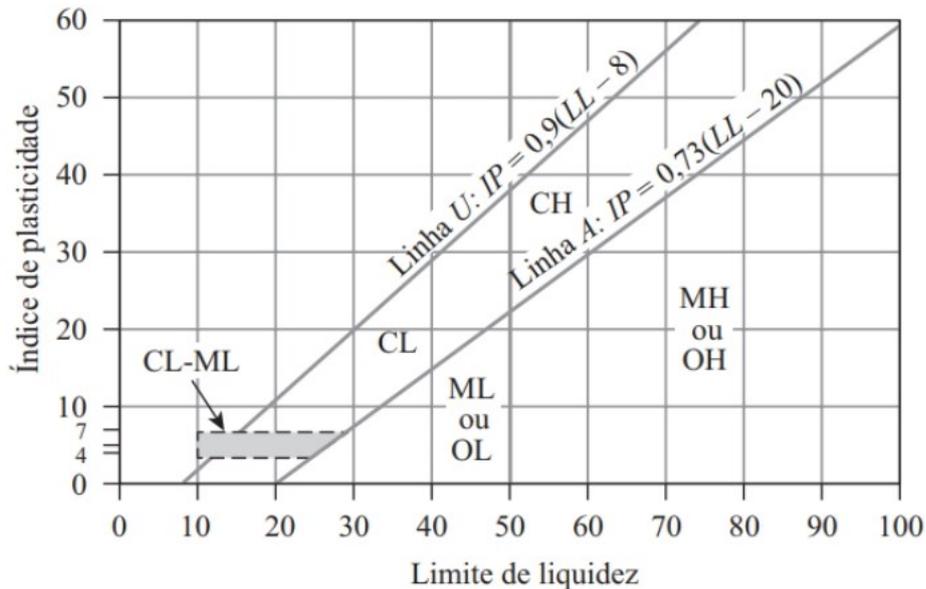
**Fonte: Das (2011, p. 90)**

Para Caputo (2012), o SUCS é trabalhado em três grandes grupos, solos grossos que tem diâmetro maiores que 0,074 mm (mais de 50% em peso dos seus grãos são retidos na peneira de n.º 200), solos finos cujo diâmetro da maioria dos grãos é menor que 0,074 mm e turfas que são solos predominantemente orgânicos, geralmente fibrilares e extremamente compressíveis.

No primeiro grupo enquadram-se os pedregulhos, areias e os solos pedregulhos os ou arenosos com uma baixa quantidade de material fino. Para o segundo grupo abrange os solos

siltosos e argilosos com baixa ou alta compressibilidade. E o terceiro e último grupo ficam os solos pantanosos com e altamente orgânicos.

**Figura 4 – Carta de Plasticidade**



Fonte: Das (2011, p. 91)

### 4.3 Estabilização do solo

O processo de estabilização dos solos pode ser um processo físico, químico, e/ou mecânico, onde se altera as propriedades e a estrutura do solo pela inserção de um agente externo (USBR, 1998).

Para Foppa (2005), a estabilização consiste no processo de aprimoramento do solo através da correção granulométrica, compactação ou adição de aditivos, promovendo diminuição do volume de vazios, modificação das características de permeabilidade e melhorando o agrupamento entre os grãos, promovendo maior contato entre eles e proporcionando maior capacidade de distribuição das tensões.

A quantidade implementada desses aditivos deve ser gradativa, estudada e regulamentada para cada tipo de uso, com intuito de que o produto final possa trazer alta qualidade e atender os requisitos mínimos para sua aplicação (Ferreira, 2019). A dosagem incorreta desses aditivos pode fazer com que o solo trabalhado sofra mudanças gerais nas suas características permanentemente, tornando o solo inviável e acarretando em um desperdício do aditivo e, conseqüentemente, encarecendo o custo da solução (USBR, 1998).

A obtenção do solo ocorre de forma uniforme e especializada com a finalidade de manter a umidade higroscópica e as características uniformes durante a estocagem das amostras. Equipamentos de terraplanagem são geralmente utilizados para a remoção da camada

orgânica antes de se efetuar os testes com aditivos. Procedimentos laboratoriais são de suma importância, pois indicam o tipo de aditivo (cimento, cal, etc.) mais indicado para determinado solo trabalhado (USBR, 1998).

A escolha entre os processos de estabilização é pautada na viabilidade técnica e econômica, para tanto, é necessário estudo para aplicar os melhores métodos de estabilização de solos, dos mais tradicionais até as novas técnicas disponíveis no mercado (Brito, Paranhos, 2017).

#### **4.3.1 Estabilização física**

O princípio da estabilização física é alterar as propriedades do solo. Entre as táticas de estabilização comumente utilizadas, está a adição de fibras e correção da curva granulométrica. Com isso, se propicia uma maior variedade nos tamanhos das partículas e, por consequência, redução do volume de vazios. Este processo, consiste em dosar-se uma mistura de dois ou mais materiais, de modo que a mistura se enquadre dentro de uma determinada faixa granulométrica de forma a atender às especificações normativas do projeto.

Ferreira (2019) ainda pontua que existe outras formas de estabilização física que consiste em procedimentos elétricos, eletro-osmose e tratamentos de secagem e congelamento com intuito de melhoria das características estruturais e de drenagem do solo trabalhado.

#### **4.3.2 Estabilização mecânica**

A estabilização mecânica consiste na operação que visa a correção granulométrica do solo por meio da compactação e, conseqüentemente, o rearranjo das partículas (Soliz, 2007).

A compactação é um procedimento que resulta no aumento do peso específico aparente do solo por meio da aplicação de pressão, choque ou vibração. Isso faz com que as partículas constituintes do material entrem em contato mais propínquo, o que faz com que as partículas constituintes do material entrem em contato mais próximo devido a expulsão do ar e conseqüentemente a redução a tendência de variação do teor de umidade dos materiais (DNIT, 2006).

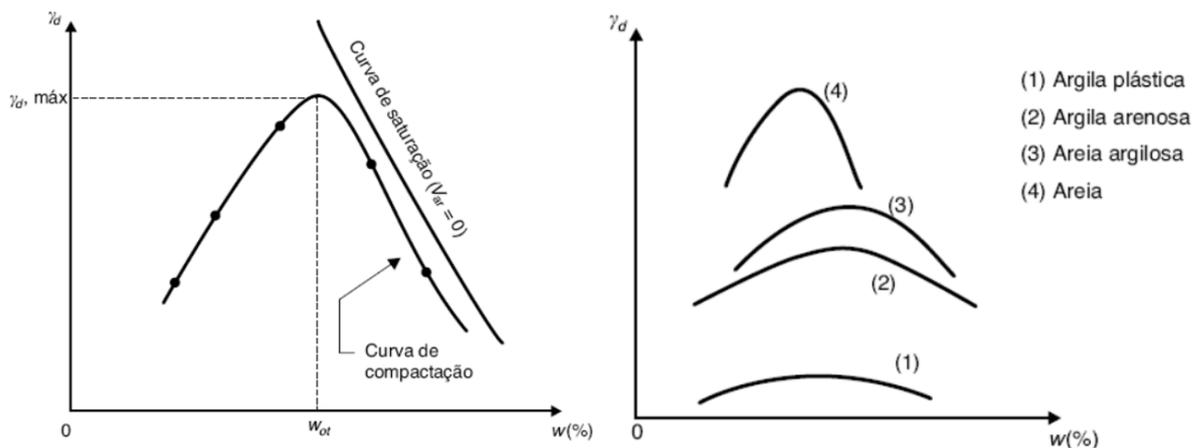
Souza Junior (2005) ainda complementa que a compactação pode ser vista como um processo que visa a melhoria das propriedades de um determinado material comprimindo-o com uma determinada energia mecânica. E dentre os principais benefícios obtidos podemos citar o aumento da densidade, resistência ao cisalhamento, capacidade de suporte, redução do índice de vazios, permeabilidade, contração e a compressibilidade.

Dentro da compactação do solo, quando exposto a diferentes teores de umidade e uma energia de compactação padronizada, produz uma curva onde seus dados variam conforme o peso específico seco do solo trabalhado e o teor de umidade.

Essa curva demonstra o ponto exato onde o peso específico seco é máximo, o qual, traçando uma reta no eixo das abscissas, corresponderá ao teor de umidade ótima. Essa curva varia conforme o tipo de solo trabalhado (Figura 5), porém, se assemelham quanto a forma que elas se apresentam.

Quando os valores do teor de umidade crescem o solo se tornam mais trabalhável, conseqüentemente com pesos específicos secos mais elevados e volume de ar menores, explicando esse comportamento do solo. Vale pontuar que não é possível chegar na curva de saturação, pois não é possível a eliminação total ar existente nos vazios do solo (Caputo, 2012).

**Figura 5 – Curva de compactação a) visão geral; b) efeito do tipo de solo**



Fonte: a)

Fonte: Caputo (2012, p. 173)

b)

### 4.3.3 Estabilização química

A estabilização química pode ser estabelecida como a mudança na estrutura do solo a partir da adição de substâncias, com a finalidade de realizar melhorias físicas e mecânicas (Sartori, 2015).

Este processo visa melhorias baseando-se na reação química causada pela adição de aglutinantes, sendo o cimento e a cal os agentes estabilizantes mais tradicionais. Esta interação que ocorre entre as partículas do solo, água e aglutinante, propiciam melhorias nas propriedades do solo quando comparado ao seu estado natural.

## 4.4 Cal

A cal é um aglomerante obtido através da calcificação do calcário, muito utilizada no ramo da construção civil, empregado para reter ou fixar materiais entre si. Esse aglutinante é um dos produtos manufaturados mais antigos a serem utilizados, tanto que teve participação na execução da autoestrada Ápia no século XX, porém somente após esse período seu uso começou a se generalizar, tendo o uso consolidado após a segunda guerra mundial. As suas aplicações podem variar entre pintura, utilização como agregado, argamassa mista, argamassa aérea, aplicação em solos, entre outras aplicações (Brito; Paranhos, 2017).

### 4.4.1 Estabilização solo-cal

Sendo um aditivo de solo, o uso da cal é o mais antigo método conhecido de estabilização química, sendo que essa estabilização designada solo-cal consiste na mistura de solo, cal e água em proporções determinadas por norma e avaliadas experimentalmente. A utilização dessa solução é recomendada para melhorar as propriedades de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentam plasticidade e alta expansão, além de contribuir na capacidade de suporte (Teixeira, 2019).

Essa técnica baseia-se nas reações químicas e físicas que ocorre entre a cal e os constituintes do solo, que podem suceder por modificação ou estabilização. A modificação é gerada pela troca catiônica, onde os cátions de cálcio, fornecido pelo hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ) são trocados por cátions presentes no solo argiloso, em condições ambientais favoráveis, isto é, ambiente com alto valor de pH.

Esse processo é parcialmente responsável pela mudança na textura do solo, causada pela floculação das partículas de argila. Logo, essa inserção do aglomerante na correção do solo, pode gerar mudanças nos limites de plasticidade e liquidez e granulometria do solo trabalhado (Brito; Paranhos, 2017). Já a estabilização é um processo mais tardio, pois é resultante de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados que dependem de um pH elevado e reatividade do solo, podendo melhorar a capacidade de carga e resistência mecânica do solo (USBR, 1998).

Azevedo (2010) argumenta que o processo de estabilização para a mistura solo-cal é longo, podendo levar meses para se concluir. Ainda assim, o autor menciona que para algumas finalidades o tempo de cura de aproximadamente 48h a 7 dias já atende algumas exigências e expectativas de uso.

## 4.5 Agregado reciclado

Na construção civil é intrínseco aos processos a perda de material e geração de resíduo, seja por perdas mínimas em decorrência do tipo de material, falta de experiência de quem utiliza destes materiais, mal dimensionamento de projeto ou inúmeros outros fatores que geram grande desperdício (Cremasco, 2022).

Por tratar-se de um item da economia de alto impacto ambiental e que faz uso extensivo de matérias-primas de diversos tipos, a geração de resíduos de forma descontrolada e sem destinação correta gera um alerta grande de atenção e uma procura por alternativas para reduzir essa grande quantidade de resíduo (Cremasco, 2022).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) classifica por classe os diferentes tipos de resíduos que podem ser gerados conforme resoluções 307/2002 e 348/2004, em que os resíduos da construção civil tem alto potencial de serem reaproveitados na forma de agregado reciclado em projetos de engenharia, conforme mostra o Quadro 1.

**Quadro 1 – Classificação dos tipos Resíduos (CONAMA)**

CLASSE	TIPOS DE RESÍDUOS
<b>A</b>	a) De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
	b) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto;
	c) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas em canteiro de obras;
<b>B</b> São os resíduos recicláveis para outras destinações	Plástico, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
<b>C</b> São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação	Como os produtos oriundos do gesso.
<b>D</b> São resíduos perigosos oriundos do processo de construção	Amianto, tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Fonte: CONAMA (2002, p. 3)

### 4.5.1 Situação do Brasil

As primeiras pesquisas relacionadas ao uso de agregados reciclados foram entre os anos de 1986-1997, intervalo de tempo onde também foram criadas as primeiras usinas de

reciclagem do país. No ano de 1999, a partir de muito estudo e verificação de agressividade da geração de resíduos, foi concretizada a relevância desse tema, apontando que a geração de Resíduo de Construção e Demolição – RCC pode corresponder a mais de 50% dos sólidos municipais de cada município (Miranda; Ângulo; Careli, 2009).

Em 2000, devido à grande geração de resíduos, apontamentos foram feitos para verificar a reutilização desses agregados reciclados na própria área de construção civil, seja no uso de argamassas, concretos pré-moldados ou concretos em geral. Com uma visão um pouco mais ampla sobre a quantidade de resíduos gerados e a gravidade que isso pode levar, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), teve a primeira resolução elaborada em 2002, onde todos os setores públicos de grande geração deveriam obrigatoriamente implantar um plano de gestão de RCC. Após essa implantação, normas técnicas foram criadas pelos Comitês Técnicos e publicadas pela ABNT, como a norma de diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros (ABNT, 2004), como a NBR 15113 (2004) e NBR 15114 (2004) que tem como destinação para diretrizes de projetos e implantação de aterros e áreas de reciclagem, a NBR 15115 (2004) que norteia a execução de camadas de pavimentos e a NBR 15116 (2004) que visa a utilização desses agregados na pavimentação e concreto sem função estrutural (Miranda; Ângulo; Careli, 2009).

Souza (2004) complementa que a indústria da construção civil consome em grande escala diversos tipos de materiais. Em comparação com a indústria automobilística, consome de 100 a 200 vezes mais material, demonstrando o grande impacto na produção de resíduos da indústria pelo setor da construção civil.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) publica anualmente o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, com dados sobre a produção, coleta e destinação dos resíduos sólidos. Em novembro de 2022 foi publicado um panorama onde indicava que o Brasil gera 81,8 milhões de toneladas de resíduos recicláveis por ano nas empresas (ABRELPE, 2021).

Afonso (2005) e Brandão (2010) fizeram estudos similares a respeito da utilização do RCC, sendo que Afonso (2005) utilizou agregados graúdos reciclados e Brandão (2010) trabalhou com dois tipos de amostras, sendo uma proveniente de concreto e outra de material cerâmico. Ambos verificaram que a impermeabilidade horizontal do solo foi satisfatória, a distribuição granulométrica se apresentou bem graduado e obtiveram resultados satisfatórios quanto a resistência a compressão simples.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção são apresentados os materiais que foram utilizados, bem como os procedimentos metodológicos para cumprimento dos objetivos propostos.

### 5.1 Materiais

Os materiais foram adquiridos na região da cidade de Campo Mourão. O solo foi coletado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). A água utilizada foi a destilada para os ensaios de caracterização e da rede de abastecimento para os ensaios de compactação e resistência. A cal utilizada nos procedimentos foi a cal hidratada-CH-III que foi fornecida pelo laboratório de materiais da UTFPR que atende a ABNT NBR 7175 (2002) e o agregado reciclado que foi obtido em indústria de beneficiamento na cidade de Londrina/PR.

### 5.2 Métodos

Nessa subseção foram abordados os métodos e as normas que nortearam os ensaios e procedimentos que foram utilizados.

#### 5.2.1 Preparação do solo

O solo foi coletado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Campo Mourão, e preparado conforme estabelecido pela NBR 6457 (2016). Esse solo foi disposto em formas de aço para que fosse possível a secagem do material ao ar livre (Figura 6).

Figura 6 – Solo para secagem ao ar livre



Fonte: Autoria Própria (2023)

Devido a agregação natural do solo, partindo de um material seco ao ar, foi efetuado o processo de peneiramento do solo utilizando a peneira de abertura 2 mm (Figura 7a) a fim de desagregá-lo. No material retido foi feito o processo de destorroamento utilizado almofariz e mão de gral (Figura 7b).

**Figura 7 – Preparação do solo: (a) peneiramento; (b) almofariz e mão de gral**



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Após finalizado o processo de destorroamento do solo argiloso, foi realizado a homogeneização do mesmo, onde todo o material que estava armazenado foi misturado manualmente com o material destorroado. Esse processo foi efetuado para garantir que a uniformidade da amostra coletada e teor de umidade higroscópica do solo. Após a homogeneização, foi armazenado o material em um tambor grande, onde foi lacrado com um plástico em sua superfície e uma tampa para que evitasse a troca de umidade com o ambiente (Figura 8a).

Além disso, foram retiradas 3 cápsulas contendo solo para que pudesse verificar o teor de umidade que o solo trabalhado seco ao ar apresentava (Figura 8b). Para isso, o solo foi levado até a estufa com temperatura constante de 105 °C em um período mínimo de 12 horas onde obteve-se a constância de massa do material.

**Figura 8 – Solo preparado: (a) armazenamento; (b) cápsula**



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

### **5.2.2 Determinação do teor de cal e de agregado reciclado**

Para determinação do teor de cal foi utilizado o método proposto por Eades e Grim (1966), chamado método do pH, seguindo normativa do DNIT 419 (2019), com o objetivo de determinar o teor mínimo de cal necessário para estabilizar o solo argiloso. Assim, foi reservado uma porção de aproximadamente 500 gramas de solo passante na peneira de nº 40 (0,42 milímetros) para que pudesse ser realizado o ensaio.

A porção preparada foi acondicionada em 6 recipientes de vidro com 25 gramas de solo em cada (Figura 9). Logo em seguida, foi adicionado quantidades de cal, contendo 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em cada recipiente, bem como recipiente sem solo e com 2 gramas de cal para representar uma porção saturada. Depois de inserido a quantidade de cal juntamente ao solo, foi adicionado 100 ml de água destilada nos recipientes, que foram agitados manualmente durante 30 segundos a cada 10 min durante 1 hora. Nos últimos 15 min antes de completar 1 hora de ensaio, foi feito a medição do pH com o auxílio do equipamento de medidor de pH devidamente calibrado.

**Figura 9 – Ensaio de pH: (a) preparação de amostras; (b) medidor de pH.**



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria (2023)

### 5.2.3 Caracterização dos materiais

Para a realização da caracterização do solo, foi utilizado o ensaio de granulometria, considerando as etapas de sedimentação e peneiramento, mediante a NBR 7181 (2016). A norma tem como pré-requisito a outras normas citadas anteriormente, pois o ensaio foi efetuado com a preparação do solo, pois foi iniciado com a secagem, destorroamento, homogeneização e quarteamento.

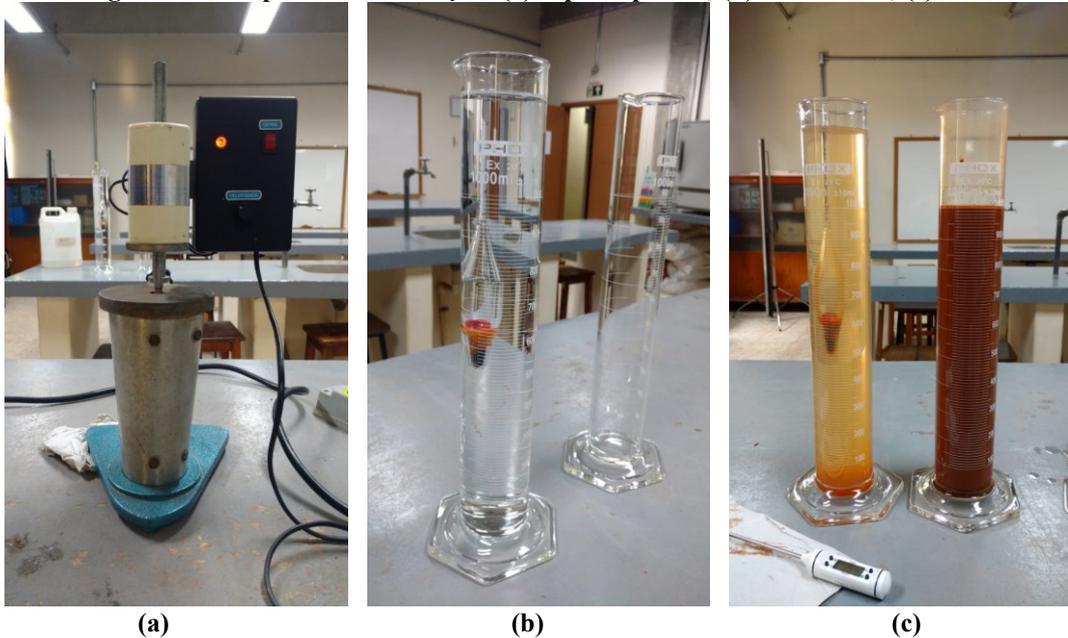
Como o solo em estudo é argiloso, logo após a separação das cápsulas para aferir sua umidade higroscópica, foram separadas mais duas amostras de 70 gramas cada, armazenadas em beckers juntamente com água destiladas e misturadas com um auxílio de um bastão de vidro, onde essas amostras ficaram submersa por um período de no mínimo de 12 horas. Após atingir o tempo mínimos requerido por norma esse material foi transferido para o copo dispersor, onde sofreu uma agitação por 15 minutos.

Essa mistura foi transferida para uma proveta graduada e calibrada, onde foi completada com água destilada e agitada em um período de 1 minuto de forma enérgica e manual. Após a agitação, foi inserido o densímetro na amostra para fazer as verificações da densidade e temperatura nos tempos de 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos (Figura 10).

Após realizadas as medições de densidade e temperatura, esse material foi levado a uma torneira de baixa pressão onde foi vertido na peneira de abertura 0,075 milímetros onde ocorreu o processo de lavagem. Logo em seguida, a material retido na peneira foi depositado em um recipiente e levado para a estufa durante 24 horas. Após a secagem do material foi

pesado para que assim obtivesse todos os valores para obtenção da curva granulométrica do solo.

**Figura 10 – Etapa de sedimentação: (a) copo dispersor; (b) densímetro; (c) ensaio**



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a obtenção da massa real dos grãos e do agregado, foi separado 2 amostras de solo e agregado de 50 e 100 gramas, respectivamente, onde ficaram imersas em água destilada por um período de 24h. Após o tempo de imersão, as amostras foram transferidas para o copo dispersor com o auxílio de uma pisseta, onde foram misturadas no agitador por um período de 15 minutos. Após o intervalo essa mistura foi transferida para o picnômetro devidamente calibrado e preenchido com água destilada até aproximadamente metade do seu volume.

O próximo passo foi a aplicação de vácuo no picnômetro em duas etapas, onde o vácuo ficou responsável por retirar todo o ar contido na amostra e diluído na água, sendo que as etapas foram divididas em intervalos de 15 minutos. Após o preenchimento do picnômetro e concluída as etapas foi completado com água destilada até o marco do picnômetro. Por fim, foi feita a medição da temperatura e a pesagem para a obtenção dos dados para o cálculo da massa real dos grãos.

Buscando entender o comportamento e composição dos materiais, foram preparadas 10 gramas do solo, da cal e até mesmo do RCC para o ensaio de fluorescência de raios-x (FRX). Essas amostras foram obtidas através do peneiramento dos materiais utilizando a peneira 0,075 mm e armazenadas em 3 recipientes de vidro que foram enviadas para o Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Apucarana, onde realizaram testes de fluorescência de raios-x desses materiais (Figura 11).

**Figura 11 – Amostras Retiras para fluorescência de raio-x**



Fonte: Autoria própria (2023)

#### 5.2.4 Determinação dos Parâmetros de Compactação

Os parâmetros de compactação do solo foram determinados através do método especificado pela norma ABNT 7182 (2016). Com a Equação 4 foi calculado o teor de umidade, onde  $M_{\omega}$  é a massa da amostra úmida e  $M_s$  a massa da amostra seca.

$$\omega\% = \frac{M_{\omega} - M_s}{M_s} * 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Primeiramente foi determinado a massa aparente do solo úmido após cada compactação por meio da Equação 5, onde  $\rho_h$  é a massa específica aparente do solo úmido em  $\text{g/cm}^3$ ,  $M_h$  é a massa do solo úmido compactado e  $V$  é o volume do solo em  $\text{cm}^3$ . Em seguida foi determinado o peso específico aparente do solo seco, após cada compactação por meio da Equação 6,  $\rho_d$  onde é a massa específica do solo seco.

$$\rho_h = \frac{M_h}{V} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\rho_d = \rho_h * \frac{100}{100 + \omega} \quad (\text{Eq. 6})$$

Com as equações supracitadas acima, obteve-se pelo menos 5 pontos, para que assim fosse possível traçar a curva de compactação, onde foram determinadas a massa específica aparente máxima do solo e teor de umidade ótima para cada condição experimental.

Todas essas operações foram executadas com energia normal de Proctor, formando 3 camadas que foram trabalhadas, sendo que em cada camada foram efetuados 26 golpes com auxílio de um soquete à uma altura de queda de 30,5 cm de altura e a cada camada foram realizadas escarificações entre as camadas para que a aderência de uma camada e a outra pudesse ser maior (ABNT 12024, 2012).

### 5.2.5 Condições de moldagem

A partir da obtenção dos parâmetros de compactação, foram moldados corpos de prova em triplicata para ensaios de resistência à compressão simples (RCS), adotando período de cura de 3, 7 e 28 dias, segundo orientação da ABNT NBR 12024 (2012). Com base em pesquisas anteriores, foram adotados para o controle de compactação grau de compactação (GC)  $\geq 95\%$  e variação do teor de umidade ótima ( $\Delta\omega_{ót}$ ) de  $\pm 2\%$ . Para a realização do controle de compactação foram coletadas 3 cápsulas para cada corpo de prova moldado, que foram levados para a estufa para extrair os dados e verificação do cumprimento do controle.

Vale ressaltar que foi estabelecida adição de 8% de cal e substituição de 25% do solo pelo agregado reciclado com intuito de verificar a influência do RCC no processo de estabilização do solo argiloso da região de Campo Mourão.

### 5.2.6 Resistência à compressão simples

A avaliação a resistência de compressão simples (RCS) nas misturas ocorreu sob orientação da ABNT NBR 12025 (2012), realizados para todos os corpos de prova para 3, 7 e 28 dias.

Para comparação do comportamento das condições experimentais, dentre a remessa em triplicata, dois corpos de prova foram trabalhados na sua pior condição, ou seja, totalmente saturados, os quais ficaram imersos no mínimo 4 horas em água antes que pudesse ser realizado o rompimento do mesmo. O terceiro corpo de prova foi manuseado sem imersão, com intuito de verificar a influência da umidade na resposta do solo, solo-RCC e solo-RCC-cal.

Após a etapa de imersão, foram aferidas as dimensões e peso dos corpos de prova, para seguir com a etapa de ruptura. Para isso, foi utilizada prensa hidráulica de compressão simples, que atende todos os requisitos exigidos pela norma, entre os quais, velocidade média de aplicação de carga de 1 mm/min para cada corpo de prova produzido (Figura 12).

**Figura 12 – Prensa Hidráulica para ensaio de RCS**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nesse trabalho.

### 6.1 Caracterização física e classificação do solo

A Tabela 1 apresenta o teor de umidade do solo seco ao ar. Com isso foi verificado que o solo que foi armazenado para a realização dos diversos ensaios apresentou teor de umidade de aproximadamente 18,9%. Obteve-se também os valores de desvio padrão do solo que foi de 10 % e coeficiente de variabilidade (CV) de 0,54%, indicando a precisão e homogeneidade do solo preparado.

**Tabela 1 – Teor de umidade, desvio padrão e coeficiente de variabilidade do solo trabalhado**

<i>Determinação</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Cápsula n.o</i>		24	25	26
<b>M<sub>s</sub>+M<sub>w</sub>+M<sub>c</sub></b>	(g)	30,47	29,72	30,35
<b>M<sub>s</sub>+M<sub>c</sub></b>	(g)	26,94	26,25	26,83
<b>M<sub>c</sub></b>	(g)	8,34	7,77	8,20
<b>M<sub>w</sub></b>	(g)	3,53	3,47	3,52
<b>M<sub>s</sub></b>	(g)	18,60	18,48	18,63
<b>ω</b>	(%)	18,98	18,78	18,89
<b>ω média</b>	(%)		18,88	
<b>Desvio teor de umidade</b>			<b>0,10</b>	
<b>CV(%)</b>			<b>0,54</b>	

**Fonte: Autoria própria (2023)**

O Ensaio da massa real dos grãos do solo gerou resultados demonstrados na Tabela 2 em duplicata sendo que a média obtida foi 3,24 g/cm<sup>3</sup>, desvio padrão de 0,04 e CV de aproximadamente 1,33%.

**Tabela 2 – Ensaio picnômetro para massa específica do solo**

<i>Determinação</i>		<i>1</i>	<i>2</i>
ps (20)	(g/cm <sup>3</sup> )	3,27	3,21
ps (20) médio	(g/cm <sup>3</sup> )	3,24	
Desvio-padrão	(g/cm <sup>3</sup> )	0,04	
Coeficiente de variação (CV):		1,23%	

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados de granulometria do solo estão apresentados no Quadro 2 para o peneiramento fino.

**Quadro 2 – Resultado do peneiramento fino**

Abertura da Peneira (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	Massa passante acumulada (g)	% Passante
1,2	0,190	0,190	58,683	99,677
0,6	0,430	0,620	58,253	98,947
0,42	0,350	0,970	57,903	98,352
0,25	0,780	1,750	57,123	97,028
0,15	1,300	3,050	55,823	94,819
0,075	2,120	5,170	53,703	91,218

Fonte: Autoria própria (2023)

Já no Quadro 3 são apresentados os dados de sedimentação com a amostra natural do solo.

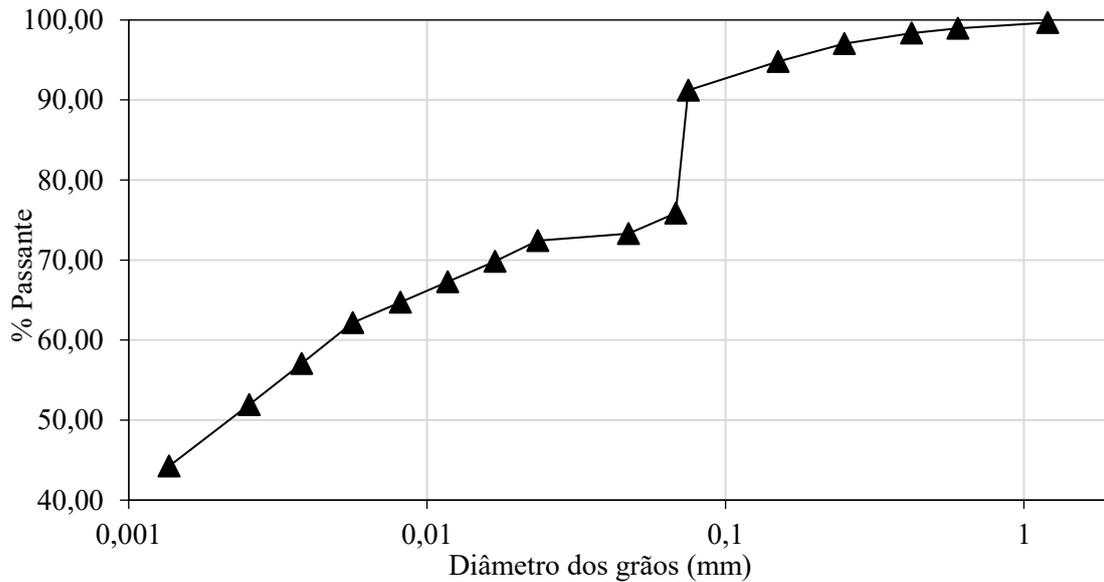
**Quadro 3 – Resultados do ensaio de sedimentação sem defloculante**

Leitura no Densímetro (g/cm <sup>3</sup> )	Tempo (min)	Leitura	Temp. (°C)	H queda (cm)	$\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	Lc	$\mu$ (g.s/cm <sup>2</sup> )	D (mm)	%passante
1,037	0,5	37	21,1	7,3505	0,9979	29,6495	10,06	0,096	75,85
1,037	1	37	21,1	7,3505	0,9979	29,6495	10,06	0,068	75,85
1,036	2	36	21,1	7,3515	0,9979	28,6485	10,06	0,047	73,28
1,035	4	35	21,1	5,6925	0,9979	29,3075	10,06	0,034	74,97
1,034	8	34	21,1	5,6935	0,9979	28,3065	10,06	0,023	72,41
1,033	15	33	21,1	5,6945	0,9979	27,3055	10,06	0,017	69,85
1,032	30	32	20,9	5,6955	0,998	26,3045	10,11	0,012	67,29
1,031	60	31	20,9	5,6965	0,9980	25,3035	10,11	0,008	64,73
1,03	120	30	21	5,6975	0,9980	24,3025	10,09	0,006	62,17
1,028	240	28	21,4	5,6995	0,9979	22,3005	9,99	0,004	57,05
1,026	480	26	22,4	5,7015	0,9977	20,2985	9,76	0,003	51,92
1,023	1440	23	21,3	5,7045	0,9979	17,2955	10,01	0,001	44,24

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 13, mostra curva granulométrica com solo natural, sem nenhum reagente ou estabilizante.

**Figura 13 – Curva granulométrica do solo**



Fonte: Autoria própria (2023)

Com a curva granulométrica tratada é perceptível que os resultados são bem semelhantes à de outros autores que trabalharam com o mesmo tipo de solo argiloso que foram coletados na região, como Batelo (2019) e Mendes (2023).

Nesse sentido, os resultados de limite de liquidez e de plasticidade foram adotados a partir do estudo de Batelo (2019), dado que são ensaios que apresentam uma variabilidade de resultados bem alta devido aos procedimentos e vários fatores que podem alterar os resultados finais de cada ensaio. Assim, Batelo (2019) obteve limite de liquidez e limite de plasticidade de 55% e 29%, respectivamente, calculados pela média aritmética entre as amostras trabalhadas.

A partir dessas informações, o solo pode ser classificado pela AASHTO e pela SUCS. Pelo sistema de classificação AASHTO o solo ficou caracterizado como solo argiloso tipo A-7-6 devido seus limites e quantidade de material passante na peneira de número 200. Já pela classificação SUCS fica caracterizado como um solo argiloso de alta plasticidade (CH), pela sua posição que se encontra na carta de plasticidade do sistema.

## 6.2 Caracterização do agregado reciclado

Os resultados de granulometria do RCC por peneiramento estão apresentados nos Quadros 4 e 5, considerando que foram feitos em duplicata para analisar a homogeneidade das amostras do material.

**Quadro 4 – Granulometria por peneiramento (Amostra 1)**

Abertura da Peneira	Massa retida (g)	% retida em cada peneira	% retido acumulado	% passante na peneira
3/8"	72,0	5,47	5,47	94,53
Nº 4	822,0	62,46	67,93	32,07
Nº 10	232,0	17,63	85,56	14,44
Nº 40	56,0	4,26	89,82	10,18
Nº 60	63,0	4,79	94,60	5,40
Nº 200	42,0	3,19	97,80	2,20
Fundo	29,0	2,20	100,00	0,00
Total	1316,0	100,00		

Fonte: Autoria própria (2023)

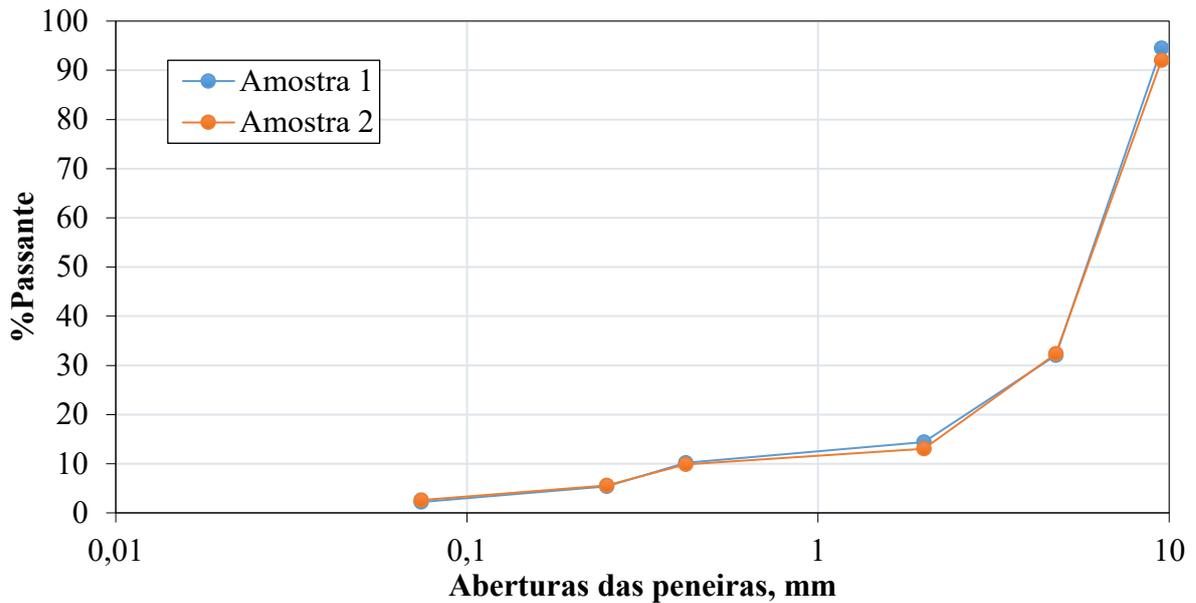
**Quadro 5 – Granulometria por peneiramento (Amostra 2)**

Abertura da Peneira	Massa retida (g)	% retida em cada peneira	% retido acumulado	% passante na peneira
3/8"	104,61	7,95	7,95	92,05
Nº 4	785,39	59,68	67,63	32,37
Nº 10	254,00	19,30	86,93	13,07
Nº 40	42,00	3,19	90,12	9,88
Nº 60	56,00	4,26	94,38	5,62
Nº 200	40,00	3,04	97,42	2,58
Fundo	34,00	2,58	100,00	0,00
Total	1316,00	100,00		

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 14 são mostradas as curvas granulométricas do RCC trabalhado. O ensaio realizado para a obtenção da curva granulométrica do RCC foi executado em duplicata para verificar se se haveria alguma variação discrepante. As duas curvas foram bem semelhantes quanto ao resultado, sendo que nas primeiras peneiras de série 1', ¾' e ½', não apresentaram nenhum material retido. Já nas peneiras subsequentes, apresentaram uma grande parte de material retido, onde a peneira com a maior porcentagem retida foi a peneira de série Nº4, onde nas duas curvas obtiveram aproximadamente de 60 a 70% do material retido, seguida pela peneira Nº10 que apresentou uma porcentagem de 17 a 20% do material demonstrando uma uniformidade na granulometria do agregado trabalhado.

Figura 14 – Curva granulométrica do RCC



Fonte: Autoria própria (2023)

O Ensaio da massa específica do RCC gerou resultados em duplicata sendo que a média obtida foi  $1,92 \text{ g/cm}^3$ , desvio padrão de 0,01 e CV de aproximadamente 0,56% (Tabela 3).

**Tabela 3 - Ensaio picnômetro para massa específica do RCC**

Determinação		1	2
ps (20)	( $\text{g/cm}^3$ )	1,91	1,92
ps (20) médio	( $\text{g/cm}^3$ )	1,92	
Desvio-padrão	( $\text{g/cm}^3$ )	0,01	
Coefficiente de variação (CV):		0,56%	

Fonte: Autoria própria (2023)

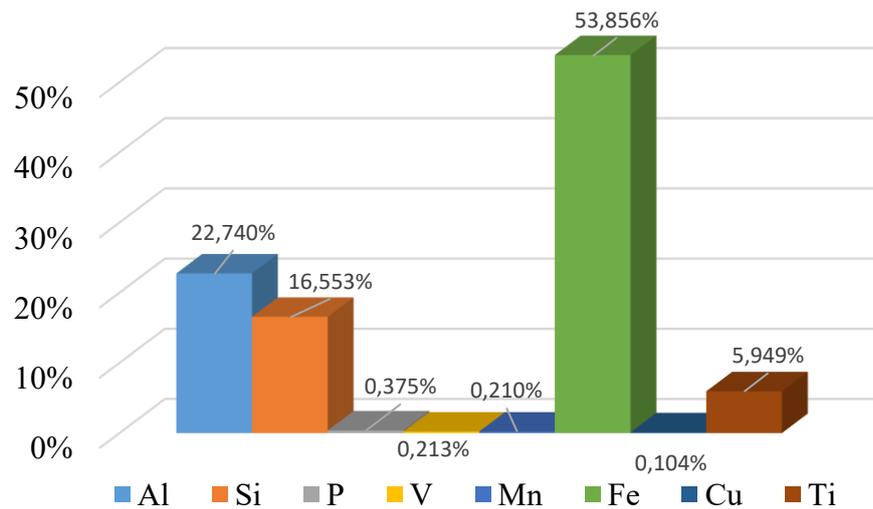
### 6.3 Fluorescência de raios-x

Para base de conhecimento sobre os materiais utilizados e para ajudar a explicar os resultados obtidos, foi efetuado o ensaio de fluorescência de raios-x (FRX) de cada material, o que demonstrou que cada uma delas tem composições diferentes. A amostra de solo apresentou um alto teor de ferro e alumínio, o que provoca uma aceleração das reações dentro do conceito de estabilização.

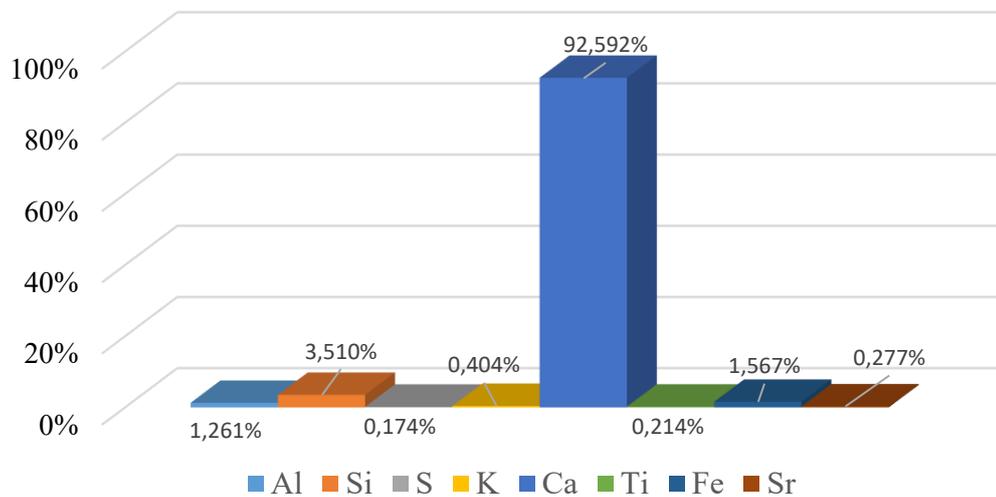
Já na amostra de cal traz um alto teor de cálcio na sua composição quando comparados a outros componentes presentes na amostra, o que demonstra o seu alto teor de pureza quanto ao material que estava sendo trabalhado.

Na questão do RCC, os elementos químicos com maior presença na sua composição é o ferro, cálcio e silício, os quais corroboram com a identificação da composição desse agregado, isto é, argamassas e materiais cerâmicos. A Figura 15 apresenta a composição completa de cada material, sendo solo, cal e RCC respectivamente.

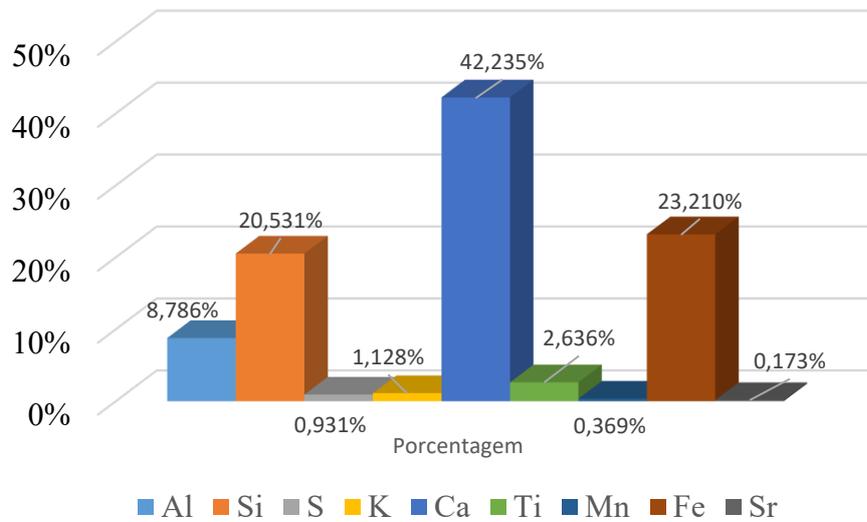
**Figura 15 – FRX dos materiais: (a) solo; (b) cal; (c) RCC.**



(a)



(b)



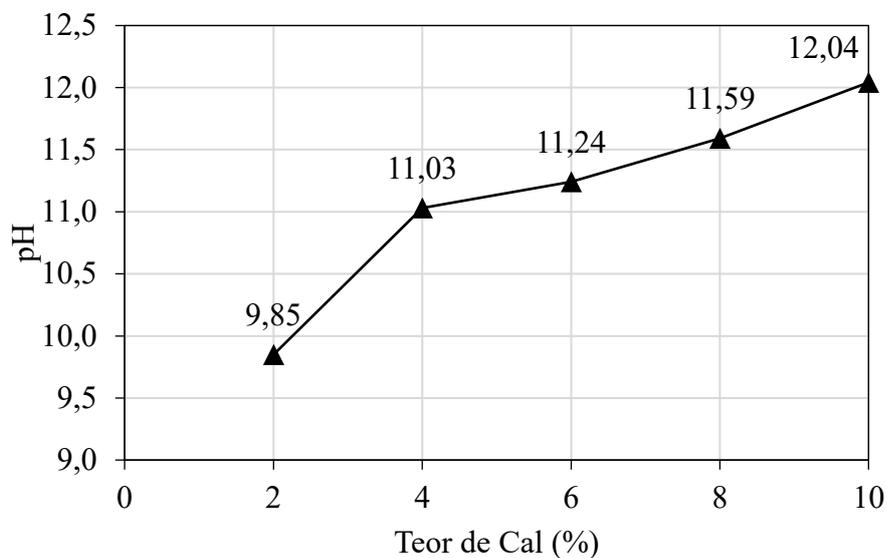
(c)

Fonte: Autoria própria (2023)

## 6.4 Método do pH

Na Figura 16 são apresentados os resultados do teste de pH realizado no solo.

**Figura 16 – Resultado dos testes de pH do solo trabalhado**



Fonte: Autoria própria (2023)

Observou-se que o maior resultado obtido foi do recipiente número 5, referente a 10% de adição de cal, porém não obteve um valor esperado que seria próximo de 12,4, valor de estabilização exigido do solo segundo o DNIT 419/2019. Verifica-se que, a partir da composição química do solo, uma taxa de aproximadamente 22,7% de alumínio e 53,9% de ferro em sua composição. De acordo com o DNIT (2019), isso se deve a ser um solo tropical

residual, rico em óxidos de ferro e alumínio, os quais consomem o hidróxido de cálcio de maneira muito rápida, refletindo na baixa acurácia desse método para esse tipo de solo.

A partir de estudos anteriores de estabilização química do solo argiloso de Campo Mourão com cal e os resultados obtidos pelo autor (Sartori, 2015), observou-se que 5% de cal resultava em ganhos de comportamento para aplicação na pavimentação. Segundo o DNIT 719 (2006), solos que apresentam teores de alumínio na sua composição não demonstram resultados conclusivos pelo método do pH, porém, podem ser trabalhados com teores entre 6 a 10% de cal. Com isso a escolha da porcentagem trabalhada foi a média entre 6 a 10% que se obteve o valor de 8% de adição de cal.

## 6.5 Compactação

Utilizando o método de compactação de Proctor, foram realizadas curvas para cada uma das misturas trabalhadas, sendo Solo, Solo-RCC, Solo-RCC-Cal. Os parâmetros de compactação estão indicados no Quadro 6. Além disso, a série de curvas obtidas estão dispostas nas Figuras 17, 18 e 19.

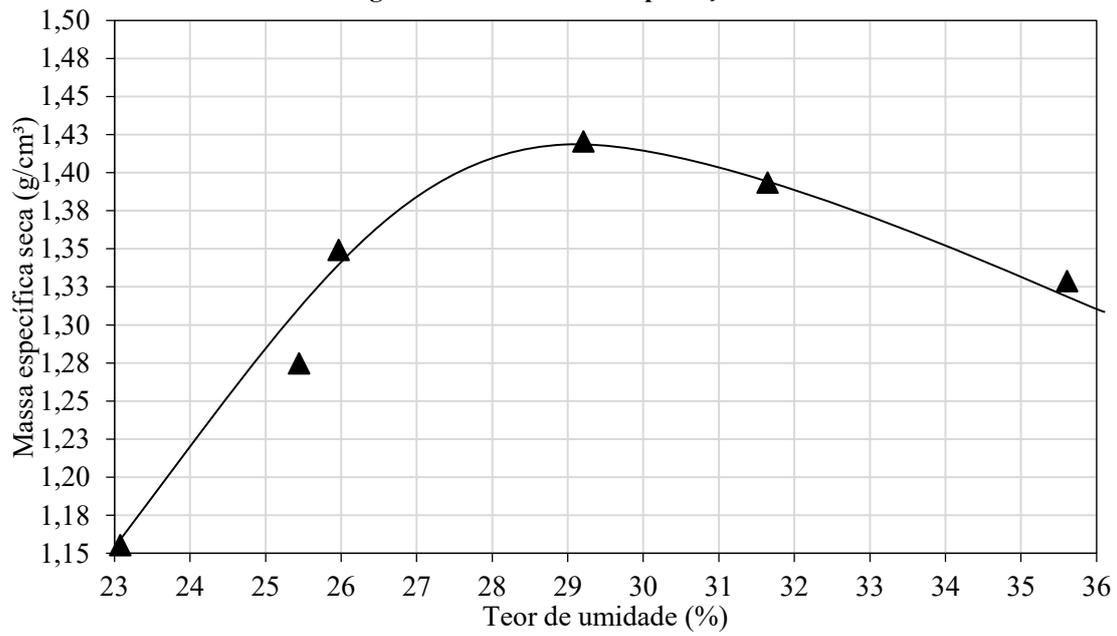
Pode-se notar que o solo atingiu sua massa específica aparente seca máxima em aproximadamente  $1,42 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima próxima de 28,8%. Com a inserção do agregado é notório uma mudança nas características do solo, já que seu teor de umidade ótima tende a reduzir para 25,3% e sua massa específica aumentar para  $1,55 \text{ g/cm}^3$ , o que se subentende que o agregado está preenchendo vazios existentes dentro a composição da mistura. Já na mistura de Solos- RCC-Cal, em comparação ao Solo-RCC, ocorreu a diminuição da massa específica seca máxima e o teor de umidade ótima aumentou devido a inserção de cal na sua composição.

**Quadro 6 – Parâmetros de Compactação**

Misturas	Teor de Umidade Ótimo (%)	Massa específica seca máxima ( $\text{g/cm}^3$ )
Solo	28,8	1,42
Solo-RCC	25,3	1,55
Solo-Cal-RCC	27,8	1,50

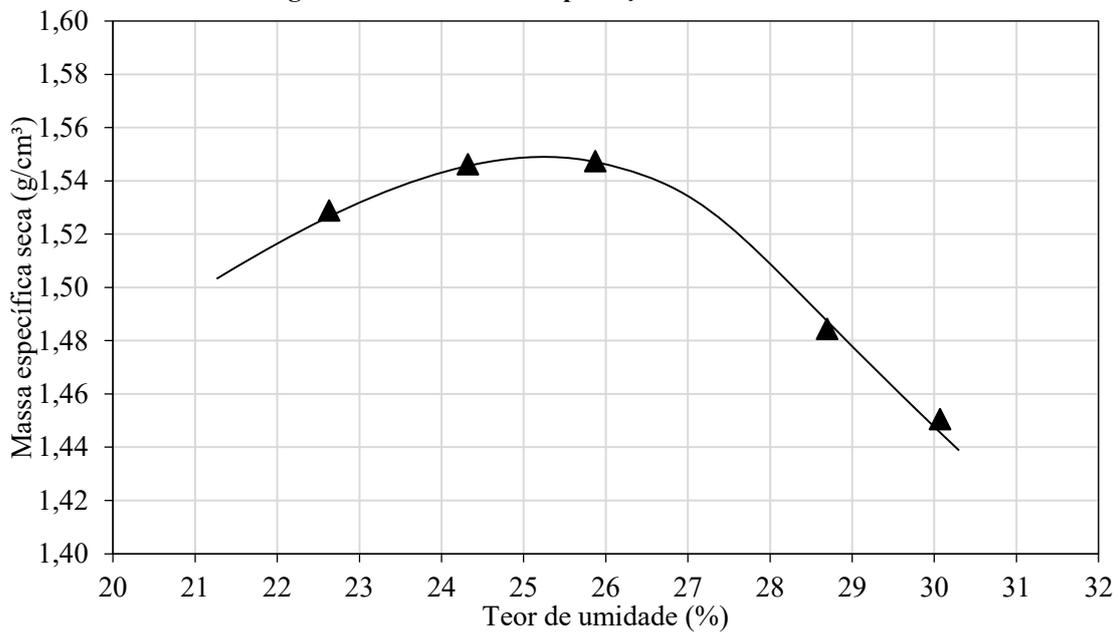
Fonte: Aatoria própria (2023)

Figura 17 – Curva de compactação do Solo



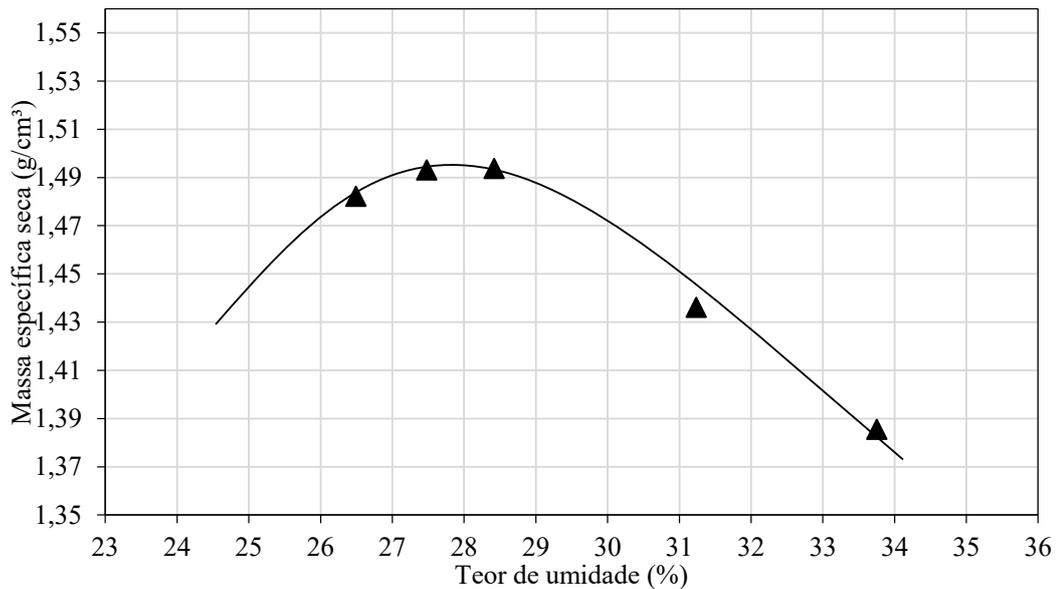
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 18 – Curva de compactação da mistura Solo-RCC



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 19 – Curva de compactação da mistura Solo-Cal-RCC**



Fonte: Autoria própria (2023)

## 6.6 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 são apresentados os resultados de compressão simples nos intervalos de 3, 7, 28 dias, bem como parâmetros complementares. Os símbolos I/N indicam se o corpo de prova passou pela fase de imersão ou não. Já P1 e P2 indicam a o peso do corpo de prova, sendo P1 antes da imersão e P2 após a imersão. Abs. é uma abreviação de absorção que os CP's sofreram após a imersão. O  $\Phi$  e o h representam as dimensões corpo, sendo o diâmetro  $\Phi$  e h a altura.

**Tabela 4 – Resultados dos testes de Resistência a compressão simples no intervalo de 3 dias**

Material (3 dias)	I/N	P1 (g)	P2 (g)	Abs. (g)	$\Phi$ (mm)	h (cm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kN)	Tensão (kPa)	Média (kPa)
Solo	I	1842	1901	59	99,7	12,7	7806,93	0,4	51,2	64,1
	I	1854	1911	57	99,6	12,8	7791,28	0,6	77,0	
	N	1896	1896	-	99,7	12,7	7806,93	0,6	76,8	
Solo-RCC	I	1950	2016	66	99,7	12,9	7806,93	0,6	77,0	64,2
	I	1918	1961	43	99,6	12,5	7791,28	0,4	51,4	
	N	1940	1940	-	99,7	12,9	7806,93	0,4	51,2	
Solo-Cal-RCC	I	1880	1992	112	99,7	12,9	7806,93	0,7	89,7	83,3
	I	1894	1959	65	99,7	12,5	7806,93	0,6	76,8	
	N	1974	1974	-	99,7		7806,93	0,6	76,8	

Fonte: Autoria própria (2023)

Após o rompimento dos CP's de 3 dias, percebe-se que os resultados não atingiram valores elevados e mantiveram uma uniformidade de valores. Isso possivelmente se deve as reações pozolânicas dentro das misturas não tiveram tempo suficientes para ocorrer.

Foi observado que a resistência do solo tem uma variação pequena quando inserido o RCC em sua composição, sendo assim, a inserção do agregado não produz prejuízos no seu comportamento mecânico da mistura.

Após o intervalo de 7 dias, os CP's já apresentaram resultados mais elevados quanto ao seu estado seco nas misturas de Solo-RCC e Solo-Cal-RCC chegando a quase triplicar o seu valor de RCS. Já no seu estado saturado ele permaneceu com os parâmetros semelhantes aos do rompimento de intervalo de 3 dias.

**Tabela 5 - Resultados dos testes de Resistência a compressão simples no intervalo de 7 dias**

Material (7 dias)	I/N	P1 (g)	P2 (g)	Abs. (g)	$\Phi$ (mm)	h (cm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kN)	Tensão (kPa)	Média (kPa)
Solo	I	1892	1968	76	99,6	12,7	7791,28	0,4	51,2	64,1
	I	1904	1954	50	99,5	12,8	7775,64	0,6	77,0	
	N	1910	1910	-	99,7	12,7	7806,93	0,6	76,8	
Solo-RCC	I	1965	2040	75	99,6	12,8	7791,28	0,6	77,0	64,2
	I	1961	2034	73	99,5	12,7	7775,64	0,4	51,4	
	N	1957	1957	-	99,7	12,5	7806,93	0,4	51,2	
Solo-Cal-RCC	I	1852	1883	31	99,5	13,9	7775,64	0,6	77,1	96,3
	I	1868	1964	96	99,6	13	7791,28	0,9	115,5	
	N	1909	1909	-	99,7	12,8	7806,93	1,6	204,9	

**Fonte: Fonte: Autoria própria (2023)**

Já com o intervalo de 28 dias observou-se que os parâmetros de RCS permaneceram semelhantes em todas as misturas quando comparadas aos de intervalo de 7, indicando que o tempo mínimo necessário para ocorrer as reações foi com o intervalo de 7 dias e depois tende a permanecer uniforme na questão de resistência.

**Tabela 6 - Resultados dos testes de resistência a compressão simples no intervalo de 28 dias**

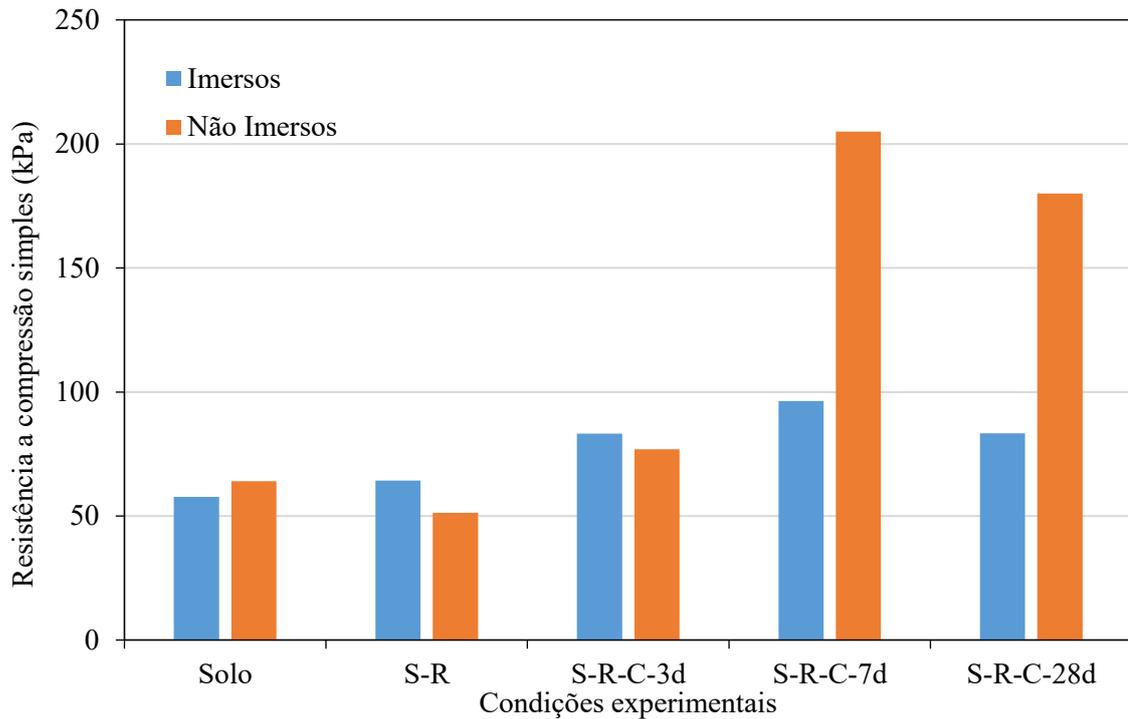
Material (28 dias)	I/N	P1 (g)	P2 (g)	Abs. (g)	$\Phi$ (mm)	h (cm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kN)	Tensão (kPa)	Média (kPa)
Solo	I	1942	1970	28	99,7	12,8	7806,93	0,4	51,2	64,1
	I	1954	1997	43	99,6	12,8	7791,28	0,6	77,0	
	N	1944	1944	-	99,7	12,7	7806,93	0,6	76,8	76,8
Solo-RCC	I	2000	2081	81	99,6	12,9	7791,28	0,6	77,0	64,2
	I	2004	2075	71	99,5	12,8	7775,64	0,4	51,4	
	N	1974	1974	-	99,7	12,7	7806,93	0,4	51,2	51,2
Solo-Cal-RCC	I	1844	1960	116	99,6	12,7	7791,28	0,6	77,0	83,3
	I	1842	1980	138	99,7	12,9	7806,93	0,7	89,7	
	N	1884	1884	-	99,5	12,8	7775,64	1,2	154,3	154,3

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Com isso foi possível compreender o comportamento do solo, onde fica explícito que o tempo de cura é um fator chave na resistência, em que nos 3 primeiros dias a resistência não varia. Quando se compara com a tempo de cura de 3 para 7 dias, é notório que crescimento da resistência do solo não imerso e um crescimento baixo em relação a sua forma saturada. Já os CP's de 28 dias apresentam um decréscimo de resistência quando comparado aos de intervalo de 7 dias, indicando que as reações ocorreram nos primeiros sete dias de cura, resultado comum para misturas com inserção de cal, onde a resistência a compressão simples tende a cair após atingir o ponto máximo de resistência da mistura (Figura 20). Vale ressaltar que esses resultados são corroborados pelo comportamento observado na dosagem pelo método do pH.

A fim de facilitar a visualização dos resultados descritos anteriormente, foi elaborada a Figura 20.

**Figura 20 – RCS em função do material e tempo de cura.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Observa-se que no primeiro intervalo de tempo não houve acréscimos significantes na resistência à compressão simples da mistura, o qual ocorreu para o intervalo de 7 dias. Com isso, fica claro que no primeiro intervalo não teve um tempo de cura suficiente para que as reações pudessem ocorrer e fazer com que a mistura atingisse sua eficiência máxima. Já aos 28 dias, nota-se um sutil decréscimo de resistência em relação ao intervalo de 7 dias, característico de estabilização com cal, em que a resistência tende a permanecer constante ao longo do tempo.

## 7 CONCLUSÃO

No presente estudo, foram abordadas as características do solo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Campo Mourão. A partir dos resultados dos ensaios realizados neste trabalho, observou-se que:

- o RCC apresentou uma massa específica baixa e uma classificação granulométrica como agregado graúdo;
- os resultados obtidos pelo método do pH não atingiram o valor normatizado de pH de 12,4, visto que a presença de elevados teores de ferro e alumínio na composição do solo afetou as reações químicas;
- no que diz respeito a ensaio de compactação, os resultados mostraram que a inserção de agregado diretamente no solo provoca aumento na massa específica seca máxima e redução do teor de umidade ótima da mistura. Entretanto, quando a cal é inserida na mistura, ela causa efeito reverso em relação a mistura solo-RCC, pois provoca a diminuição da massa específica seca máxima e aumenta o teor de umidade ótima, em decorrência da menor densidade da cal e maior área superficial para ser hidratada;
- em face dos resultados relacionados a compressão simples, foi notório que o tempo de cura é fator fundamental para atingir a máxima resistência das misturas, porém, é suficiente intervalo de 7 dias para que atinja o valor máximo de RCS, já que os valores de resistência para o intervalo de 28 dias demonstraram-se próximos aos obtidos para 7 dias de cura.

### 7.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir do que foi observado ao longo do trabalho, se sugere para trabalhos futuros a:

- inserção de agregado reciclado miúdo em forma de areia para a verificar o efeito do tamanho do agregado em relação a resistência a compressão simples;
- utilização de outro agente de estabilização, como o cimento, juntamente com a mesma porcentagem de RCC, a fins de comparação de resultados.

## REFERÊNCIAS

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Relatório de geração de resíduos**, 2015. Disponível em: <https://abrecon.org.br/leis-e-normas>. Acesso em: 04 jun. 2023.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Associação voltada à ampliação do desenvolvimento e fortalecimento do mercado de gestão de resíduos. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2022. 04 jun. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2022/>. Acesso em: 04 jun. 2023.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Associação voltada à ampliação do desenvolvimento e fortalecimento do mercado de gestão de resíduos. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2021. 04 jun. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 04 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12024**: solo: cimento: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: solo: cimento: ensaio de compressão simples de corpos de corpo cilíndrico: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15113**: resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: aterros: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15114**: resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15115**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: cal hidratada para argamassas: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

HOLANDA, S. H. B. *et al.* Avaliação da influência do glicerol sobre a geração de biogás de resíduos sólidos urbanos através do teste BMP. **Brazilian Journal Development**, São José dos Pinhais, v.7, n. 5, p. 44257-44267. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/29216/23036>. Acesso em: 04 jun. 2023.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BATELO, L. C. E. **Estudo das características físicas de um solo de campo mourão por meio de ensaios de laboratório.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

BRANDÃO, F. F. **Caracterização de resíduos sólidos da construção civil para a utilização em camadas drenantes de aterros sanitários.** 2011. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, n. 6, p 425-438, set. 2017.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

**Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA, 2002. RESOLUÇÃO CONAMA nº 307**, de 5 de julho de 2002. Seção 1, páginas 95-96.

CREMASCO, L. V. **Utilização de RCC em misturas de solo-cimento para pavimentação.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 7. ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2011.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT/Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2006.

FERREIRA, J. W. S. **Comportamento mecânico de misturas solo-cimento para aplicação em pavimento.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

FILHO, M.; LEITE, C. **Introdução à geologia de engenharia.** 2. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 1997.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Aumento da geração de resíduos no ano de 2022. **Produto Interno Bruto (PIB).** 1 set. 2022. Disponível em:

<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/34748-pib-cresce-1-2-no-2-trimestre-de-2022>. Acesso em: 04 jun. 2023.

MENDES, L. N. **Efeito da adição de pó de pet em um solo argiloso para aplicação em pavimentação**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2023.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, É. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan/mar. 2009.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado de Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SINIR - Sistema Nacional de Informação sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos**. 10 ago. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 04 jun. 2023.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SOUSA, P. M. L. P. **Limite de liquidez – correlações e comparações entre os métodos de fall cone e da concha de casagrande**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SOUZA, J. D. J. **O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SUAVE, L. **Avaliação dos agregados de resíduos da construção civil em matriz geopolimérica visando aplicação em pisos intertravados**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

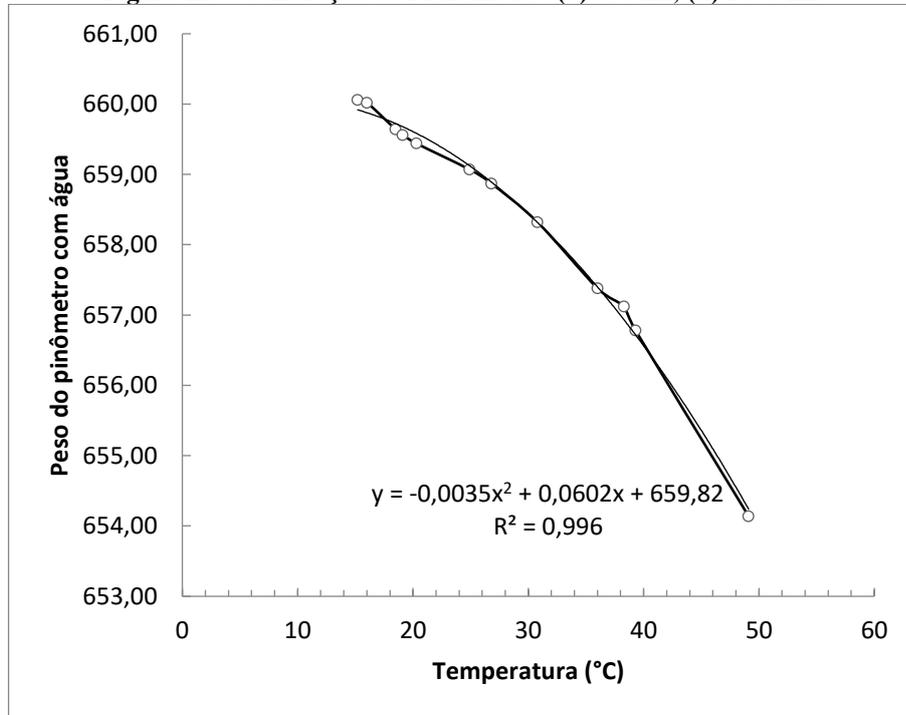
TEIXEIRA, W. **Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCC para uso em pavimentos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

USBR – U.S. Department of the Interior – Bureau of Reclamation. **Earth Manual**. 3. ed. Denver: Bureau of Reclamation, 1998.

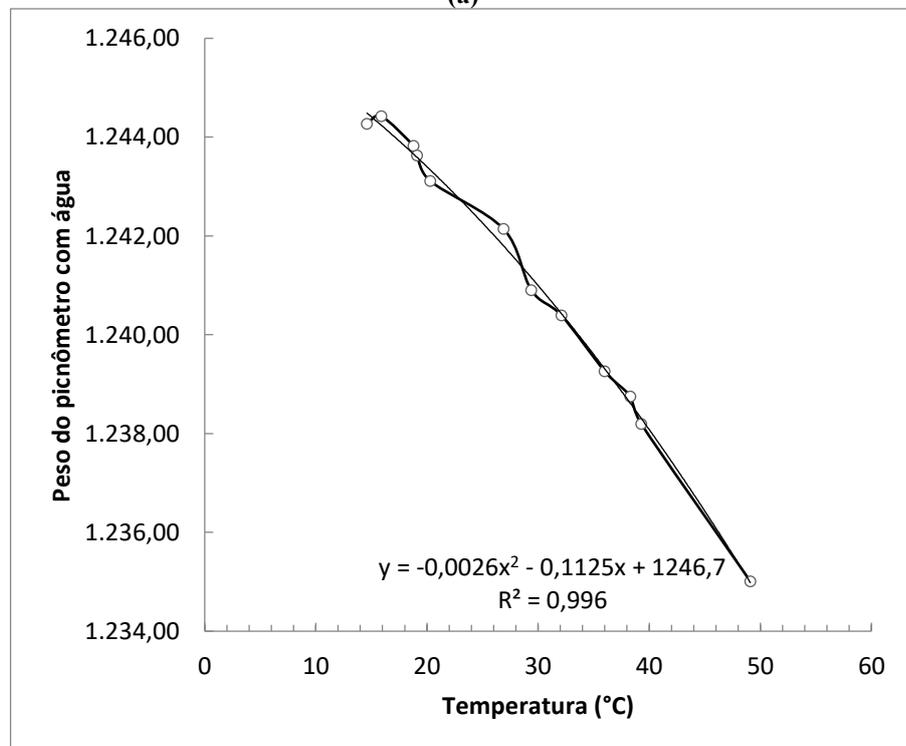
## APÊNDICE A – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

Nesse Apêndice é mostrado a curva de calibração do picnômetro utilizado no ensaio de massa específica dos sólidos (Figura 21).

Figura 21 – Calibração do Picnômetro: (a) 500 ml; (b) 1000 ml.



(a)



(b)

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos da UTFPR-CM (2023)