

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JÉSSICA FILIPE BRISKIEVICZ**

**VALORIZAÇÃO DE AGREGADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA  
CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS ARGILOSOS PARA PRODUÇÃO  
DE SOLO-CIMENTO**

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2022**

**JÉSSICA FILIPE BRISKIEVICZ**

**VALORIZAÇÃO DE AGREGADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA  
CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLOS ARGILOSOS PARA PRODUÇÃO  
DE SOLO-CIMENTO**

**Valorization of construction waste aggregate in the granulometric correction of  
clay soils for soil-cement production**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre em 2022 da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Dr(a). Fernanda Batista de Souza  
Coorientador: Dr(a). Caroline Angulski da Luz

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/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) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Francisco Beltrão



JESSICA FILIPE BRISKIEVICZ

**VALORIZAÇÃO DE AGREGADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA CORREÇÃO  
GRANULOMÉTRICA DE SOLOS ARGILOSOS PARA PRODUÇÃO DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental: Análise E Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 22 de Agosto de 2022

Dra. Fernanda Batista De Souza, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Michelle Milanez Franca, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Tiago De Moraes Faria Novais, Doutorado - Universidade do Estado de Minas Gerais (Uemg)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/08/2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Muitas pessoas fizeram parte dessa importante fase da minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão citadas nesse texto, mas sem dúvidas fizeram parte dessa etapa e terão sempre minha gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus.

A minha orientadora, Professora Doutora Fernanda Batista de Souza que sempre acreditou em mim e no tema, muito aberta ao diálogo e compreensiva, me orientando de forma exemplar com sabedoria e respeito nessa trajetória.

A minha coorientadora, que foi minha orientadora na graduação, Professora Doutora Caroline Angulski da Luz, desde aquele momento até o presente me orientou de forma exemplar com conhecimento e educação.

A empresa que recicla os resíduos de construção civil Renove por ter fornecido o material da pesquisa além dos dados e informações necessárias.

Ao Labsolos da UTFPR-PB por terem realizado o ensaio de análise granulométrica do solo.

A minha amiga Marina Myszak Biedacha, por ter ensinado e ajudado na execução do ensaio de compactação.

A técnica de laboratório Claudia Regina Bernardi, que é extremamente competente e prestativa.

Aos meus colegas de turma, por todas as trocas.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento aos meus pais e meu esposo.

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

## RESUMO

A construção civil é fundamental para o desenvolvimento humano, porém representa o setor de atividades humanas que mais utiliza recursos naturais, gera um elevado consumo energético e produz cerca de 50% dos resíduos sólidos gerados pela atividade humana. Como forma de reduzir os impactos ambientais do setor, a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) na fabricação de solo-cimento é uma excelente forma de incorporar no sistema produtivo os resíduos que na maioria das vezes seriam descartados irregularmente. A incorporação desses resíduos pode ser realizada na correção de solos argilosos para a fabricação de artefatos de solo-cimento. Nessa pesquisa foi utilizado o agregado reciclado misto (ARM) fornecido por uma usina recicladora com a granulometria de agregado miúdo. O solo e o ARM foram caracterizados, na sequência realizou-se o planejamento experimental fatorial de dois níveis completo com ponto central. As dosagens de ARM/solo foram 50% de solo e 50% de ARM, 37,5% de solo e 62,5% de ARM, e 30% de solo e 70% de ARM. O teor de cimento adicionado na mistura foi de 10%, 12% e 14%. Foi executado os ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Após os ensaios, os resultados foram avaliados estatisticamente. A única dosagem que não atingiu os limites de norma foi com 10% de cimento e a correção com 50% solo e 50% ARM teve resistência à compressão de 1,53MPa e absorção de água de 22%. O restante das dosagens enquadrou-se no mínimo indicado em norma, sendo a maior resistência à compressão de 3,4 MPa e absorção de água de 18,1% para a incorporação de 70% de ARM e 30% de solo e 14% de cimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** material de construção; rcd; resistência à compressão; absorção; sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Civil construction is fundamental for human development, but it represents the sector of natural human activities, generates high energy consumption and produces about 50% of solid waste generated by human activity. As a way of reducing the environmental impacts of the sector, the use of civil construction waste (CW) in the manufacture of soil-cement is an excellent way of incorporation into the production system, which are most often discarded irregularly. The incorporation of these residues can be performed in the correction of clayey soils for the manufacture of soil-cement products. In this research, CW used by a recycling plant with fine aggregate granulometry was used. Soil and CW were characterized, followed by the experimental factorial design of two complete levels with central point. The CW/soil dosages were 50% soil and 50% CW, 37.5% soil and 62.5% CW, and 30% soil and 70% CW. The cement content added to the mixture was 10%, 12% and 14%. Adhesion resistance and water absorption tests were performed. After the trials, the results were statistically proven. The only and exclusively one that does not respect the norm limits with 10% correction and 10% of cement soil of 50% CW had resistance to resistance of 1.53MPa and absorption of 22%. The remainder of the amount of water embedded for the incorporation of 3.4 MPa and absorption of minimum 18.1% of 70% of CW and 30% of soil and 14% of cement.

**KEYWORDS:** construction material; cw; compression resistance; absorption; sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Blocos de solo-cimento .....	24
Figura 2 - Prensa manual de solo-cimento .....	25
Figura 3 - Fôrma para compactação de blocos de solo-cimento .....	25
Figura 4 - Parede monolítica esquema .....	26
Figura 5 - Fôrmas para parede monolítica de solo-cimento .....	26
Figura 6 - Solo-cimento como revestimento de barragens .....	27
Figura 7 - Solo-cimento paralelo ao talude .....	27
Figura 8 - Representação gráfica dos pavimentos rígidos e flexíveis .....	28
Figura 9 - Solo-cimento na pavimentação .....	28
Figura 10 - Tijolos de solo-cimento .....	30
Figura 11 - Blocos de solo-cimento .....	30
Figura 12 - Cilindro de <i>Proctor</i> .....	33
Figura 13 - Novo procedimento para compactação de CP de solo-cimento .....	41
Figura 14 – Representação da quantidade de empresas em relação ao porte ..	50
Figura 15 - Mapa mental materiais e métodos .....	52
Figura 16 – Coleta do ARM de RCD .....	54
Figura 17 - Gráfico da análise granulométrica dos ARM .....	54
Figura 18 – Localização do ponto de coleta do solo .....	56
Figura 19 - Solo secando ao ar .....	57
Figura 20 – Aparelho Casagrande e amostra de solo .....	59
Figura 21 - Amostra com o corte para o ensaio de Casagrande .....	59
Figura 22 – Ensaio do limite de plasticidade .....	60
Figura 23 - Limite de plasticidade .....	60
Figura 24 - Ensaio de LL para o solo corrigido com ARM de RCD .....	65
Figura 25 – Ensaio de compactação .....	69
Figura 26 – Mapa mental do ensaio do teor de umidade ótima .....	70
Figura 27 - Solo-cimento em preparação .....	71
Figura 28 – Compactação do solo-cimento .....	71
Figura 29 - Amostra compactada com o molde .....	71
Figura 30 - Corpo de prova cilíndrico de solo-cimento .....	72

Figura 31 - Amostra para determinação do teor de umidade após o ensaio de compactação .....	72
Figura 32 - Execução das amostras de solo-cimento .....	75
Figura 33 - Extrator de corpo de prova.....	75
Figura 34 - Amostras moldadas .....	76
Figura 35 - Câmara úmida adaptada.....	77
Figura 36 - Recipiente fechado para conservar umidade .....	77
Figura 37 - Ensaio de resistência à compressão.....	79
Figura 38 - Amostras de solo-cimento imersas em água .....	80
Figura 39 - Gráfico de Pareto: resistência à compressão.....	83
Figura 40 - Gráfico preditos versus observados: resistência à compressão ....	84
Figura 41 - Gráfico de superfície resposta: resistência à compressão .....	85
Figura 42 - Gráfico de Pareto: absorção de água .....	87
Figura 43 - Gráfico preditos versus observados: absorção de água.....	87
Figura 44 - Gráfico de superfície resposta: absorção de água .....	88
Figura 45 - Gráfico do ensaio de LL do solo: réplica 1 .....	109
Figura 46 - Gráfico do ensaio de LL do solo: réplica 2 .....	109
Figura 47 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 50/50: réplica 1 .....	110
Figura 48 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 50/50: réplica 2.....	111
Figura 49 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 30/70: réplica 1 .....	112
Figura 50 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 30/70: réplica 2.....	112
Figura 51 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 32,5/67,5: réplica 1 .....	113
Figura 52 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 32,5/67,5: réplica 2.....	113
Figura 53 – Curva de compactação 50/50 e 10% cimento (A).....	116
Figura 54 – Curva de compactação 30/70 e 10% cimento (B).....	117
Figura 55 – Curva de compactação dosagem 50/50 e 14% cimento (C) .....	118
Figura 56 - Curva de compactação dosagem 30/70 e 14% cimento (D).....	118
Figura 57 - Curva de compactação dosagem 37,5/62,5 e 12% cimento (E) .....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do solo conforme ASTM D 3282.....	19
Tabela 2 – Diâmetro dos grãos do solo.....	21
Tabela 3 - Composição granulométrica dos solos em Pato Branco/PR.....	21
Tabela 4 – Características do solo.....	21
Tabela 5 – Pesquisas com solo-cimento.....	44
Tabela 6 - Classificação dos Resíduos Sólidos.....	45
Tabela 7 - Classificação dos RCD.....	46
Tabela 8 – Porte da empresa em função do número de pessoas ocupadas x Ocupação do setor da construção civil.....	49
Tabela 9 – Características Físico-químicas do CP II - Z.....	55
Tabela 10 – Análise granulométrica do solo.....	61
Tabela 11 – Resumo caracterização do solo.....	62
Tabela 12 – Composição granulométrica do solo e do ARM.....	64
Tabela 13 – Composição de areia e silte mais argila do solo corrigido com ARM .....	65
Tabela 14 – Limite de liquidez e índice de plasticidade do solo corrigido.....	66
Tabela 15 – Resumo caracterização do solo corrigido com ARM.....	66
Tabela 16 - Dosagem de Cimento Portland em massa.....	67
Tabela 17 – Dosagens escolhidas.....	67
Tabela 18 – Dosagens geradas.....	67
Tabela 19 – Delineamento experimental: Resistência à compressão.....	68
Tabela 20 – Delineamento experimental: Absorção de água.....	68
Tabela 21 – Dosagens teor de umidade.....	69
Tabela 22 – Teor de umidade ótima.....	73
Tabela 23 – Dosagens executadas.....	74
Tabela 24 – Correção para dosagem de cimento 10% e solo 90%.....	74
Tabela 25 – Correção para dosagem de cimento 14% e solo 86%.....	74
Tabela 26 – Correção para dosagem de cimento 12% e solo 88%.....	75
Tabela 27 – Teor de umidade de compactação.....	77
Tabela 28 – Delineamento experimental: Resistência à compressão.....	82
Tabela 29 – ANOVA: Resistência à compressão.....	83

Tabela 30 – Delineamento experimental: Absorção de água .....	86
Tabela 31 – ANOVA: Absorção de água .....	86
Tabela 32 – Resultados médias para resistência à compressão e absorção de água .....	89
Tabela 33 – Concentração de areia e argila+silte para a composição de 50% de solo e 50% ARM.....	106
Tabela 34 – Concentração de areia e argila+silte para a composição de 37,5% de solo e 62,5% ARM.....	106
Tabela 35 – Concentração de areia e argila+silte para a composição de 30% de solo e 70% ARM.....	106
Tabela 36 – Material passante para a composição de 50% de solo e 50% ARM .....	106
Tabela 37 – Material passante para a composição de 37,5% de solo e 62,5% ARM .....	106
Tabela 38 – Material passante para a composição de 30% de solo e 70% ARM .....	106
Tabela 39 - Limite de liquidez do solo natural .....	109
Tabela 40 - Limite de plasticidade do solo natural .....	110
Tabela 41 - Limite de liquidez do solo corrigido relação 50/50 .....	110
Tabela 42 - Limite de plasticidade do solo corrigido 50/50 .....	111
Tabela 43 - Limite de liquidez do solo corrigido relação 30/70 .....	111
Tabela 44 - Limite de plasticidade do solo corrigido 30/70 .....	112
Tabela 45 - Limite de liquidez do solo corrigido relação 30/70 .....	113
Tabela 46 - Limite de plasticidade do solo corrigido 32,5/67,5 .....	114
Tabela 47 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 10% cimento (A).....	116
Tabela 48 – Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 10% cimento (B).....	116
Tabela 49 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 14% cimento (C).....	117
Tabela 50 - Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 14% cimento (D) .....	118
Tabela 51 - Teor de umidade ótima dosagem 37,5/62,5 e 12% cimento (E).....	119
Tabela 52 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 10% cimento (A).....	121
Tabela 53 – Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 10% cimento (B).....	121
Tabela 54 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 14% cimento (C).....	122
Tabela 55 – Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 14% cimento (D).....	122

**Tabela 56 – Teor de umidade ótima dosagem 37,5/62,5 e 12% cimento (E)..... 122**

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Dosagem 50% de Solo, 50% ARM e 10% Cimento
AA1	Dosagem A, Ensaio de Absorção de Água A e Amostra 1
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation</i>
	<i>Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARM	Agregado Reciclado Misto
AR1	Dosagem A, Ensaio de Resistência à Compressão R e Amostra 1
B	Dosagem 30% de Solo, 70% ARM e 10% Cimento
BS	<i>British Standards Institution</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BT	Boletim Técnico
C	Dosagem 50% de Solo, 50% ARM e 14% Cimento
cm	Centímetros
CP	Corpos de Prova
CP I	Comum
CP II	Composto
CP III	Alto-Forno
CP IV	Pozolânico
CW	<i>Construction Waste</i>
D	Dosagem 30% de Solo, 70% ARM e 14% Cimento
E	Dosagem 37,5% de Solo, 62,5% ARM e 12% Cimento
ET	Estudo Técnico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
PVC	Policloreto de Vinil
PP	Polipropileno
RCD	Resíduos de Construção e Demolição

MPa	Mega Pascal
m	Metros
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	Milímetros
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais de construção</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>O solo-cimento</b> .....	<b>18</b>
3.2.1	Composição.....	18
<u>3.2.1.1</u>	<u>Solo</u> .....	<u>18</u>
<u>3.2.1.2</u>	<u>Cimento</u> .....	<u>22</u>
3.2.2	Dosagem .....	23
3.2.3	Aplicações do solo-cimento .....	24
3.2.4	Normas para produtos de solo-cimento.....	29
<u>3.2.4.1</u>	<u>Normas para tijolos e blocos de solo-cimento</u> .....	<u>30</u>
<u>3.2.4.2</u>	<u>Normas para amostras cilíndricas de solo-cimento</u> .....	<u>32</u>
3.2.5	Normas internacionais para solo-cimento .....	36
<b>3.3</b>	<b>Incorporação de materiais em solo-cimento</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Resíduos de construção civil</b> .....	<b>44</b>
<b>3.5</b>	<b>Potencial de geração de resíduos de construção civil</b> .....	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	<b>53</b>
4.1.1	Agregado de resíduos de construção civil .....	53
4.1.2	Cimento Portland.....	55
4.1.3	Solo .....	56
<u>4.1.3.1</u>	<u>Análise granulométrica</u> .....	<u>57</u>
<u>4.1.3.2</u>	<u>Limite de Liquidez</u> .....	<u>58</u>
<u>4.1.3.3</u>	<u>Limite de plasticidade</u> .....	<u>59</u>
<u>4.1.3.4</u>	<u>Resultados da caracterização do solo</u> .....	<u>60</u>
<b>4.2</b>	<b>Metodologia de dosagem</b> .....	<b>62</b>
4.2.1	Dosagem do solo corrigido com ARM de RCD.....	63
<u>4.2.1.1</u>	<u>Verificação das dosagens de solo corrigido com ARM</u> .....	<u>64</u>

4.2.2	Dosagem do cimento.....	66
4.4	<b>Teor de umidade ótima .....</b>	<b>69</b>
4.5	<b>Moldagem dos corpos de prova de solo-cimento .....</b>	<b>74</b>
4.6	<b>Ensaio de qualidade.....</b>	<b>78</b>
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>81</b>
5.1	<b>Resultados .....</b>	<b>81</b>
5.1.1	Resistência à compressão.....	81
5.1.2	Absorção de água .....	85
5.2	<b>Discussões.....</b>	<b>88</b>
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>95</b>
6.1	<b>Perspectiva para trabalhos futuros .....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE A - Concentrações de areia, silte e argila .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE B - Ensaio de limite de liquidez e plasticidade .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE C – Teor de umidade de compactação .....</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE D – Grau de compactação .....</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO A - Análise granulométrica do solo.....</b>	<b>123</b>
	<b>ANEXO B – Análise granulométrica rcd .....</b>	<b>125</b>
	<b>ANEXO C – Relatório de resistência à compressão.....</b>	<b>128</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil afeta o equilíbrio do meio ambiente em toda a cadeia produtiva, desde a extração de matéria-prima até a geração de resíduos sólidos ao final de uma obra. O grande impacto negativo do setor, tem estimulado novas pesquisas com a finalidade de desenvolver produtos e tecnologias menos danosas ao meio ambiente.

A incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) no processo construtivo auxilia na redução dos impactos ambientais. Uma opção para incorporar o RCD é na fabricação de novos materiais como, por exemplo, no solo-cimento.

O solo-cimento, mesmo sem a incorporação de RCD, é considerado um material ecológico se comparado aos tijolos convencionais (cerâmicos), os quais atingem as suas características de resistência e durabilidade após a queima do material em elevadas temperaturas. O solo-cimento, após a estabilização do solo com o aglomerante e a água, pode atingir propriedades similares aos blocos cerâmicos. Na maioria das vezes o aglomerante é o cimento Portland (CP), mas também pode ser utilizada a cal, dependendo das características do solo (DIVYA et al., 2017).

O solo argiloso, característico do município de Pato Branco, localizado na região sudoeste do Paraná, apresenta um teor elevado de argila e silte, os quais possuem uma granulometria muito fina, e uma quantidade insignificante de grãos de areia, que possui uma granulometria maior. A correção granulométrica se faz necessária, uma vez que a presença de grãos maiores possibilita uma economia de aglomerante na mistura de solo-cimento. Além disso, possibilita a redução da retração promovida pela argila, a qual acarreta deformação e fissuração da mistura durante a cura. Logo, se for empregado na correção um resíduo que seria descartado ao invés de utilizar a areia natural, que também é extraída da natureza, promove-se a sustentabilidade (LIMA; ALEXANDRE, 2006).

A correção dos solos argilosos para sua aplicabilidade no solo-cimento, abriu um leque de opções para a incorporação de materiais alternativos. Isso resulta na melhoria das características físicas e estéticas dos artefatos de solo-cimento, possibilitando a incorporação de resíduos não apenas para a correção dos solos, mas também para aumentar as propriedades desejadas mesmo quando o solo for arenoso. Além da correção de solos argilosos, outras pesquisas estão sendo desenvolvidas

para incorporação de materiais com a finalidade de melhorar as propriedades do material ou substituir total ou parcialmente o aglomerante utilizado.

Várias pesquisas foram desenvolvidas adicionando diferentes resíduos em blocos de solo-cimento, como por exemplo, resíduos de construção civil (SOUZA; SEGANTINI; PEREIRA, 2008), resíduos cerâmicos (SILVA et al., 2014), lodo de estação de tratamento de esgoto (SOARES et al., 2016), Polietileno Tereftalato (PET) (PASCHOALIN; STOROPOLI; DIAS, 2016), areia de fundição (BEUTLER, 2017), borracha de pneu (PEDROSA et al., 2017), entre outros.

Nesta pesquisa, buscou-se agregar conhecimento quanto ao potencial de correção de solos argilosos com agregado reciclado misto (ARM) de RCD na fabricação de solo-cimento. O potencial foi avaliado através do atendimento às normas vigentes de solo-cimento, quanto as propriedades de resistência à compressão e absorção de água, identificando os limites de substituição.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a valorização do agregado reciclado misto (ARM) de RCD na correção granulométrica de solos argilosos para a produção e solo-cimento.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterização do solo, agregado miúdo misto e da mistura solo-cimento por meio da determinação de limite de liquidez, índice de plasticidade, análise granulométrica e teor ideal da umidade de compactação;
- Identificar limites de incorporação de agregado miúdo de RCD no solo-cimento;
- Avaliar estatisticamente os resultados de resistência à compressão e absorção de água;
- Avaliar o atendimento da resistência à compressão e absorção de água em amostras de solo-cimento feitos com ARM, como material de correção de solos argilosos.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Materiais de construção

A indústria da construção civil, possui uma grande variedade de materiais para diversas finalidades, entre eles temos os materiais destinados à vedação, acabamento, estrutura, geotecnia, instalações hidráulicas e elétricas, segurança do trabalho, rodovias e meios de transporte em geral. Os materiais podem ser produzidos em diferentes processos, desde os obtidos diretamente da natureza ou industrialmente, simples ou compostos por uma ampla variedade de matérias-primas e apresentam inúmeras características (BAUER, 2019a).

Os materiais de construção segundo Bauer (2019a), são todos os corpos, objetos ou substâncias empregadas na construção civil e possuem inúmeras classificações. A classificação usualmente utilizada caracteriza os materiais sólidos em: metais (cobre, ligas de zinco, ligas de alumínio, aço etc); polímeros (madeira, policloreto de vinil (PVC), polipropileno (PP), produtos betuminosos, borrachas etc); compósitos (concreto); e cerâmicos (vidro, rochas, concreto, cerâmica, porcelana, refratários).

Dentre os materiais de construção já desenvolvidos, apesar de menos difundido, o solo-cimento é um dos mais antigos. Um dos primeiros dados históricos que se tem registro da utilização do solo estabilizado com um aglomerante, foi a 220 a.C. na construção da muralha da China, no qual utilizaram argila e cal na proporção de 3:7. Nesse mesmo período, já se utilizava o mesmo material em fundações e outros tipos de obras (BAUER, 2019b).

Existem diferentes conclusões quanto ao início da utilização do solo-cimento. Em 1800, no sul da Inglaterra foi empregado por um engenheiro chamado H. E. Brook-Bradley, que utilizou o material no leito de estradas e pistas para veículos movidos a tração animal. Nos Estados Unidos da América o engenheiro T. H. Amies utilizou e apresentou uma patente de solo-cimento por volta de 1917. Em 1915, o engenheiro Bert Reno empregou uma mistura composta de conchas marinhas, areia e cimento na pavimentação de uma rua. Em 1920 o solo-cimento foi patenteado, porém nenhum estudo foi implementado na época pela falta de conhecimento de Mecânica dos Solos. Em 1929, o engenheiro Ralph *Proctor* desenvolveu estudos na área de Mecânica dos

Solos, proporcionando o desenvolvimento do solo-cimento em diferentes tipos de construções, como: pavimentação, revestimento de canais, diques, reservatórios de água, estabilização de taludes, ladrilhos, tijolos, blocos, painéis e paredes monolíticas (BAUER, 2019b).

## **3.2 O solo-cimento**

O solo-cimento é composto por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água, pode ser adicionado na mistura um aditivo e/ou pigmento, desde que a quantidade adicionada do aditivo ou pigmento não interfira nas propriedades exigidas pelas normas pertinentes (ABNT, 2012a, 2012b).

A proporção de material que constituirá a mistura de solo-cimento, deverá ser composta por um aglomerante ou a combinação de dois (cimento e/ou cal), solo, agregado miúdo e água. A melhor proporção dos materiais na mistura deve ser definida através de um estudo do traço, que pode ser expresso em volume ou massa. Sendo a massa seca dos materiais a opção mais indicada para representação da quantidade de material a ser adicionada na mistura (ISAIA, 2011).

O emprego do solo-cimento se destaca principalmente em obras de pavimentação, porém a utilização no levantamento de alvenarias em edificações habitacionais de pequeno e médio porte tem se tornado uma ótima opção, seja através de paredes monolíticas ou na substituição de tijolos e blocos cerâmicos (BAUER, 2019b).

### **3.2.1 Composição**

#### **3.2.1.1 Solo**

A matéria-prima principal do solo-cimento é o solo. Por representar a maior dosagem da mistura, o solo é o material que apresenta a maior quantidade de requisitos. O solo precisa apresentar características que permita que o produto final atenda aos requisitos de qualidade e também que auxilie na utilização de uma menor quantidade de cimento, que não contenha matéria orgânica em quantidade que afete

a hidratação do cimento e estabilização do solo e que apresente boa trabalhabilidade em seu estado fresco (ABCP, 1998, 2000; ABNT, 2012c e d).

Conforme os boletins técnicos de solo-cimento da ABCP, os solos arenosos na maioria das vezes necessitam de menores quantidades de cimento se comparado aos solos argilosos e siltosos. Todavia, é necessário acrescentar uma pequena quantidade de argila na mistura para que o solo-cimento apresente coesão suficiente para manuseio em seu estado fresco, sem que o material sofra danos ou deformações. Além disso, a ABCP sugere que caso um determinado solo não atenda as características impostas nos boletins técnicos, dois ou mais solos podem ser misturados para resultar em um solo que se enquadre nas características especificadas (ABCP, 1998, 2000).

A NBR 11798 que apresenta os requisitos dos materiais a serem utilizados na execução de camadas de base de solo-cimento em pavimentos. O solo deve se enquadrar nas classificações A1, A2 e A4 conforme apresentada na Tabela 1, segundo a ASTM D 3282 e conter as características: passar 100% na peneira com abertura de malha 75mm; máximo de 30% de material retido na peneira com abertura de malha de 19mm; máximo de 40% de material retido na peneira com abertura de 4,75mm (ABNT, 2012d).

**Tabela 1 – Classificação do solo conforme ASTM D 3282**

Classificação geral		Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)						Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)
		A-1		A-2				A-4
Grupo		A-1-a	A-1-b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	
Peneiração: % que passa	Nº 10	50 máx						
	Nº 40	30 máx	50 máx					
	Nº 200	15 máx	25 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín
Características da fração que passa nº 40	LL (%)			40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx
	IP (%)	6%		10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	

**Fonte: Adaptado pela autora com base em ASTM (2016).**

Os ensaios indicados para caracterização do solo são: NBR 6457 que apresenta os métodos de preparação de amostras de solo para ensaios de compactação (ABNT, 2016a), NBR 6459 utilizada para determinação do limite de

liquidez (ABNT, 2016b), NBR 7180 indica os procedimentos para determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016c) e NBR 7181 que estabelece a metodologia para análise granulométrica (ABNT, 2018).

A composição granulométrica do solo varia entre areia, silte e argila. A literatura indica que o solo utilizado na produção de solo-cimento, deve conter o teor de areia variando entre 50 a 70 %, a fração de silte entre 10 a 20% e a fração de argila de 10% a 20% (MOTTA et al., 2014).

De acordo com o boletim técnico 117 da ABCP, os solos mais adequados devem apresentar uma quantidade de areia na faixa de 50 a 90% da massa total da mistura, e a fração de silte e argila variando entre 10 a 50%. Os solos arenosos são indicados por precisarem de uma quantidade menor de cimento para serem estabilizados (ABCP, 1996).

Outra característica importante, consta no estudo técnico 35 da ABCP que auxilia na definição do teor de cimento, para aplicação do método simplificado os solos precisam apresentar no máximo 50% de material com diâmetro equivalente inferior a 0,05 mm (porção de silte mais argila) e possuam no máximo 20% de material com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm (silte). Além de toda amostra passar na peneira 4,8 mm (ABCP, 2004).

Uma forma de classificação do material constituinte do solo é pelo diâmetro dos grãos: a areia deve apresentar grãos com diâmetro 0,05mm; o silte, grãos variando de 0,005 a 0,05mm; e a argila grãos com diâmetro menor que 0,005mm (CAPUTO, 1988).

Segundo o sistema brasileiro de classificação dos solos, a classificação do tamanho das partículas, a argila possui diâmetro menor que 0,002 mm, o silte diâmetro entre 0,002 e 0,05 mm, e a areia diâmetros entre 0,05 e 2 mm (SANTOS et al., 2018).

Levando em conta que a correção do solo pode ser feita pela granulometria, na Tabela 2 constam os diâmetros dos grãos que representam a areia, o silte e a argila. Considerando a classificação da NBR 6502 (ABNT, 2022), a fração de argila e silte do solo apresenta o diâmetro dos grãos menores que 0,06mm e a fração de areia possui o diâmetro variando de 2,0mm a 0,06mm.

**Tabela 2 – Diâmetro dos grãos do solo**

Material	Caputo (1988)	NBR 6502 (ABNT, 2022)
Areia	0,05mm	2,0mm a 0,06mm
Silte	0,05mm a 0,005mm	0,06mm a 0,002mm
Argila	<0,005mm	<0,002mm

Fonte: Adaptado pela autora com base em ABNT (2022); Caputo (1988).

Algumas composições granulométricas do solo de Pato Branco/PR são apresentadas na Tabela 3. Beutler (2017), Vieira (2017) e Briskievicz (2018) analisaram o solo próximo da UTFPR-PB e Cadorin, Mello, Montemezzo (2013) obtiveram as composições de três bairros diferentes. Observa-se que grande parte do solo de Pato Branco/PR é composto pela fração silte e argila, que possui o diâmetro dos grãos variando de 0,005mm até 0,05mm, o que torna inviável a sua utilização na fabricação de solo-cimento sem que ele passe por uma correção granulométrica, aumentando a fração de areia.

**Tabela 3 - Composição granulométrica dos solos em Pato Branco/PR**

Literatura	Composição			
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
(BEUTLER, 2017)	2,2	17,8	80,0	
(VIEIRA, 2017)	2,2	17,8	80,0	
(SILVA et al., 2010)	9,8	33,8	56,4	
(BRISKIEVICZ, 2018)	1,0	19,0	80,0	
Valores médios				
bairros (CADORIN;	La Salle	10,38	25,97	63,66
MELLO;	Aeroporto	9,08	24,62	66,65
MONTEMEZZO,	Centro	22,76	21,36	55,88
2013)				

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 4 – Características do solo**

Características	Literatura
Passante peneira 4,75mm (nº4)	100%
Passante peneira 0,075mm (nº200) conforme classificação do solo	A1, A2 ou A4
Limite de liquidez e índice de plasticidade conforme classificação do solo	A1, A2 ou A4
Argila + silte	10% a 50%
Areia	50% a 90%

Fonte: Adaptado pela autora com base em ABCP (1996), (ABCP, 2004) e ABNT (2012e).

Considerando as propriedades do solo para o uso em solo-cimento apresentados nas normas técnicas, boletins técnicos e pesquisas realizadas

anteriormente, a Tabela 4 apresenta de forma resumida um compilado das características desejáveis do solo.

### 3.2.1.2 Cimento

O processo de estabilização do solo ocorre com a utilização de um aglomerante hidráulico, como a cal, o cimento, as fibras vegetais e a emulsão asfáltica. Esse processo de estabilização melhora a resistência mecânica e o desempenho do solo-cimento na presença de água. Com o início das reações de hidratação do cimento, ocorrem mudanças na carga elétrica do solo presente na mistura, por meio de troca de cátions, gerando uma atração entre as partículas, unindo-as em partículas maiores e assim produzindo uma perda de plasticidade da mistura. O produto final é caracterizado pela formação de cadeias hexagonais, que isolam no seu interior, partículas mas que não chegam a ficar aglutinadas, impedido a dilatação pela sua impermeabilização (BAUER, 2019b).

Embora, muitas pesquisas indiquem que uma quantidade maior de cimento aumentaria a resistência do solo-cimento a longo prazo, esse acréscimo também aumentaria as chances do solo-cimento fissurar, além de elevar o custo do produto. Portanto, a dosagem de cimento na mistura geralmente é limitada de forma a garantir a resistência indicada nas normas (LINARES-UNAMUNZAGA et al., 2019).

A ABCP indica para a utilização em solo-cimento os cimentos Portland: Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV).

As exigências das normas de solo-cimento acerca do cimento Portland fazem menção ao atendimento do aglomerante às normas específicas conforme o tipo de cimento empregado e a água de amassamento deverá ser livre de impurezas nocivas as reações de hidratação do cimento, como matéria orgânica, algas, sólidos em suspensão, óleos e graxas, ácidos e sais, entre outros (ABNT, 2012c, 2012d; BAUER, 2019a).

### 3.2.2 Dosagem

As metodologias de dosagem são norteadas por normas técnicas desenvolvidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pelos boletins e estudos técnicos da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Uma dosagem adequada de cimento, mesmo em pequena quantidade, fornece ao solo-cimento, devidamente compactado e curado, alterações positivas nas características físicas como por exemplo na resistência mecânica. A dosagem do solo-cimento ocorre através de sucessivos ensaios realizados com uma determinada mistura de solo, cimento e água, avaliando os resultados obtidos com critérios previamente estabelecidos. O teor de cimento escolhido ao final, é resultante da avaliação de diferentes teores de cimento, com a finalidade de identificar a menor quantidade adicionada capaz de estabilizar o solo, atingindo as características necessárias para um determinado emprego do solo-cimento (ABCP, 2004).

O boletim técnico BT-117 da ABCP apresenta diferentes aplicações do solo-cimento, indicando as características dos materiais que compõem a mistura, a proporção do solo e cimento, formas de preparo e aplicações. Usualmente o solo-cimento é preparado com 6 a 12 partes de cimento para 100 partes de solo seco, em massa. Essa dosagem em volume, fica em média 1:12, ou seja, 1 medida em volume de cimento para 12 medidas em volume de solo. Porém, a quantidade de cimento a ser adicionada na mistura pode variar em função do tipo do solo empregado, sendo indicado o estudo técnico ET-35 para definir a dosagem de cimento em função das características do solo (ABCP, 1996).

De acordo o estudo técnico ET-35 da ABCP, a dosagem pode ser feita com a norma geral e com a norma simplificada. A norma simplificada de dosagem de solo-cimento, pode ser aplicada a solos que possuam no máximo 50% de material com diâmetro equivalente inferior a 0,05 mm (porção de silte mais argila) e possuam no máximo 20% de material com diâmetro equivalente inferior a 0,005 mm (argila). Se o material utilizado passar na peneira de 4,8 mm utiliza-se o método A, se não utiliza-se o método B (ABCP, 2004).

O método de dosagem simplificado se inicia com os ensaios preliminares do solo, determina-se a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima da mistura de solo e cimento através do ensaio de compactação do solo-cimento,

determinação da resistência à compressão de corpos de prova (CP) cilíndricos e a comparação entre as resistência média simples obtida nos corpos de prova e a resistência à compressão mínima admissível para o solo em estudo (ABCP, 2004).

A NBR 12253 de 2012 apresenta o procedimento de dosagem do solo-cimento para emprego como camada de pavimento de forma análoga ao estudo técnico 35 apresentado anteriormente. A norma sugere teor de cimento em função da classificação do solo para o ensaio de compactação com a finalidade de determinar o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima do solo-cimento. Na sequência, para a determinação do teor de cimento para o ensaio de compressão simples, a norma indica que deve ser utilizado no mínimo três teores de cimento, para determinar o que atenda de forma mais adequada a resistência mínima de 2,1MPa. A cura deve ser de no mínimo 7 dias e a moldagem deve seguir a NBR 12024 de 2012 (ABNT, 2012a).

### 3.2.3 Aplicações do solo-cimento

Mesmo que os tijolos de cerâmica sejam o material usualmente utilizado para o levantamento de paredes e alvenaria, há outros materiais utilizados para esse fim como, por exemplo os tijolos e blocos de solo-cimento apresentados na Figura 1 (BAUER, 2019a).



**Fonte: Briskievicz (2018).**

Uma das diferenças de um material para outro, é que a cerâmica atinge as suas características de resistência e durabilidade após a queima do material em elevadas temperaturas. Já o solo-cimento atinge as mesmas propriedades das cerâmicas, após a estabilização do solo com um aglomerante, que após a

incorporação de água na mistura, atua como um agente de ligação do material. Na maioria das vezes o aglomerante é o cimento Portland (CP), mas também pode ser utilizada a cal dependendo das características do solo (BAUER, 2019b; DIVYA et al., 2017).

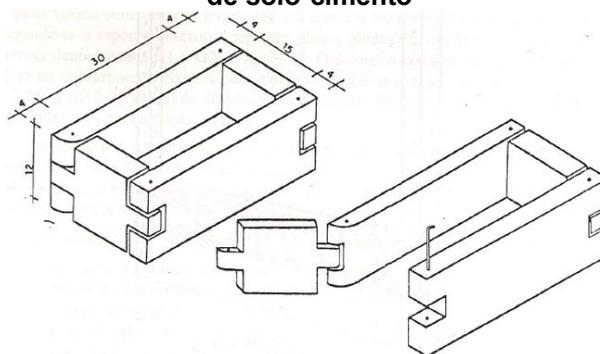
A utilização do solo como matéria-prima na construção civil requer alguns cuidados. Como já mencionado, ele precisa apresentar como característica a resistência à ação da água. Para auxiliar na durabilidade das construções feitas com solo-cimento, algumas medidas podem ser adotadas, como a proteção da parede exposta à água, redução da permeabilidade da parede aumentando a densidade do solo-cimento, adição de um agente impermeabilizante para tornar o solo-cimento repelente à água e a utilização de uma dosagem de cimento que não seja afetado pela água (DIVYA et al., 2017).

**Figura 2 - Prensa manual de solo-cimento**



Fonte: Briskievicz (2018).

**Figura 3 - Fôrma para compactação de blocos de solo-cimento**



Fonte: Bauer (2008).

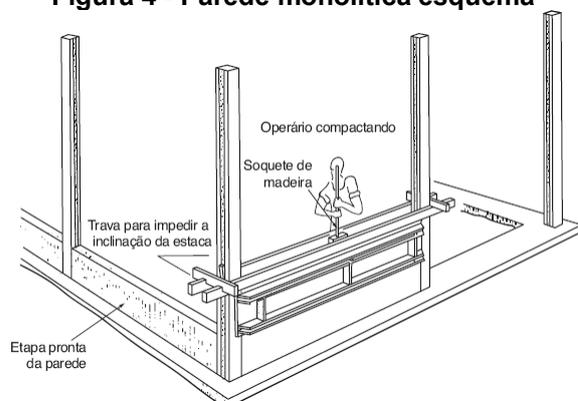
A facilidade na obtenção da matéria-prima (solo, aglomerante e água), mistura e moldagem por prensas hidráulicas ou manuais, torna o bloco de solo-cimento uma excelente escolha como substituição do tijolo convencional feito de cerâmica. Outra vantagem é que pode ser preparado no próprio canteiro de obras, não necessitando do transporte do material. E também, pode ser compactado sem prensa industrial, através de uma prensa manual como a Figura 2 ou então, de forma mais simples com uma fôrma de madeira exemplificada na Figura 3, para a moldagem nessas fôrmas mais simples são aplicados golpes sucessivos com um soquete, permitindo a

fabricação de tijolos maciços de solo-cimento em regime de mutirão (PASCHOALIN; STOROPOLI; DIAS, 2016).

Embora seja executável a moldagem e cura dos tijolos no próprio canteiro de obras, essa prática não é indicada sem orientação e supervisão de um responsável técnico, uma vez que os blocos são utilizados para construção de edificações os quais exigem padrões de qualidade, para garantir as propriedades de estanqueidade e resistência nas edificações.

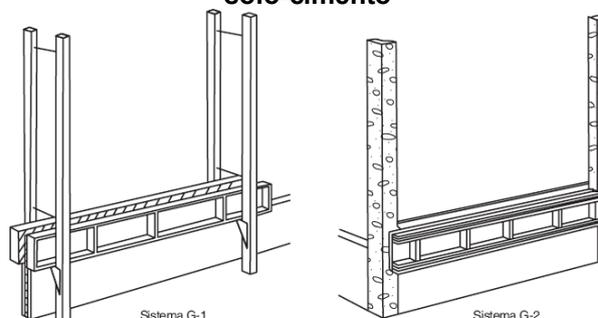
Além dos tijolos e blocos, o solo-cimento é empregado em outros tipos de materiais, como por exemplo, em paredes monolíticas como exemplificada na Figura 4. A execução das paredes monolíticas se inicia com construção de um painel com duas guias onde são fixadas as fôrmas ilustradas na Figura 5. No espaço delimitado entre as fôrmas e guias, é compactado a mistura de solo-cimento em camadas com altura igual ou inferior a 20 centímetros. A desmoldagem é feita logo após a compactação, e as camadas são feitas sucessivamente até completarem a altura desejada da parede (ABCP, 1998).

**Figura 4 - Parede monolítica esquema**



**Fonte: Bauer (2019b)**

**Figura 5 - Fôrmas para parede monolítica de solo-cimento**



**Fonte: Bauer (2019b).**

As paredes monolíticas têm a execução mais complexa, pois dependem de fôrmas que devem ser montadas conforme a parede é executada em camadas sucessivas. Essas fôrmas precisam ser adequadamente rígidas para suportar os esforços de compactação, sem que ocorram mudanças nas dimensões e nem rompam durante o levantamento das paredes. Como as paredes são erguidas em camadas sequências, a camada inferior precisa garantir o suporte para a camada superior (BAUER, 2019b).

Embora seja de difícil execução, apresentam como vantagens a utilização do solo do próprio local da obra, deixa um acabamento liso na parede e desde que

possua uma proteção da ação direta da água dispensa a utilização de revestimentos e por fim, não necessita de mão de obra especializada (ABCP, 1998).

Outra utilização do solo-cimento é em obras de engenharia hidráulica, onde o uso do solo-cimento como uma camada de revestimento ou proteção em barragens de terra, diques e reservatórios, contribui para a redução da erosão causada na superfície exposta à água e outros agentes externos com potencial erosivo. O emprego do solo-cimento proporciona uma melhoria na estabilidade das barragens, diques e reservatórios, somando à estrutura características como impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos, coesão e baixa erodibilidade (PITTA, 2000).

Segundo Richards e Hadley (2006), o solo-cimento é uma excelente escolha se tratando de eficiência e economia na estabilização de taludes como proteção de margens de córregos, encostas, revestimentos de canais e lagoas e estruturas de controle no nível d'água. A aplicação do solo-cimento, depende da severidade do meio. Em locais onde a estrutura está exposta a ação de ondas moderadas a severas ou onde ocorre a passagem de detritos em fluxo rápido indica-se a utilização do solo-cimento em camadas horizontais e sucessivas adjacentes à encosta como indicado na Figura 6. Já em locais considerados menos severos como em reservatórios pequenos, valas e lagoas a proteção com o solo-cimento pode ser colocada paralela a face do talude representado na Figura 7.

**Figura 6 - Solo-cimento como revestimento de barragens**



Fonte: Richards e Hadley (2006).

**Figura 7 - Solo-cimento paralelo ao talude**

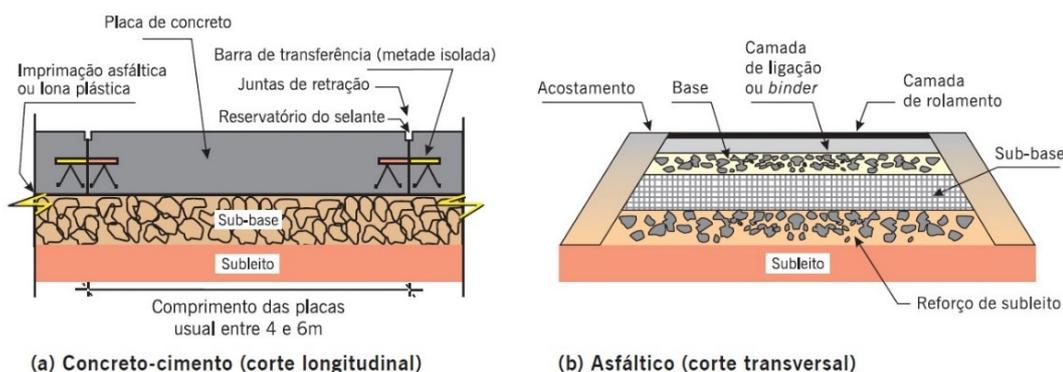


Fonte: Richards e Hadley (2006).

Outra opção na área da construção civil que pode ser utilizado o solo-cimento é na pavimentação de estradas. O pavimento é uma estrutura composta de múltiplas camadas de diferentes espessuras. São classificados tradicionalmente como rígidos (pavimento de concreto) e flexíveis (pavimento asfáltico). Os pavimentos rígidos ou de concreto (a esquerda da Figura 8) são compostos por uma placa de concreto

(podendo ser armadas ou não com barras de aço), uma sub-base e por fim o subleito. Os pavimentos flexíveis ou asfáltico (a direita da Figura 8), são compostos por uma camada de revestimento asfáltico (camada de rolamento e/ou camadas de ligação), base, sub-base, reforço do subleito e o subleito (BERNUCCI et al., 2006).

**Figura 8 - Representação gráfica dos pavimentos rígidos e flexíveis**



Fonte: Bernucci et al. (2006).

**Figura 9 - Solo-cimento na pavimentação**



Fonte: Bernucci et al. (2006).

O solo-cimento na pavimentação é classificado como um material cimentado pois é constituído pelo solo que recebe a adição de cimento, cal ou outro aditivo, fornecendo à mistura rigidez e aumentando a resistência à compressão. Outros materiais considerados cimentados são a brita graduada tratada com cimento, solo-cal, solo-cal-cimento e concreto rolado. O solo-cimento pode ser empregado nas camadas de base indicado pela flexa na Figura 9, sub-base e reforço de subleito, sendo que na base tem se mostrado muito resistente e durável desde que tenha sido adequadamente dosado e compactado (BERNUCCI et al., 2006).

A ampla empregabilidade do solo-cimento é uma consequência das características do material, antes da cura ele apresenta uma boa resistência inicial, suficiente para conseguir remove-lo de molde e manuseá-lo. E após a cura, apresenta resistência mecânica, resistência a intempéries, pouca absorção de água, excelente isolante térmico e acústico, e também é um material não combustível. Essas características são os fatores que definem a sua durabilidade (BAUER, 2019b; DIVYA *et al.*, 2017).

### 3.2.4 Normas para produtos de solo-cimento

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) dispõe de várias normas para a produção de solo-cimento, dependendo da sua finalidade. A NBR 8491 (ABNT, 2012b) e 8492 (ABNT, 2012e) trata dos tijolos, a NBR 10834 (ABNT, 2012f) e 10836 (ABNT, 2013a) apresenta as definições para blocos. A NBR 10833 (ABNT, 2012c) padroniza os requisitos gerais e específicos para os tijolos e blocos de solo-cimento.

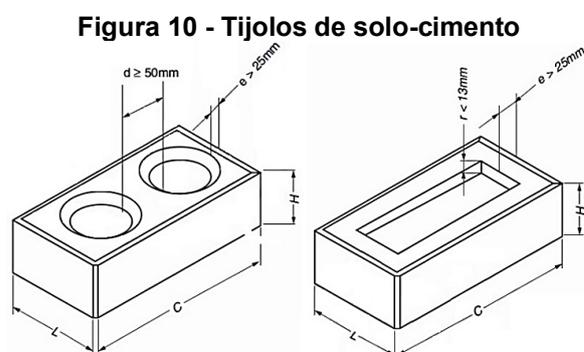
As normas que tratam dos requisitos e procedimentos do solo-cimento em geral, sem ser tijolos e blocos, são: NBR 12023 (ABNT, 2012g) apresenta o ensaio de compactação; NBR 12024 (ABNT, 2012h) a moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos; NBR 12025 (ABNT, 2012i) ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos; NBR 13554 (ABNT, 2012j) ensaios de durabilidade por molhagem e secagem; NBR 13555 (ABNT, 2013b) ensaio de absorção de água e; NBR 16174 (ABNT, 2013c) determinação do teor de cimento em misturas fresca de solo-cimento.

A NBR 12253 (ABNT, 2012a) e a NBR 12023 (ABNT, 2012g) definem o solo-cimento como um produto endurecido resultante da cura de uma mistura compactada de solo, cimento e água, em proporções definidas através da dosagem. A NBR 8491 (ABNT, 2012b) define como tijolo de solo-cimento uma unidade de alvenaria, constituído por uma mistura homogênea, compacta e endurecida de solo, cimento Portland e água. Pode conter aditivos e pigmentos em proporções que não interfiram nos requisitos da norma.

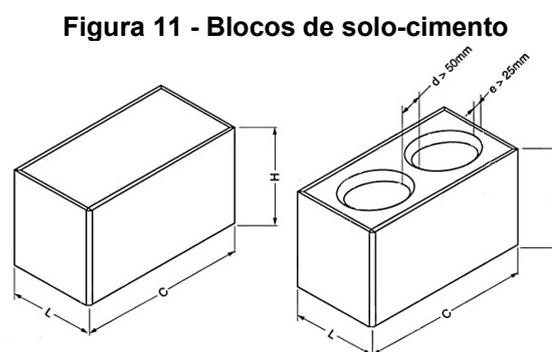
### 3.2.4.1 Normas para tijolos e blocos de solo-cimento

A definição de bloco de solo-cimento, conforme a NBR 10834 (ABNT, 2012f), é um componente da alvenaria, constituído por uma mistura homogênea, compacta e endurecida de solo, cimento Portland e água. Também pode conter aditivos e pigmentos, desde que a proporção utilizada ainda permita o atendimento das exigências da norma. Outro requisito, é que a altura dos blocos seja superior à sua largura.

Tanto os blocos como os tijolos podem ser maciços ou vazados. Os maciços são aqueles onde o volume seja igual ou superior a 85% do seu volume total aparente, podendo ter reentrâncias em uma das faces maiores. Os tijolos e blocos vazados, devem apresentar furos verticais, do qual o volume total seja inferior a 85% do volume total aparente. Os requisitos para espessura dos septos e paredes laterais variam entre os tijolos e blocos. Para os tijolos, a espessura mínima das paredes laterais deve ser de 25mm e dos septos de 50mm. Para os Blocos a espessura das paredes laterais e dos septos deve ser de no mínimo 25mm (ABNT, 2013g, 2013b).



Fonte: ABNT (2012a).



Fonte: ABNT (2012d).

De acordo com a norma NBR 8491 (ABNT, 2012b), os tijolos exemplificados na Figura 10, são classificados de acordo com as dimensões (comprimento, largura e altura) em tipo A (200x100x50) e B (240x120x70) em milímetros. Os blocos representados na Figura 11, conforme a NBR 10834 (ABNT, 2012f), devem ter o comprimento de 300 mm (maior dimensão da face de assentamento), largura de 150 mm (menor dimensão da face de assentamento) e altura de 150 mm (distância entre as faces de assentamento). Podem ter outras dimensões, desde que a altura permaneça igual ou superior à sua largura.

O que difere os tijolos dos blocos de solo-cimento, conforme as normas técnicas NBR 8491 (ABNT, 2012b) e NBR 10834 (ABNT, 2012f), é o tamanho. Essa definição acontece de forma similar aos tijolos e blocos cerâmicos, conforme especificado pela NBR 15270 (ABNT, 2017), se a altura for maior que 115mm é classificado como bloco, caso seja menor é um tijolo. Embora seja apenas uma questão de dimensão, não interferindo na resistência à compressão e absorção de água.

A NBR 10833 (ABNT, 2012c) determina os procedimentos para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com a utilização de prensa, podendo ser manual ou hidráulica. A norma padroniza os requisitos gerais para os materiais utilizados no solo-cimento como mencionado anteriormente.

A água tem que ser isenta de impurezas nocivas as reações de hidratação do cimento. Podem ser adicionados aditivos e pigmentos, desde que estejam de acordo com as normas referentes e que o tijolo atenda aos requisitos físicos-mecânicos. Outro procedimento importante é a dosagem. Para isso precisam ser preparados três traços de solo-cimento, para cada traço, molda-se pelo menos 20 tijolos ou blocos na mesma prensa e que necessitam ser curados de forma igual, são retirados aleatoriamente dez unidades e realiza-se os ensaios de análise dimensional, resistência à compressão e absorção de água conforme a NBR 8492 para tijolos (ABNT, 2012e) ou NBR 10836 para blocos (ABNT, 2013a). Com os resultados, é selecionado o traço mais econômico que atendam aos requisitos físicos-mecânicos das normas NBR 8491 ou NBR 10834 (ABNT, 2012c)

Os procedimentos para fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento seguem a NBR 10833 (ABNT, 2012c). O solo-cimento pode ser misturado manual ou mecanicamente, adicionando cimento ao solo, que deve estar destorroado e peneirado, misturando-os até ficarem com coloração uniforme, a água é adicionada gradativamente, até atingir a umidade ótima de trabalho que proporciona a melhor taxa de compactação. Os tijolos precisam ser moldados imediatamente após a mistura, depois da moldagem podem ser empilhados sobre uma superfície plana e lisa, em uma altura máxima de 1,5m. Para tijolos com altura maior que 80mm e inferior a 200mm, recomenda-se utilizar uma prensa com duplo sentido de compressão. A cura dos blocos, nos primeiros sete dias, deve ser úmida, não sendo especificado pela

norma uma forma específica. A utilização do solo-cimento na alvenaria só pode ser feita depois de 14 dias (ABNT, 2012c).

A NBR 8491 (ABNT, 2012b) apresenta os requisitos para os tijolos de solo-cimento e a NBR 10834 (ABNT, 2012f) trata dos requisitos para blocos de solo-cimento sem função estrutural. Embora sejam produtos diferentes, as normas apresentam algumas similaridades. Tanto a NBR 8491 como a NBR 10834 indicam que a resistência a compressão dos tijolos e blocos de solo-cimento não pode ser inferior a 2,0MPa para a média das amostras e as resistências individuais devem ser maiores que 1,7MPa com idade mínima de 7 dias. Além disso, as normas estabelecem que a absorção de água deve ser inferior a 20% para a média e a absorção individual dos blocos não pode ultrapassar 22%, também com idade mínima de 7 dias.

Conforme a NBR 8491 (ABNT, 2012b) e NBR 10834 (ABNT, 2012f), os tijolos e os blocos devem ser identificados pelo fabricante segundo a sua procedência, deve ter arestas vivas e não pode apresentar fissuras, fraturas ou outros defeitos que prejudiquem o assentamento, a resistência e a durabilidade da alvenaria. Os tijolos devem ter no mínimo 14 dias de idade para execução de alvenaria.

#### 3.2.4.2 Normas para amostras cilíndricas de solo-cimento

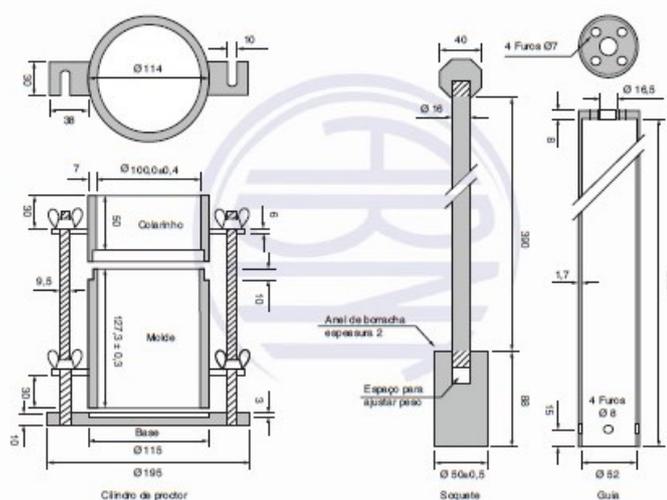
Além das normas referentes à utilização do solo-cimento na forma de tijolos ou blocos no levantamento de alvenarias, existem normas para a avaliação do solo-cimento em amostras com o formato cilíndrico também chamado de corpos de prova cilíndricos. Esse formato permite avaliar o solo-cimento utilizado em outras finalidades, como por exemplo, em obras de pavimentação na base ou sub-base de estradas, na fabricação de paredes monolíticas, na construção de contenções, entre outros.

A NBR 12024 (ABNT, 2012h) determina o método de moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. E a NBR 12023 (ABNT, 2012g) aborda o ensaio de compactação do solo-cimento, apresentando os métodos para determinação da relação do teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo-cimento, sem reuso do material, quando compactadas com energia normal. A NBR 12024 (ABNT, 2012h) e NBR 12023 (ABNT, 2012g) dividem em método A para

solos com 100% de partículas com diâmetro 4,75mm e método B para solos com até 30% de partículas com diâmetro maior do que 19mm.

Para determinar o teor de umidade ótima do solo-cimento, a compactação dos corpos de prova cilíndricos é feita utilizando-se um cilindro de *Proctor* pequeno apresentado na Figura 12, onde são colocadas 3 camadas e cada camada é compactada 26 vezes. O corpo de prova deve ser extraído e uma amostra deve ser retirada para determinação do teor de umidade. O procedimento deve ser repetido até obter pelo menos 5 pontos da curva de compactação. Gera-se um gráfico com a massa específica aparente seca e o teor de umidade para cada ponto, traçando-se uma reta ligando os pontos determina-se o teor de umidade ótima com a equação gerada.

**Figura 12 - Cilindro de Proctor**



**Fonte: ABNT (2012g).**

A norma 12253 (ABNT, 2012a) é utilizada para a determinação da dosagem de cimento para estabilização do solo para o emprego como camada de pavimentação. A norma sugere um teor de cimento dependendo da classificação do solo, em seguida realiza-se o ensaio de compactação da NBR 12023 (ABNT, 2012g) utilizando a dosagem de cimento sugerida. Em seguida, seleciona-se no mínimo três teores de cimento, visando determinar o teor de cimento que atenda ao critério de resistência mínima de 2,1MPa, moldando no mínimo 3 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão. Com o teor de cimento e a resistência à compressão determinados, é possível realizar uma interpolação gráfica, para determinar o teor de cimento mais adequado para a resistência desejada. Caso a

mistura seja produzida sem garantia de homogeneidade, o teor mínimo de cimento deve ser de 5%.

Para a execução dos corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de qualidade, de forma resumida, a quantidade de cimento a ser utilizada pode ser definida através da NBR 12253 (ABNT, 2012a) e a adição de água conforme determinada pela NBR 12023 (ABNT, 2012g) acrescentado mais 0,5 a 1,0 ponto percentual de umidade para compensar a perda de água por evaporação. A mistura deve ser compactada utilizando o cilindro de *Proctor* pequeno (Figura 12), em 3 camadas, cada camada recebendo 26 golpes, a amostra deve ser extraída com um extrator de corpo de prova e deve ser curado por 7 dias em câmara úmida. Para demonstrar a eficiência da compactação, após a moldagem e os cálculos constantes na norma, o grau de compactação da amostra precisa estar entre 98% e 102% e a umidade de moldagem no intervalo de  $\pm 0,5$  ponto percentual em torno da umidade ótima.

A NBR 12025 (ABNT, 2012i) indica o ensaio de resistência à compressão simples de corpos de prova cilindros de solo-cimento. Esse método pode ser aplicado tanto para a determinação em laboratório do teor de cimento para a estabilização do solo quanto para o controle da qualidade do solo-cimento em uma obra. A amostra deve ser saturada em água por 4h antes e ser ensaiados imediatamente após saírem da água. O carregamento precisa ser aplicado de forma controlada de aproximadamente 1mm/min.

Para o ensaio de absorção de água de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento, emprega-se a NBR 13555 (ABNT, 2013b). Resumidamente, o corpo de prova deve ser colocado em estufa até atingir massa constante, na sequência é imergido em água por 24h, após esse período pesa-se imediatamente e calcula-se a absorção de água.

A NBR 11798 (ABNT, 2012d) estabelece os requisitos para os materiais a serem utilizados na execução de camadas de base de pavimentos de solo-cimento. O solo pode ser proveniente de jazidas ou do local da obra, ser homogêneo e de preferência se enquadrar como A1, A2 e A4 conforme ASTM D 3282 que apresenta a classificação de solos e misturas de solo-agregado para fins de construção de rodovias, e deve conter 100% de material passante na peneira com abertura de 75 mm, máximo 30% de material retido na peneira com malha de 19mm, máximo de 40%

de material retino na peneira de abertura de 4,75mm. O cimento Portland precisa estar protegido de intempéries, da umidade e outros agentes nocivos e a água deve estar livre de impurezas. O solo-cimento deve ser dosado seguindo a NBR 12253 (ABNT, 2012a) e deve apresentar uma resistência à compressão simples aos 7 dias de cura de no mínimo 2,1Mpa.

A NBR 13553 (ABNT, 2012k) apresenta os requisitos dos materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural. A norma indica que o solo pode ser proveniente de jazida ou do próprio canteiro de obras, o cimento Portland deve ser devidamente armazenado e a água deve ser isenta de substâncias nocivas à hidratação do cimento. Além disso, o solo deve ser 100% passante pela peneira de 4,75mm, apresentar entre 15% a 50% de material passado na peneira de 75 µm, ter o limite de liquidez menor ou igual que 45% e o índice de plasticidade menor ou igual a 18%. A resistência à compressão deve ser ensaiada conforme a NBR 12025 (ABNT, 2012i) apresentando uma resistência igual ou superior a 1,0MPa. A absorção de água indicada pela NBR 13555 (ABNT, 2013b) deve ser igual ou inferior a 20%. A variação de volume deve ser igual ou inferior a 1%. A perda de massa após o ensaio de durabilidade da NBR 13554 (ABNT, 2012j) dependendo da classe de solo deve estar entre 7% para solos A6 e A7; 10% para solos A-2-6, A-2-7, A4 e A5; e 14% para solos A1-b, A-2-4 e A-2-5.

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem é demonstrado pela NBR 13554 (ABNT, 2012j). Essa norma determina a perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem em corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. Essa avaliação é indicada para paredes monolíticas e quando o solo-cimento é utilizado como camada de revestimento ou proteção em barragens e obras similares devido a ação direta da água e outros agentes externos (RICHARDS; HADLEY, 2006)

Outra forma de determinação do teor de cimento no solo-cimento é através da NBR 16174 (ABNT, 2013c) que descreve o método para determinação do teor de cimento por titulação em mistura fresca de solo-cimento pode ser aplicado em misturas que o solo passe 100% na peneira de abertura de malha de 19mm.

### 3.2.5 Normas internacionais para solo-cimento

As normas internacionais para o solo-cimento dependem do procedimento de moldagem. Basicamente as normas internacionais buscam estabelecer os padrões mínimos de qualidade para o solo-cimento, como a resistência à compressão e absorção de água. A seguir são citadas algumas normas internacionais:

ASTM D558 de 2011 determina os métodos de ensaio padrão para relações de densidade de umidade (peso da unidade) de misturas de solo-cimento;

ASTM D1632 de 2017 instrui os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova de solo-cimento, para ensaios de resistência a compressão e flexão em laboratório;

ASTM D1633 de 2017 apresenta os métodos de ensaio para resistência à compressão de corpos de prova cilindros de solo-cimento. Apresenta duas formas, o método A mais utilizado é pelo cilindro de *Proctor*, facilmente encontrado em laboratório de solo;

ASTM D1635 de 2019 indica o método de ensaio para resistência à flexão do solo-cimento, usando feixes simples com carregamento de terceiro ponto;

ASTM D5982 de 2015 instrui o método de ensaio para determinação do teor de cimento do solo-cimento fresco (método do calor de neutralização);

ASTM D559 de 2015 determina os métodos de ensaio para umedecimento e secagem de misturas compactadas de solo-cimento;

ASTM D806 de 2019 apresenta o método de ensaio para o conteúdo de cimento de misturas de solo-cimento endurecidas.

A *British Standards Institution* (BS) não possui normas específicas para solo-cimento, a única localizada foi a BS 1924-2 de 2018 que determina os métodos de ensaio para materiais estabilizados com cimento e estabilizados com cal.

A dosagem de cimento pode ser determinada pela classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), que é um sistema rodoviário de classificação de solos. A norma refere-se a ASTM D 3282, na qual a classificação dos solos é feita com base no limite de liquidez, índice de plasticidade, material passante na peneira nº200 (75 µm), nº40 (425 µm) e nº10 (2 mm).

### 3.3 Incorporação de materiais em solo-cimento

Novas pesquisas estão sendo desenvolvidas para a incorporação de materiais, com a finalidade de melhorar as propriedades dos produtos de solo-cimento ou substituir total ou parcialmente o aglomerante utilizado, além de proporcionar a correção de solos argilosos.

A pesquisa de Paschoalin, Storopoli e Dias (2016) , utilizou o PET (poli tereftalato de etila) em flocos, cimento Portland com clínquer e gipsita na sua composição básica e com adição de escória de alto-forno (CP II-E) e solo. O solo utilizado foi caracterizado como é latossolo vermelho distrófico identificado como muito profundo, friável, poroso e com aspecto típico argiloso ou muito argiloso. Os autores prepararam o solo seguindo a NBR 6457 de 1986 que apresenta a preparação de amostras para ensaios de compactação e testes de caracterização. Realizado os testes de limite de liquidez, limite de plasticidade e o teste de compactação de *Proctor*, as características do solo foram comparadas com a NBR 10833 que indica as características mínimas que deve apresentar para a preparação de produtos de solo-cimento. Na sequência, os autores determinaram diferentes dosagens para a mistura de solo-cimento e escolheram a que melhor se comportou no exame tátil e visual: solo + 15% de CP + 20% PET; solo + 20% de CP + 15% de PET; e solo + 25% de CP + 10% de PET. A moldagem dos blocos foi manual com um cilindro de *Proctor*, a compactação e cura seguiram as orientações da NBR 10833 de 2012. Os blocos foram ensaiados a 7, 14 e 28 dias de cura, e foram saturados 6 horas antes do experimento de compressão.

Vale ressaltar que Paschoalin, Storopoli e Dias (2016) utilizaram na pesquisa um solo argiloso sem a correção da granulometria com um material arenoso. Além disso, optaram pelo cimento Portland CII-E como aglomerante ao invés de utilizar a cal, que é o aglomerante indicado para a estabilização de solos argilosos. Isso pode ter causado a resistência a compressão inferior a indicada pela norma (DIVYA *et al.*, 2017).

Divya *et al.* (2017) avaliaram diferentes modelos de tijolos de solo-cimento feitos com um solo arenoso característico da região Tamil Nadu na Índia. O solo utilizado foi caracterizado como arenoso composto por 70% de areia, 16,25% de silte e 13,75% de argila. Eles caracterizaram os materiais utilizados, determinando o peso

específico do solo e do agregado e o início e fim de pega do cimento. Os autores avaliaram a resistência a compressão, absorção de água e teste de eflorescência dos blocos com diferentes dosagens de solo-cimento, sendo 24% de água e cimento, 12% e 16% de cimento em massa de solo. Os materiais secos foram misturados e a água foi acrescentada aos poucos. Após moldagem, os blocos foram empilhados e colocados para secar em um local arejado e ao abrigo do sol por 28 dias, dos 7 tijolos preparados para cada mistura de solo, 3 foram ensaiados para resistência à compressão secos, 2 para resistência a compressão saturados, 1 para o teste de erosão e 1 para absorção de água. Os resultados indicaram que o aumento no teor de cimento aumenta a resistência à compressão e reduz a taxa de absorção de água. A capacidade de absorção de água determina a durabilidade dos tijolos. Dessa forma, os tijolos feitos com 16% de cimento, forneceu as maiores resistências à compressão.

Dependendo da matéria-prima utilizada na produção do solo-cimento, pode ser uma fonte de sais solúveis, sendo necessário realizar o teste de eflorescência. Os sais solúveis aparecem na superfície dos tijolos, sendo a cor branca a mais comum, mas pode também aparecer nas cores amarelo, verde ou marrom-avermelhado, sendo a última mais conhecida como coloração com vanádio. Os tijolos de solo-cimento costumam apresentar eflorescência nula ou leve (DIVYA *et al.*, 2017).

Leonel *et al.* (2017) avaliaram a incorporação de areia de fundição de descarte no solo-cimento. Os tijolos foram feitos com 10% de cimento (visando à viabilidade econômica dos tijolos), 0 a 25% de areia comercial (como material de referência) e 0 a 65% de areia de fundição, 22 a 65% de argila e 15 a 30% de pó de cascalho (para aumentar a resistência mecânica). Os tijolos foram ensaiados para determinar suas propriedades tecnológicas de acordo com normas brasileiras e internacionais. Os autores realizaram os ensaios de resistência à compressão em 6 amostras de cada dosagem saturados em água por 24h, absorção de água e durabilidade que envolveu 6 ciclos de umedecimento (5h de imersão em água), secagem (42h de secagem em estufa a 71°C) e escovação com uma escova de cerdas de aço conforme a NBR 13554. A durabilidade foi determinada com a perda de peso do tijolo, com base no peso seco inicial e o peso final seco em estufa a 105°C até constância da massa. Algumas amostras foram coletadas para o microscópio eletrônico de varredura (MEV). A areia de fundição é rica em sílica cristalina e pode substituir a areia natural. Além disso, a areia de fundição contém montmorillonite que é um argilomineral que melhora

a coesão, desmoldagem e resistência do tijolo. A substituição de areia comercial pela de fundição reduziu a resistência mecânica dos tijolos, porém ao adicionar o pó de pedra houve uma redução da absorção de água e a resistência mecânica manteve-se dentro dos critérios da norma (LEONEL *et al.*, 2017)

Anjum *et al.* (2017) utilizaram lodo de estação de tratamento de água (ETA) de Faisalabad no Paquistão, como substituto parcial do solo, na produção de blocos de solo-cimento. Os autores preparam o lodo removendo o excesso de água por sedimentação e o material restante foi homogeneizado e secado em forno à 180°C por 48h, em seguida a amostra foi peneirada em malha 425µm. A composição do lodo utilizado possuía principalmente resíduos de plástico e cerca de 40% de argila. Foram adotadas 5 dosagens diferentes, de referência com solo-cimento na proporção de 1:4 (100% de solo e 25% de cimento), e 4 dosagens com substituições do cimento pelo lodo (2,5% de lodo e 22,5% de cimento; 5% de lodo e 20% de cimento; 7,5% de lodo e 17,5% de cimento; 10% de lodo e 15% de cimento). A moldagem foi feita em blocos cilíndricos por prensagem uniaxial a 18Mpa e foram deixados para curar por 28 dias em uma câmara úmida.

Os autores avaliaram a resistência à compressão, absorção de água e densidade aparente das amostras conforme requisitos das normas (C39-86, C642-13 e ASTM 10834). A resistência à compressão e a densidade dos blocos cilíndricos diminuiu com o aumento da quantidade de lodo inserido, que variou de 4,5MPa (blocos sem lodo) até 3,5Mpa (maior quantidade de lodo), mesmo assim a resistência atendeu aos requisitos de norma (>2MPa). A taxa de absorção de água aumentou com o acréscimo de lodo na mistura, isso provavelmente foi causado pelo elevado índice de argila, mas a absorção de água manteve-se dentro dos padrões (<20%). Por fim, o aumento da proporção de lodo ocasionou uma diminuição da densidade aparente dos blocos (ANJUM *et al.*, 2017).

Afaj (2018) analisou o comportamento de fluência do solo-cimento feito com solo de argila siltosa marrom. A fluência é o comportamento que a amostra apresenta ao longo do tempo com uma carga constante aplicada. A dosagem de cimento foi determinada pela classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), que é um sistema rodoviário de classificação de solos, e ficou em 4, 8 e 12%. O solo-cimento foi misturado com o teor de umidade determinado e foi compactado no molde em 5 camadas, com 36 golpes em cada

camada, a fim de fornecer a compactação determinada no ensaio de *Proctor*. Em seguida, as amostras foram retiradas do molde e embrulhadas em um plástico e colocadas em recipiente a temperatura ambiente por 14 dias. O ensaio foi realizado aplicando uma carga constante de 150kN/m<sup>2</sup> para cada dosagem, foram aplicados três níveis de tensão (60, 75 e 85%). A carga foi mantida aplicada por 25 horas e em seguida as amostras foram carregadas até a ruptura. Os ensaios concluíram que existe um nível crítico de estresse, de forma que abaixo dele o solo-cimento não irá falhar e o aumento do teor de cimento pode causar um aumento no nível de tensão crítica. O aumento do teor de cimento não interfere significativamente na taxa de fluência.

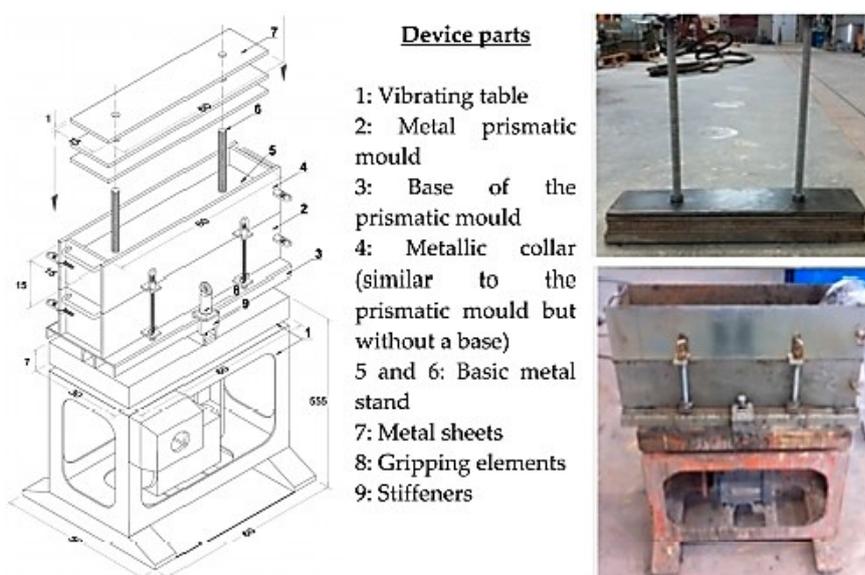
O solo da pesquisa de Hossain *et al.* (2019) foi coletado em um viveiro com a finalidade de utilizar um material rico em matéria orgânica. Os aglomerantes analisados foram três: cal, cinzas volantes e cimento. As dosagens de aglomerantes adotadas foram nas proporções de 5, 10, 15 e 20%. Os autores realizaram testes de resistência mecânica e massa específica de acordo com as normas da ASTM. Os ensaios indicaram que a resistência à compressão diminuiu com o aumento de cinzas volantes nos teores de 5%, 10% e 15%, porém houve um acréscimo na resistência com 20% de cinza volante. Realizando a comparação entre os aglomerantes testados, o cimento apresentou um aumento na resistência à compressão conforme o seu acréscimo na mistura. A cal tornou o solo-cimento mais resistente indicando que o melhor teor de aglomerante foi com 15%. As cinzas volantes não demonstraram ser uma boa opção, provavelmente por apresentarem pouca propriedade aglomerante em comparação com a cal e o cimento. As reações do cimento não dependem da composição do solo, mas sim da água e a melhor resposta às resistências mecânicas foram encontradas com 10% de cimento.

Na pesquisa de Linares-Unamunzaga *et al.* (2019), utilizaram o solo do norte da Espanha com o tamanho máximo dos grãos de 40mm, não plástico, com ausência de materiais orgânicos e sulfato solúvel, o que enquadra o solo nas normas espanholas para utilização do solo-cimento em estradas como material de base e sub-base. A dosagem adotada foi de 3,5% de cimento e 7% de umidade, obtendo uma densidade seca máxima de 2,18g/cm<sup>3</sup>. Foram moldados 63 corpos de prova prismáticos com 15cm x 15cm x 60cm, que foram experimentados para a resistência à flexão. As 2 partes resultantes da fratura à flexão (totalizando 125 amostras) foram

experimentadas à compressão. Os corpos-de-prova foram curados em uma câmara úmida, após 24h foi removido parte do molde prismático, deixando a base que só foi removida aos 7 dias. Depois dos ensaios de resistência mecânica, amostras foram retiradas para determinar o grau de compactação e densidade do solo-cimento. O grau de compactação apresentou valores maiores que 98% e a resistência à compressão dos blocos foi de 2,67MPa aos 7 dias. Os autores comentaram que acrescentar a variável de densidade é uma necessidade da comunidade científica porque o grau de compactação do solo-cimento interfere diretamente na resistência mecânica. A qualidade do solo-cimento normalmente é avaliada pela resistência à compressão uniaxial aos 7 dias, conforme a legislação de cada país. Porém, a resistência à flexão também é uma propriedade que pode ser avaliada, preferencialmente aos 90 dias.

Linares-Unamunzaga *et al.* (2018) desenvolveram um procedimento específico para moldagem de peças prismáticas de solo-cimento para realização de ensaios de resistência mecânica, representado pela Figura 13, que pode ser repetido com dispositivos disponíveis em grande parte dos laboratórios de solos.

**Figura 13 - Novo procedimento para compactação de CP de solo-cimento**



**Fonte: Linares-Unamunzaga *et al.* (2018).**

Na pesquisa realizada por Turgut (2012), os materiais utilizados para fabricação dos blocos foram o calcário em pó, cinzas volantes Classe C e fumo de sílica. Os blocos foram ensaiados com 7, 28 e 90 dias para resistência à compressão e flexão, densidade, absorção de água, porosidade e condutividade térmica dos

blocos. Os blocos com 20% de sílica ativa após 28 e 90 dias apresentaram uma resistência de 23Mpa e 26,5Mpa. Além dos resultados da pesquisa encorajarem a utilização de novos materiais, a estimativa de custo dos blocos representou uma redução no custo da alvenaria em cerca de 6,4 vezes em comparação com o tijolo convencional de barro queimado (TURGUT, 2012).

Sullivan e Horwitz-Bennett (2008) afirmam que os tijolos representam um impacto menor se comparado a outros materiais utilizados na construção civil. Também comentam que durante o levantamento das alvenarias utilizando os tijolos, a geração de RCD nos canteiros de obras é reduzida e os resíduos gerados acabam sendo utilizados na própria construção. Essa descrição feita pelos autores, não retrata o que acontece nas obras do Brasil, onde ocorre muito desperdício de material em razão de vários fatores, como por exemplo, a quebra das peças no canteiro de obras e o retrabalho frequente que acontece pela falta de especialização da mão-de-obra, levando a perda de todo o material que foi utilizado. Isso indica uma necessidade de pesquisar novos materiais e novas tecnologias com a finalidade de introduzir no sistema produtivo materiais que seriam descartados.

Na pesquisa realizada por Briskievicz (2018), foram fabricados blocos de solo-cimento em uma prensa manual. O solo utilizado foi classificado como argiloso coletado em Pato Branco/PR e necessitou de correção para que apresentasse características de um solo arenoso. Essa correção foi feita em duas misturas, uma com areia natural e outra com resíduos cerâmicos processados na forma de agregado miúdo. A dosagem de cimento foi 10% em relação ao total da mistura e a correção do solo com agregado iniciou com 70% de agregado miúdo e 30% solo, porém o material não apresentou coesão suficiente para a remoção da prensa. A dosagem foi então ajustada para 60% de agregado miúdo e 40% de solo. Após os ensaios, foi constatado a necessidade de correção no solo-cimento da porção de agregado miúdo de resíduos cerâmicos em função do volume de areia natural, por conta da diferença na massa específica dos materiais. A areia natural apresentava massa específica de  $2,63\text{g/cm}^3$  e o agregado miúdo de resíduos cerâmicos possuía massa específica de  $1,64\text{g/cm}^3$ . Os resultados dos ensaios de resistência à compressão atenderam ao mínimo exigido em norma apenas para a última dosagem, porém a absorção de água foi maior do que o exigido em norma.

Reis e Matos (2017) produziram tijolos de solo-cimento com RCD. Utilizaram três teores de cimento 8%, 10% e 12%, e realizaram a substituição da massa de solo por RCD em 25% e 50%. Após a moldagem e cura, os tijolos foram ensaiados para determinar a resistência à compressão e a absorção de água. Os autores obtiveram sucesso no ensaio de absorção para todas as composições, porém no ensaio de resistência a compressão atingiram a resistência mínima da norma apenas aos 56 dias para uma composição, com 12% de cimento e 25% de RCD.

Da Silva *et al.* (2014) fizeram tijolos de solo-cimento com a incorporação de resíduos cerâmicos. Utilizaram os teores de cimento em relação a massa de solo de 8%, 10% e 12% e os teores de resíduos cerâmicos adicionados relativos à massa de solo foi de 2% e 4%. Os tijolos foram ensaiados para resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Os melhores resultados foram com a incorporação de 2% e 4% de resíduos cerâmicos, nas composições de solo-cimento-cal com percentuais de 8%, 10% e 12% de aglomerante.

Silveira e Nóbrega (2006), incorporou RCD em duas misturas de resíduo-solo nas diluições de 75% e 100%, utilizou o cimento CP II-E com um teor de 8% de cimento em massa. A cura foi feita por 7, 28, 60 e 90 dias e o solo-cimento foi ensaiado para determinar a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Na pesquisa, todas as amostras ultrapassaram a resistência mínima de 2,1 MPa. De forma similar, a absorção de água manteve-se abaixo dos 20%.

Na pesquisa de Silva e Lafayette (2016) utilizou RCD com teores de 10%, 25%, 50% e 75% e 7% de cimento CP II-E. Os CPs cilíndricos foram curados por 7 e 28 dias. E após realizou-se o ensaio de resistência à compressão. As amostras que atingiram a resistência mínima exigida em norma foram apenas com 0 e com 25% de RCD adicionado aos 28 dias.

Segantini e Wada (2011) realizou um estudo de dosagem de solo-cimento, iniciou utilizando o cimento CP II-Z nos teores de 6%, 8% e 10% na fabricação de solo-cimento com RCD com 20% e 40%. Após avaliarem os resultados concluíram que poderiam trabalhar com 6% de cimento e também adotar incorporações de RCD maiores que 40%, então na segunda fase adotaram a incorporação de RCD na ordem de 60, 80 e 100% em relação a massa de solo, e o teor de cimento ficou entre 2% e 4%. Para verificar a qualidade do solo-cimento, utilizaram o ensaio de resistência à

compressão. Os melhores resultados foram com 4% de cimento, com adição de no mínimo 20% de RCD e até 100% de RCD em relação a massa de solo.

A Tabela 5 apresenta um resumo das pesquisas feitas com incorporação de RCD na fabricação de solo-cimento.

**Tabela 5 – Pesquisas com solo-cimento**

Literatura	Características				Ensaio de qualidade
	Aglomerante		Tipo de resíduo	Proporção	
	Tipo	Dosagem			
Briskievicz (2018)	CPII-Z	10%	Resíduos cerâmicos	40% de solo e 60% de RCD	Resistência e absorção
Reis e Matos (2017)	CP IV-RS	8%, 10% e 12%	RCD	25% e 50% em substituição a massa de solo	Resistência e absorção
Da Silva <i>et al.</i> (2014)	CP II-F e cal hidratada	8%, 10% e 12%	Resíduos cerâmicos	2% e 4% de resíduos	Resistência, absorção e durabilidade
Silveira e Nóbrega (2006)	CP II-E	8%	RCD	75% e 100%	Resistência, absorção e durabilidade
Silva e Lafayette (2016)	CP II-E	7%	RCD	10%, 25%, 50% e 75%	Resistência
Segantini e Wada (2011)	CP II-Z	2%, 4%, 6%, 8% e 10%	RCD	20%, 40%, 60%, 80% e 100%	Resistência

Fonte: Autoria própria (2021).

### 3.4 Resíduos de construção civil

A Lei 12305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, apresentou as responsabilidades dos geradores, sejam pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, ao atendimento da lei. Esta por sua vez definiu pontos importantes como, por exemplo: área contaminada; coleta seletiva; destinação final; geradores; gerenciamento de resíduos sólidos, entre outras definições. Além disso, dispõem da obrigatoriedade e dos itens necessários do plano de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS) para as empresas e cidades. Dentre as atividades sujeitas à elaboração do PGRS estão as empresas de construção civil. Os resíduos sólidos são classificados quanto à origem e quanto à periculosidade, conforme apresentado na Tabela 6 (BRASIL, 2010).

**Tabela 6 - Classificação dos Resíduos Sólidos**

<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
Origem	Domiciliares; De limpeza urbana; De estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; Dos serviços públicos de saneamento básico; Industriais; De Serviços de saúde; Da construção civil; Agrossilvopastoris; De serviços de transporte; Da mineração.
Periculosidade	Perigosos: possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, que apresentam significativo risco à saúde pública ou ao meio ambiente; Não perigosos: são os resíduos não enquadrados como perigosos.

**Fonte: Adaptado pela autora com base na Brasil (2010).**

A NBR 10004, de forma similar a Lei 12305 de 2010, estabeleceu uma classificação para os resíduos sólidos. Conforme a norma, os resíduos são classificados em perigosos e não perigosos, os resíduos não perigosos são chamados de Classe II e são divididos em A (não inertes) e B (inertes) e os resíduos perigosos são chamados de Classe I. Os resíduos Classe I, podem ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e patogênicos para o ser humano e ao meio ambiente. Os resíduos Classe II-A podem ser biodegradáveis, solúveis em água e combustíveis. Os resíduos Classe II-B são quaisquer resíduos que, quando submetidos ao contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 estabeleceu as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil (RCD) que são comumente chamados de entulhos, calça ou metralha. Esta resolução classificou os RCD como os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolição de obras, e os resíduos resultantes da preparação e escavação de terrenos. Apresentou os resíduos como: tijolos; blocos cerâmicos; concreto em geral; solos; rochas; metais; resinas; colas; tintas; madeiras e compensados; argamassa; gesso; telhas; pavimento asfáltico; vidros; plásticos; tubulações; fiações elétricas; entre outros (CONAMA, 2002).

A resolução 307 do CONAMA apresenta outras definições como dos geradores, que são pessoas físicas ou jurídicas, podendo ser públicas ou privadas e que são responsáveis pelas atividades ou empreendimentos que gerem os RCD. Os transportadores são os responsáveis pela coleta e transporte dos RCD entre as fontes geradoras e as áreas de destinação (CONAMA, 2002).

Conforme a resolução, as empresas precisam realizar o gerenciamento de resíduos visando a redução, reutilização ou reciclagem, através da definição de planejamentos, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos necessários para implementar as ações necessárias do gerenciamento. A resolução nº 307 também define: reutilização é o processo de reaplicação de um resíduo sem a transformação dele; reciclagem é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido a uma transformação; e o beneficiamento que são processos que tornam os resíduos aptos para serem utilizados como matéria-prima ou um produto. Isto posto, o agregado reciclado é um material granular proveniente do beneficiamento dos RCD que podem ser aplicados em obras de edificações, pavimentação, em aterros sanitários e outras obras de engenharia (CONAMA, 2002).

A definição de resíduos sólidos da construção civil (RCD) conforme a NBR 15116 (2004), são os resíduos oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos materiais resultantes da preparação de terrenos e escavações. Os resíduos são compostos por tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica entre outros (ABNT, 2004).

Os RCD são classificados em Classe A, Classe B, Classe C e Classe D, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Classificação dos RCD**

<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e obras de infraestrutura; de componentes cerâmicos, argamassa e concreto) e do processo de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas em concreto produzidas nos canteiros de obras.
Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações (plástico, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas e gesso)
Classe C	Resíduos que ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações que sejam economicamente viáveis.
Classe D	Resíduos perigosos provenientes de construções como tintas, solventes, óleos e materiais contaminados,

**Fonte: Adaptado pela autora com base na CONAMA (2002).**

A NBR 15116 (2004) apresentou os requisitos para utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. A norma técnica definiu em dois tipos os agregados de resíduos de RCD, os agregados de resíduo de concreto (ARC) que é o agregado reciclado obtido através do processamento de resíduos do tipo Classe A, com a sua composição da fração graúda com o mínimo de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. E o agregado de resíduo misto (ARM) que é o agregado reciclado obtido com o processamento dos resíduos de Classe A, com a composição de sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas (ABNT, 2004).

O agregado reciclado conforme a NBR 15116 (2004) é um material granular com as características técnicas que atendam às especificações para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura, procedente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis. Essa norma tem como objetivo o emprego dos agregados reciclados em obras de pavimentação viária (camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentação) ou revestimento primário de vias não pavimentadas. E também para o preparo de concreto sem função estrutural (ABNT, 2004).

Embora a NBR 15116 trate da utilização dos agregados de RCD para pavimentação ou preparo de concreto sem fins estruturais, e não mencione o emprego desse material na produção do solo-cimento, serão considerados os requisitos dessa norma para o emprego dos agregados de RCD na produção de solo-cimento, considerando que os agregados precisam ter as mesmas características dos empregados no concreto sem função estrutural (ABNT, 2004).

Admite-se apenas o emprego de resíduos Classe A como agregados, podendo ser substituídos de forma parcial ou total aos agregados convencionais. A classificação do resíduo beneficiado para esse fim pode ser o tipo ARC ou ARM, contanto que apresentem as propriedades indicadas na NBR 15116 para: teor de fragmentos de à base de cimento e rochas; absorção de água; teores de contaminantes por cloretos, sulfatos, materiais não minerais (madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos), torrões de argila, teor total máximo de contaminantes; teor de material passante na malha 75µm em % (ABNT, 2004).

A composição granulométrica precisa estar de acordo com a NBR 7211 sendo que a sua composição pode ser corrigida com o emprego de um agregado convencional. A norma também indica que seja realizada uma pré-molhagem dos agregados reciclados para a sua aplicação. O agregado reciclado de RCD pode ser utilizado para o uso como enchimentos, contrapisos, calçadas e fabricação de artefatos não estruturais (blocos de vedação, meio-fio (guias), sarjeta, canaletas, mourões e placas de muro) com finalidades gerais que implicam em um concreto de classes de resistência C10 e C15 da NBR 8953 (ABNT, 2004).

### **3.5 Potencial de geração de resíduos de construção civil**

O setor da construção civil é considerado como a segunda maior indústria do país, responsável por grande parte do Produto Interno Bruto (PIB) em razão da alta geração de emprego e renda. Sendo o setor responsável pela elevada movimentação da economia do país, também representa grande parte da geração de resíduos sólidos, cerca de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos são resíduos de construção civil (BRASIL, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Segundo a Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) do IBGE, em 2019 o número de empresas ativas no setor da construção civil era de 125.067 unidades e suas atividades somaram um valor de R\$ 288,0 bilhões e empregaram cerca de 1,9 milhões de pessoas em 2019 (IBGE, 2019).

No Brasil em 2018, foram geradas cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, 40,5% dos resíduos gerados foram despejados em locais inadequados por 3.001 municípios. Esses locais inadequados são considerados os lixões e aterros controlados, que não possuem um sistema de gestão eficiente com medidas necessárias para proteger a saúde e o meio ambiente. A carência de um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos resulta na deficiência das exigências e fiscalização acerca dos RCD (ABRELPE, 2019).

A Lei 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, no Art. 20 aponta que as empresas de construção civil estão sujeitas à elaboração do plano de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS). No PGRS deve constar algumas informações como por exemplo a descrição do empreendimento ou atividade, o diagnóstico dos resíduos gerados e a gestão dos resíduos (BRASIL, 2010).

A resolução 307 do CONAMA, que estabelece os procedimentos e diretrizes para a gestão dos RCD com o objetivo de reduzir os impactos ambientais, lamentavelmente exige que os Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCD) sejam implementados apenas por grandes geradores. Porém, a resolução não define o que considera como grandes geradores, ficando essa definição a cargo das legislações municipais e do distrito federal em conjunto com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos de Construção Civil incorporado ao programa municipal de gestão de resíduos sólidos. Além disso, a resolução 307 do CONAMA exige que os geradores devem ter como prioridade a não geração de resíduos, e de forma secundária a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (CONAMA, 2002).

De acordo com o SEBRAE, o porte de uma empresa é definido em função do número de pessoas que trabalham no local (pessoas ocupadas), dependendo do setor de atividade econômica. A construção civil integra o setor da indústria. A Tabela 8 contém a divisão das empresas pelo porte e a distribuição das unidades de estabelecimentos considerando o número de empregados ativos (SEBRAE, 2013).

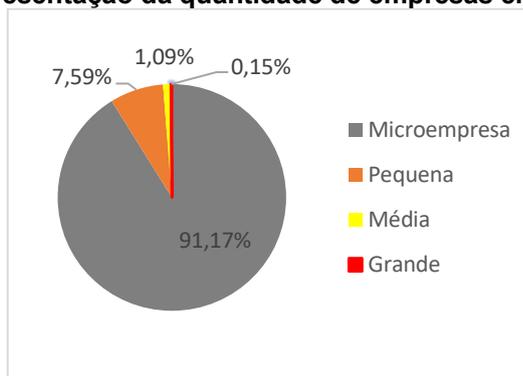
**Tabela 8 – Porte da empresa em função do número de pessoas ocupadas x Ocupação do setor da construção civil**

Porte da empresa	Pessoas ocupadas x nº de empregados no setor da construção civil	
	Indústria (setor construção civil)	Empregados ativos
Microempresa	Até 19	182536
Pequena	De 20 a 99	15188
Média	De 100 a 499	2185
Grande	500 ou mais	305

**Fonte: Adaptado pela autora com base em CBIC (2020) e SEBRAE (2013).**

O gráfico da Figura 14, auxilia na percepção de que 91,17% das empresas são consideradas microempresas, 7,59% são tidas como pequenas, 1,09% são de porte médio e apenas 0,15% são classificadas de grande porte. Mesmo considerando que as empresas de grande, médio e pequeno porte sejam os grandes geradores de RCD, representariam apenas 8,83% das unidades de todo o Brasil. Isso evidencia a necessidade de desenvolver métodos para mitigar os impactos ambientais resultante das atividades provenientes de microempresas.

**Figura 14 – Representação da quantidade de empresas em relação ao porte**



Fonte: Adaptado pela autora com base em CBIC (2020) e SEBRAE (2013).

O fato da resolução 307 do CONAMA não solicitar o PGRCD de pequenos geradores, faz com que essa parcela significativa de geração de RCD seja desconsiderada e menos fiscalizada. Embora seja exigido a coleta, separação e destinação adequada dos resíduos gerados, seja por grandes ou pequenos geradores, essas etapas são descumpridas principalmente pelos pequenos geradores, que são responsáveis pelo descarte inadequado oriundos de reformas e pequenas construções, fazendo o descarte dos resíduos em caçambas sem a devida separação ou então realizam o descarte em locais inadequados (ABRECON, 2011).

Mesmo com as determinações do CONAMA para o Plano Integrado de Gerenciamento dos RCD, muitos municípios ainda não elaboraram o plano. Em 2013 alguns municípios que elaboraram o plano, não contemplavam todas os aspectos indicados na Resolução 307, como é o caso de Curitiba/PR e Florianópolis/SC. Dessa forma, os municípios não conseguiam gerenciar os RCD, ocasionando problemas de saúde para população e para o meio ambiente (JÚNIOR *et al.*, 2013).

O município de Curitiba/PR ainda possui o mesmo plano de gerenciamento de RCD apresentado na pesquisa de Júnior *et al.* (2013). O município de Florianópolis/SC, em 2017 instituiu o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), com o prazo para as ações propostas entrarem em vigor de 2018 a 2021. No PMGIRS contém um capítulo direcionado a minuta do projeto de política municipal de gestão dos resíduos da construção civil, vegetais e volumosos (PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS, 2017).

A pesquisa de Souza *et al.* (2004), apontou que uma gestão eficiente do canteiro de obras trouxe resultados satisfatórios em um estudo de caso. Além disso, os autores apresentaram uma distinção entre os termos atualmente utilizados: “resíduos”, “desperdício” e “perdas de materiais”. Segundo os autores, essa

diferenciação dos termos é importante para ajudar no gerenciamento de uma obra, conseguindo definir e mensurar por exemplo, a perda de materiais causada por furtos ou extravios, incorporação de material em excesso na construção e o entulho que sai da obra (SOUZA *et al.*, 2004).

No entanto, uma gestão de obra eficiente não é uma realidade nas construções de pequeno porte, onde ocorre frequentemente retrabalho causado principalmente pela falta de capacitação da mão-de-obra e desperdícios que poderiam ser evitados. Esses problemas ocasionam um consumo maior de material e também um aumento na geração de resíduos, ocorrendo predominantemente no canteiro de obras.

Grande parte dos RCD são passíveis de reutilização ou reciclagem e não apresentam riscos ao meio ambiente por serem classificados como não perigosos. Uma parcela dos resíduos deve ser encaminhada para logística reversa e apenas uma pequena parte é considerada rejeito. Apenas o rejeito deveria ser encaminhado para a disposição final ambientalmente adequada. Porém, o que acontece em todo o Brasil é o descarte irregular dos RCD em áreas chamadas de “bota fora”, ou então o descarte inadequado em aterros de resíduos domiciliares, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e áreas protegidas por lei, mesmo que o descarte nesses locais seja proibido pela resolução 307 do CONAMA (BRASIL, 2005).

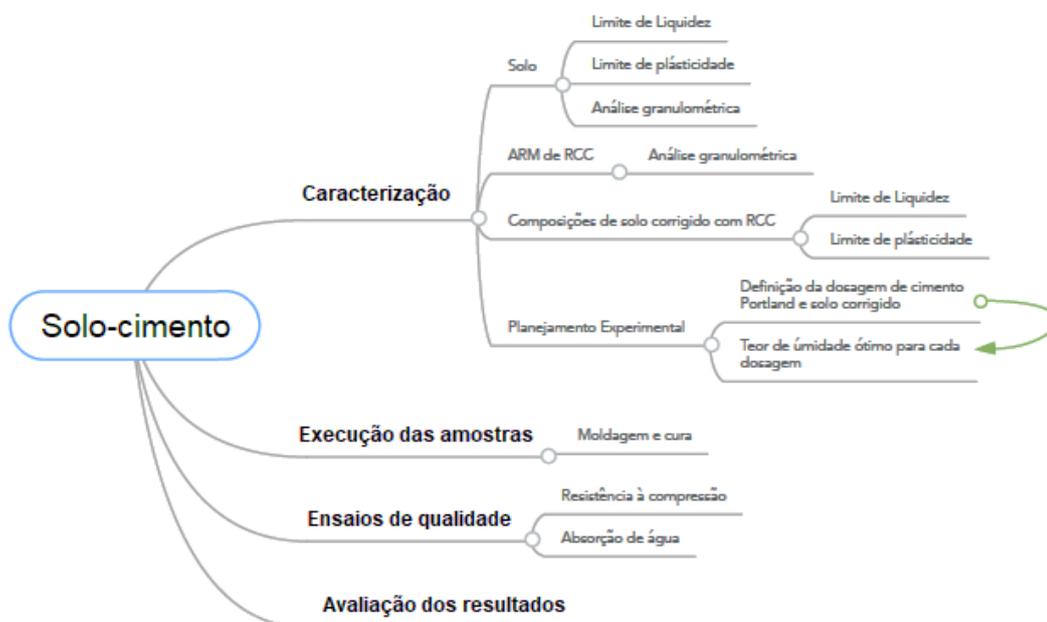
Os problemas causados pelo desperdício, utilização de material em excesso, retrabalho, falta de capacitação da mão-de-obra, traz a reflexão de que os impactos da construção civil não podem ser focados apenas na geração dos resíduos, mas em todo o sistema produtivo, uma vez que além dos resíduos que o retrabalho ocasiona, temos também um consumo maior de material, resultando em mais produção nas indústrias (SOUZA *et al.*, 2004).

Estima-se que cerca de 70% dos RCD tem potencial de reaproveitamento. Esses resíduos, se recondicionados podem dar origem a produtos como areia, pedrisco, brita, rachão e bica corrida, podendo ser utilizados na fabricação de blocos, tijolos, telhas, concreto e na pavimentação de estradas. Esse desperdício de material sem ser reciclado, pode resultar em uma perda de R\$ 8 bilhões ao ano (ABRECON, 2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa o processo de produção das amostras de solo-cimento seguiu as etapas, conforme apresentado no mapa mental da Figura 15. A metodologia baseou-se no boletim técnico 117 da ABCP que aborda diferentes aplicações para o solo-cimento juntamente com as normas técnicas para corpo de prova (CP) cilíndrico de solo-cimento, que são respectivamente a NBR 11798 de 2012 que apresenta os requisitos dos materiais para base de solo-cimento, a NBR 12253 de 2012 que determina o procedimento de dosagem para emprego como camada de pavimento, a NBR 12023 de 2012 que dispõem a metodologia do ensaio de compactação, a NBR 12024 de 2012 que traz os procedimentos de moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento, a NBR 13555 de 2013 que indica o método de ensaio para determinação da absorção de água de CP cilindros de solo-cimento e por fim, a NBR 12025 de 2012 que apresenta o método de ensaio de compressão simples para CP cilíndricos de solo-cimento.

Figura 15 - Mapa mental materiais e métodos



Fonte: Autoria própria (2021).

Na primeira etapa, foi feita a coleta e caracterização do solo e do ARM de RCD. Na sequência, utilizando a composição granulométrica dos agregados e do solo, foram definidos os limites da composição solo/agregado. Em seguida, foram repetidos

os ensaios de limite de liquidez e plasticidade para o solo corrigido com o agregado de RCD, para a verificação do atendimento às normas de solo-cimento. Na etapa seguinte, realizou-se o planejamento experimental fatorial de dois fatores com um ponto central, com auxílio do *software Statistica*, que forneceu as dosagens de cimento e as composições de solo corrigido com o ARM de RCD.

Determinou-se o teor da umidade ótima para a compactação das amostras de todas as dosagens definidas pelo planejamento experimental. Após a delimitação da umidade ótima para cada dosagem, foram moldados e curados os corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. Por fim, foram realizados os ensaios de qualidade nas amostras de solo-cimento, que foram de resistência à compressão e absorção de água. Ao final, os resultados dos ensaios de qualidade foram avaliados estatisticamente.

## **4.1 Caracterização dos materiais**

### **4.1.1 Agregado de resíduos de construção civil**

O agregado de RCD utilizado foi o resíduo misto (ARM). A escolha foi feita levando em consideração o beneficiamento dos resíduos que ocorrem na usina recicladora que forneceu o material (Renove Soluções em Reciclagem). O ARM apresenta em sua composição menos que 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, apresentando uma coloração mais marrom.

A coleta do ARM de RCD (Figura 16) foi realizada na Renove localizada em Francisco Beltrão/PR. A usina recicladora informou que o ARM fornecido foi constituído em maioria por blocos, tijolos e concreto e uma pequena parte de mármore e telhas. A empresa também forneceu o relatório da caracterização granulométrica e material pulverulento realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná em Cascavel/PR.

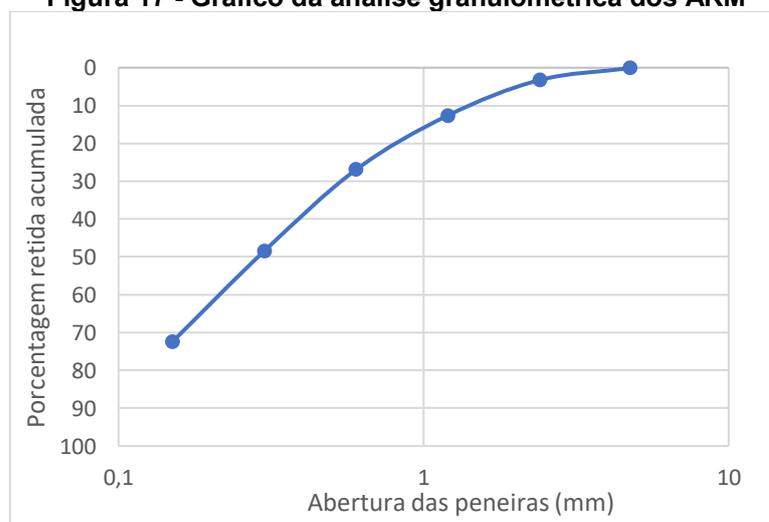
**Figura 16 – Coleta do ARM de RCD**



Fonte: Autoria própria (2021).

A granulometria do agregado miúdo de RCD encontra-se no Anexo B. A massa específica média do ARM é de  $2,34\text{g/cm}^3$ . A Figura 17 apresenta o gráfico da análise granulométrica dos resíduos sólidos, de acordo com a curva gerada no gráfico o agregado apresenta uma distribuição suave e alongada na horizontal, indicando uma granulometria contínua bem graduada, ou seja, o agregado apresenta todas as frações em sua curva de distribuição granulométrica. Com 17% de material passante da peneira de 0,075mm. O agregado possui dimensão máxima característica (DCM) de 2,36mm e módulo de finura (MF) de 1,64 sendo classificado como areia fina por apresentar módulo de finura menor que 2,4 (BAUER, 2019a).

**Figura 17 - Gráfico da análise granulométrica dos ARM**



Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4.1.2 Cimento Portland

O aglomerante escolhido foi o cimento Portland CP II-Z da Itambé por ser indicado no boletim técnico da ABCP (ABCP, 2002). O cimento foi adquirido no comércio local da cidade de Pato Branco/PR.

A Tabela 9 apresenta as especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante para o cimento Portland CP II-Z. De acordo com o fabricante, a massa específica média é de 2,92 g/cm<sup>3</sup>, esse cimento apresenta em sua composição de 6 a 14% de pozolana e necessita de cura por aspersão de água por no mínimo 7 dias.

**Tabela 9 – Características Físico-químicas do CP II - Z**

Química		Físicas	
Parâmetros	(%)	Parâmetros	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,58	Expansibilidade e a quente (mm)	0,25
SiO <sub>2</sub>	21,25	Tempo de pega (min)	Início 255 Fim 310
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,23	Consistência norma (%)I	28,5
CaO	52,74	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3,743
MgO	2,69	Peneira 200 (%)	1,27
SO <sub>3</sub>	2,55	Peneira 325 (%)	6,38
Perda Fogo	7,12		1 dia – 14,4
CaO Livre	0,87	Resistência à compressão (MPa)	3 dias – 28,1
Resíduos Insolúveis	10,92		7 dias – 34,4
Equivalente alcalino	0,77		28 dias – 42,6

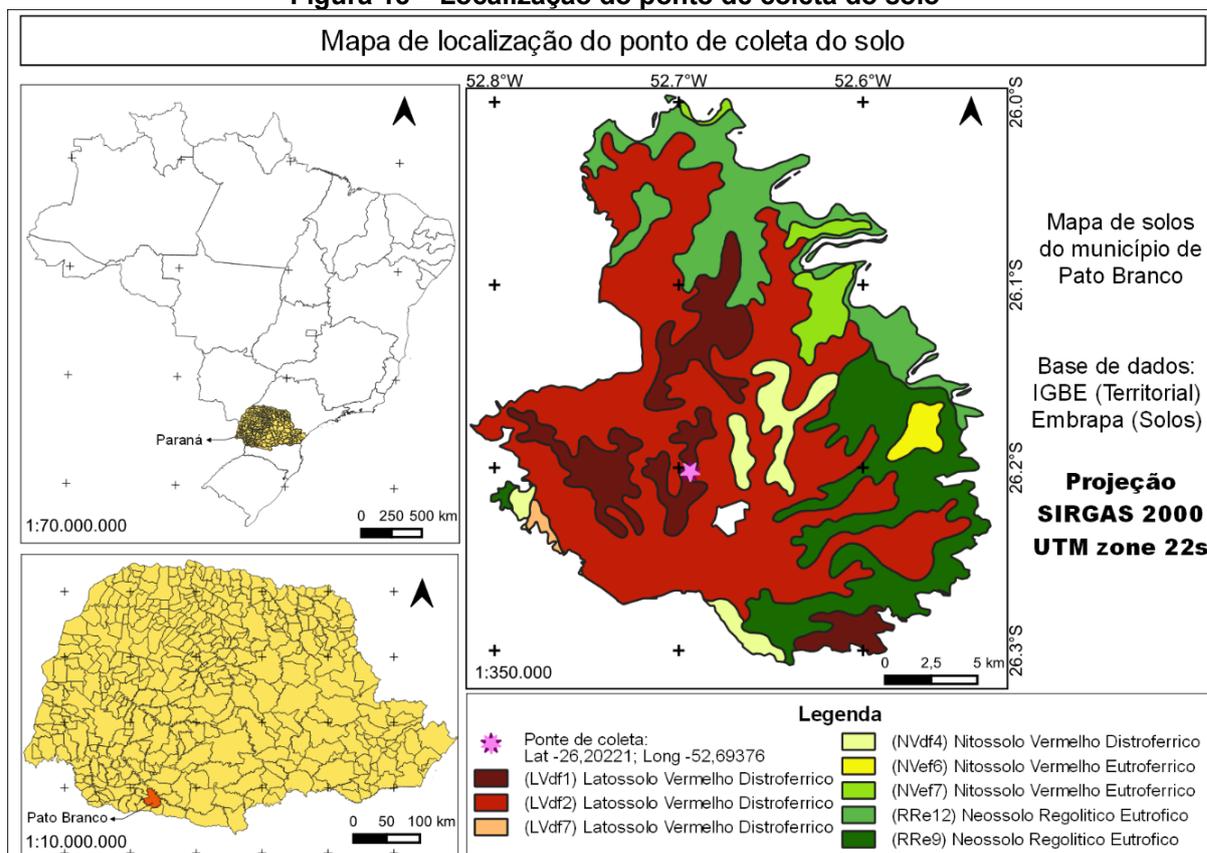
**Fonte: Adaptado pela autora com base em Itambé (2021).**

#### 4.1.3 Solo

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Pato Branco, por esse motivo e também em decorrência de pesquisas similares realizadas com o solo da região por Briskievicz (2018), Beutler (2017) e Vieira (2017) para a fabricação de produtos de solo-cimento, o solo foi coletado nas proximidades da universidade. Para facilitar a coleta, foi escolhido um local onde houve o revolvimento do solo.

A Figura 18 contém um mapa de localização do ponto de coleta, a base cartográfica das divisas foram retiradas do IBGE (2021a). O mapa de solos do município de Pato Branco foi feito com base no mapa de solos do estado do Paraná da Embrapa (2020), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), o solo coletado foi classificado como (LVdf1) Latossolo Vermelho Distroférico.

**Figura 18 – Localização do ponto de coleta do solo**



Fonte: Autoria própria (2021).

O solo foi preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a) que fornece dois métodos para a preparação das amostras. Nesta pesquisa, utilizou-se o método com secagem prévia do solo até atingir a umidade higroscópica. A umidade higroscópica é a água que se mantém no solo após deixa-lo secando ao ar (CAPUTO, 1988). Para isso, o solo foi depositado em um recipiente de plástico conforme indicado na Figura 19.

Após atingir a umidade higroscópica o solo foi destorreado, homogeneizado e o auxílio de um repartidor de amostrar uma quantidade de material foi separada. Na sequência, iniciou-se os ensaios de caracterização do solo.

**Figura 19 - Solo secando ao ar**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para o ensaio de limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 2016b) e limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 2016c), uma amostra de solo foi peneirada com a peneira de malha 0,42mm até atingir a quantidade necessária de amostra para os experimentos.

#### 4.1.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica por sedimentação foi realizada pelo Laboratório de Análises de Solos (LabSolos) da UTFPR-PB. O ensaio foi feito apenas por sedimentação, porque forneceu as informações necessárias acerca do teor de areia, silte e argila presentes no solo utilizado.

#### 4.1.3.2 Limite de Liquidez

O ensaio de limite de liquidez foi norteado pela NBR 6459 (ABNT, 2016b), para sua execução utilizou-se um equipamento chamado Casagrande apresentado na Figura 20. Esse equipamento é dotado de um prato côncavo e uma manivela que ao ser girada provoca um golpe no prato, com sucessivos golpes uma fenda previamente feita na amostra colocada no prato côncavo se fecha, o número de golpes necessário para fechar cerca de 1 cm da rasura juntamente com o teor de umidade desse ponto são utilizados na elaboração de um gráfico, cuja equação da reta fornece a umidade do solo para o limite de liquidez representado por 25 golpes.

O procedimento foi repetido para os diferentes teores de umidade, em duas repetições. Adicionou-se a água em uma amostra de solo e realizou-se a homogeneização durante 15 a 30 minutos. A amostra umedecida e homogeneizada foi espalhada no prato côncavo, realizou-se um corte na amostra com um cinzel conforme exemplificado na Figura 21, em seguida foram aplicados golpes com a manivela do aparelho. Assim que as bordas inferiores do corte fecharam em um centímetro, anotou-se o número de golpes que foram aplicados e retirou-se uma pequena amostra para determinar o teor de umidade conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a).

**Figura 20 – Aparelho Casagrande e amostra de solo**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 21 - Amostra com o corte para o ensaio de Casagrande**



Fonte: Autoria própria (2021).

Com os resultados do número de golpes necessários para cada teor de umidade considerando 5 pontos de umidade começando do ponto mais seco para o mais úmido, a norma indica o intervalo de 35 a 15 golpes do aparelho Casagrande, elaborou-se um gráfico com uma reta ajustada. A equação da reta determinou o teor de umidade do solo para o limite de liquidez relativo a 25 golpes para cada uma das amostras.

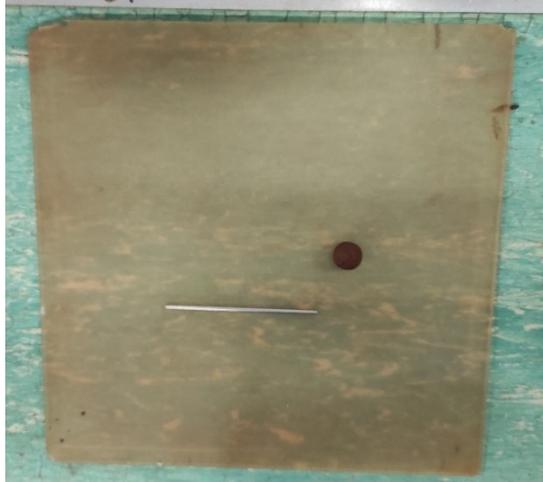
#### 4.1.3.3 Limite de plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade foi feito seguindo a NBR 7180 (ABNT, 2016c), repetido 3 vezes para cada amostra. Iniciou-se colocando uma amostra de solo em uma cápsula de porcelana, em seguida adicionou-se água destilada misturando a amostra de forma vigorosa por cerca de 20 minutos. Quando a amostra apresentou uma consistência de pasta plástica, retirou-se 10g do material e moldou-se uma pequena bola como apresentado na Figura 22.

A bola foi colocada sobre uma placa de vidro e foi pressionada com a palma da mão rolando até formar um cilindro indicado na Figura 23. Quando o cilindro atingiu o diâmetro de 3 mm e tamanho de 100 mm apresentando pequenas fissuras, foi

transferido imediatamente para uma cápsula metálica e foi determinado o teor umidade conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a).

**Figura 22 – Ensaio do limite de plasticidade**



**Fonte: Aatoria própria (2021).**

**Figura 23 - Limite de plasticidade**



**Fonte: Aatoria própria (2021).**

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) encontram-se no Apêndice B. O resultado do limite de liquidez e o respectivo teor de umidade foi calculado com a equação da reta gerada no gráfico que relaciona o número de golpes em escala logarítmica (eixo x) com o respectivo teor de umidade (eixo y).

#### 4.1.3.4 Resultados da caracterização do solo

O relatório da análise granulométrica do solo encontra-se no ANEXO A. O solo foi caracterizado com 5,6% de areia, 16,4% de silte e 78% de argila e foi classificado como Tipo 3 de acordo com a Instrução Normativa nº 2 de 2008, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Esse tipo de solo apresenta textura argilosa, com teor de argila maior ou igual a 35% (BRASIL, 2008). O solo foi classificado como muito argiloso por apresentar mais que 60% de argila segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS *et al.*, 2018).

A composição granulométrica do solo juntamente com a comparação do solo de pesquisa realizadas na região para a mesma finalidade, apresenta-se na Tabela 10.

**Tabela 10 – Análise granulométrica do solo**

<b>Material</b>	<b>Composição</b>	<b>Composição do solo de Briskievicz (2018)</b>	<b>Composição do solo de Beutler (2017) e Vieira (2017)</b>
Areia	5,6%	1%	2,2%
Silte	16,4%	19%	17,8%
Argila	78,0%	80%	80%

**Fonte: Autoria própria (2021); Briskievicz (2018); Beutler (2017); Vieira (2017).**

A composição do solo indicado para a produção de solo-cimento não é definida em norma. No entanto, a ABCP indica que o solo ideal para utilização no solo-cimento deve conter o teor de areia variando de 50% a 90% e de 10% a 50% o teor de silte mais argila (ABCP, 1996). Motta *et al.* (2014) comenta que o solo precisa apresentar um teor de areia variando de 50% a 70% e o teor de silte mais argila de 20% a 40%. Na pesquisa de Divya *et al.* (2017) o solo utilizado foi caracterizado como arenoso composto por 70% de areia, 16,25% de silte e 13,75% de argila.

O limite de liquidez do solo foi calculado através da equação da reta gerada, para a amostra 1 do solo natural foi  $y = -0,3233x + 68,371$  gerando um limite de liquidez de 60% e para a amostra 2  $y = -0,294x + 64,987$  com o limite de liquidez de 58%. O limite de liquidez médio foi de 59%.

O índice de plasticidade foi calculado subtraindo o limite de plasticidade médio do limite de liquidez de cada amostra. Para a amostra 1, considerando o limite de liquidez de 60,29% e o limite de plasticidade de 41,54%, o índice de plasticidade calculado foi de 18,76%. Para a amostra 2, considerando o limite de liquidez de 57,64% e o limite de plasticidade de 42,34%, o índice de plasticidade obtido foi 15,26%. Fazendo a média dos índices de plasticidade e arredondando para o número inteiro, conclui-se que o índice de plasticidade da amostra de solo foi de 17%.

A classificação conforme a ASTM D 3282 é feita com base no material passante na peneira nº 200, respectivamente o teor de silte mais argila, o limite de liquidez e índice de plasticidade. Considerando o teor de 94,4% do material passante na peneira nº 200 enquadrando-se no mínimo de 36%, o limite de liquidez de 59% enquadrando-se no mínimo de 41% e o índice de plasticidade de 17% enquadrando-se no mínimo de 11%, a classificação do solo é A-7.

Os resultados dos ensaios de caracterização do solo juntamente com os valores de referência encontram-se na Tabela 11. De acordo com a NBR 11798 de 2012, a classificação ideal para utilização do solo na produção de solo-cimento é A1,

A2 ou A4 conforme a ASTM D 3282. As demais classificações do solo relativo à composição granulométrica apresentadas na NBR 11798 estão de acordo com os valores indicados (ABNT, 2012d).

A composição granulométrica, comparada aos valores indicados no boletim técnico BT 117 também ficaram fora, sendo o teor de areia de 5,6% e de argila mais silte de 94,4% (ABCP, 1996).

**Tabela 11 – Resumo caracterização do solo**

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>	<b>Referência ASTM D3282 e NBR 11798</b>	
Teor de silte+argila (passante peneira nº 200)	94,4%	<b>Mín 36%</b>	<b>A-7</b>
Limite de Liquidez	59%	<b>Mín 41%</b>	
Índice de plasticidade	17%	<b>Mín 11%</b>	
Passante da peneira 75 mm	100%	<b>100%</b>	
Retido na peneira de abertura 19 mm	0%	<b>Máx 30%</b>	
Retido na peneira 4,75 mm	0%	<b>Máx 40%</b>	
Teor de areia	5,6%	<b>50% a 90%</b>	
Teor de silte mais argila	94,4%	<b>10% a 50%</b>	

**Fonte: Adaptado pela autora com base em ABCP (1996), ABNT (2012e), ASTM (2016).**

Comparando os resultados com os valores indicados para o solo, embora alguns parâmetros tenham se enquadrado, observa-se que para os demais parâmetros o solo não se enquadrado para a produção de solo-cimento, demonstrando a necessidade de correção.

## **4.2 Metodologia de dosagem**

A metodologia de dosagem foi orientada pela NBR 12253 de 2012 que determina o procedimento de dosagem para emprego do solo-cimento como camada de pavimento, por abordar a metodologia de moldagem de corpo de prova (CP) cilíndricos de solo-cimento e no boletim técnico 117 da ABCP que aborda diferentes aplicações para o solo-cimento e apresenta os teores de areia e silte mais argila que o solo deve apresentar.

Considerando a necessidade de correção do solo, esta pesquisa avaliou a adição de ARM na correção de solos argilosos. Para isso, a metodologia de dosagem foi separada em correção do solo com o ARM e a dosagem do cimento em função do solo já corrigido.

Além disso, para a escolha da dosagem, considerou-se as misturas que apresentaram as melhores propriedades em seu estado fresco, como por exemplo, a coesão e a resistência inicial que possibilitava o manuseio do material após a compactação.

Para determinar a influência do teor de cimento e da relação de solo corrigido com ARM de RCD na qualidade do solo-cimento, foram realizados dois planejamentos fatoriais completos com dois níveis ( $2^2$ ) e um ponto central, sendo o primeiro em triplicata para avaliar a resistência à compressão e o segundo em duplicata para avaliar a absorção de água. O modelo escolhido foi o de efeitos fixos, que é quando o pesquisador escolhe previamente os fatores e os seus respectivos níveis. Esse planejamento experimental nos permite avaliar os efeitos de cada fator separadamente e a interação entre os fatores.

#### 4.2.1 Dosagem do solo corrigido com ARM de RCD

Como o emprego de solos argilosos característico de Pato Branco/PR, na fabricação de solo-cimento depende da correção da granulometria para que apresentem características de um solo arenoso, o material escolhido para essa correção foi o ARM de RCD. Para a utilização do ARM foi necessário que ele apresentasse características de agregado miúdo, ou seja, o diâmetro dos grãos deve ser menor que 4,8 mm e maior que 0,05mm.

Com base nos valores indicados no boletim técnico 117 da ABCP (1996) para o teor de areia de 50% a 90% e para o teor de silte mais argila de 10% a 50%, e também considerando a necessidade de uma resistência inicial suficiente para remoção dos CPs do moldem e manuseio até a câmara úmida para a cura, estimou-se uma composição máxima e uma composição mínima para a correção, sendo o ponto menos 50% de solo e 50% de ARM (relação 1,0), e o ponto mais 30% de solo e 70% de ARM (relação de 2,33), por fim o ponto central que foi determinado pelo planejamento experimental com 37,5% de solo e 62,5% de agregado (relação 1,67).

#### 4.2.1.1 Verificação das dosagens de solo corrigido com ARM

Em posse dos valores da análise granulométrica do solo, que foi feita por sedimentação segundo a metodologia da Embrapa e forneceu os teores de areia, silte e argila presente na amostra e com os resultados da composição granulométrica do ARM de RCD, utilizou-se a regra de três para determinar os teores de areia e silte mais argila, para as diferentes composições de solo corrigido, para verificar o enquadramento da composição granulométrica nos valores indicados no boletim técnico 117 da ABCP (1996) e NBR 11798 (ABNT, 2012d).

Para a verificação do enquadramento do solo corrigido para as três composições para a utilização na produção de solo-cimento, foi empregado uma metodologia de correção do solo pela granulometria. Para isso, foi considerado a classificação da NBR 6502 (ABNT, 2022), onde a fração de argila e silte do solo apresenta o diâmetro dos grãos menores que 0,06mm e a fração de areia possui o diâmetro maior que 0,06mm. Dessa forma, a granulometria do ARM de RCD foi considerada da peneira de abertura 4,75mm até a fração passante da peneira 0,075mm, uma vez que ela também faz parte da composição do solo corrigido.

Para o solo, a fração de silte mais argila foi determinada somando os resultados da análise granulométrica por sedimentação, que foram respectivamente 16,4% de silte e 78% de argila, resultando em 94,4% de silte mais argila. E a fração de areia do solo foi de 5,6%. O ARM de RCD foi considerado como 100% de areia e zero teor de silte mais argila.

Para correção do solo, definiu-se inicialmente uma massa total da mistura de 1000g e foi calculado a quantidade de material para cada composição de solo corrigido. Em seguida, para cada composição foi estimado a quantidade de areia e silte mais argila com base no teor definido na Tabela 12, as Tabelas com a massa representativa de areia e silte mais argila contida em cada composição encontram-se no Apêndice A.

**Tabela 12 – Composição granulométrica do solo e do ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte mais Argila</b>
Solo	5,6%	94,4%
ARM	100%	0%

**Fonte: Autoria própria (2021).**

Realizando uma regra de três, foi calculado a porcentagem de areia e silte mais argila contidas em cada uma das composições de solo corrigido e a Tabela 13 apresenta os resultados.

**Tabela 13 – Composição de areia e silte mais argila do solo corrigido com ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte mais Argila</b>
50% solo + 50% ARM	52,8%	47,2%
37,5% solo + 62,5% ARM	64,6%	35,4%
30% solo + 70% ARM	71,7%	28,3%
<b>Valores de referência</b>	<b>50% a 90%</b>	<b>10% a 50%</b>

**Fonte: Autoria própria (2021).**

Foram realizados os ensaios de limite de liquidez (LL) NBR 6459 (ABNT, 2016b) (Figura 24) e limite de plasticidade (LP) NBR 7180 (ABNT, 2016c) para verificar o atendimento do solo corrigido a classificação do solo presente na NBR 11798 (ABNT, 2012d). O procedimento foi repetido para os diferentes teores de umidade, duas vezes para cada amostra de solo corrigido com ARM para todas as dosagens definidas para a correção do solo.

**Figura 24 - Ensaio de LL para o solo corrigido com ARM de RCD**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) foram feitos em réplicas para as três composições de solo corrigido, as tabelas e gráficos dos ensaios encontram-se no Apêndice B. A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade para todas as composições. A média dos resultados arredondando para o número inteiro para as

composições: 50% solo e 50% ARM o LL 34% e o IP 9%; 37,5 de solo e 62,5% de ARM o LL 29% e o IP 4%; 30% de solo e 70% de ARM o LL foi de 28% e o IP de 3%.

**Tabela 14 – Limite de liquidez e índice de plasticidade do solo corrigido**

<b>Materiais</b>	<b>Limite de liquidez</b>	<b>Limite de plasticidade</b>	<b>Índice de plasticidade</b>
50% solo + 50% ARM	33,7%	25,6%	8,1%
	33,3%	23,5%	9,8%
37,5% solo + 62,5% ARM	28,8%	24,8%	4,0%
	28,9%	24,9%	3,9%
30% solo + 70% ARM	26,7%	24,1%	2,6%
	28,6%	24,8%	3,8%

**Fonte: Autoria própria (2021).**

Por fim, a Tabela 15 apresenta um resumo da caracterização do solo corrigido para as três dosagens juntamente com os valores de referência da NBR 11798 (ABNT, 2012d) e boletim técnico 117 (ABCP, 1996). Demonstrando que o solo após ser corrigido com as dosagens de 50% de solo e 50% de ARM (relação 1,0), 30% de solo e 70% de ARM (relação de 2,33), e 37,5% de solo e 62,5% de agregado (relação 1,67), se enquadram nos requisitos para o emprego na produção de solo-cimento.

**Tabela 15 – Resumo caracterização do solo corrigido com ARM**

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>			<b>Referência ASTM D3282 e NBR 11798</b>
	50% solo + 50% ARM	37,5% solo + 62,5% ARM	30% solo + 70% ARM	
Teor de silte+argila (passante peneira nº 200)	47,2%	35,4%	28,3%	
Limite de Liquidez	34%	29%	28%	<b>A-1, A-2 ou A-4</b>
Índice de plasticidade	9%	4%	3%	
Passante da peneira 75 mm	100%	100%	100%	<b>100%</b>
Retido na peneira de abertura 19 mm	0%	0%	0%	<b>Máx 30%</b>
Retido na peneira 4,75 mm	0%	0%	0%	<b>Máx 40%</b>
Teor de areia	52,8%	64,6%	71,7%	<b>50% a 90%</b>
Teor de silte mais argila	47,2%	35,4%	28,3%	<b>10% a 50%</b>
<b>Classificação solo ASTM D3282</b>	<b>A-4</b>	<b>A-2-4</b>	<b>A-2-4</b>	<b>-</b>

**Fonte: Adaptado pela autora com base em ABCP (1996), ABNT (2012e), ASTM (2016).**

#### 4.2.2 Dosagem do cimento

A metodologia de dosagem do cimento foi orientada pela NBR 12253 (ABNT, 2012a) que determina o procedimento de dosagem para emprego do solo-cimento

como camada de pavimento, por abordar a metodologia de moldagem de corpo de prova (CP) cilíndricos de solo-cimento. A norma estabelece que deve ser realizado a moldagem de CP com no mínimo três teores de cimento, com a finalidade de obter a resistência mínima de 2,1 MPa.

Considerando os teores de cimento adotados em pesquisas anteriores apresentadas na Tabela 5, foram definidos os três teores de cimento limitadas no ponto menos em 10%, no ponto mais em 14%, sendo o ponto central definido em 12%. Essas dosagens do cimento referem-se ao total da mistura em massa conforme apresentado na Tabela 16.

**Tabela 16 - Dosagem de Cimento Portland em massa**

	<b>Cimento</b>	<b>Solo/Agregado</b>
-1	10%	90%
0	12%	88%
+1	14%	86%

**Fonte: A autoria própria (2021).**

Foram consideradas 2 variáveis para o delineamento experimental fatorial 2<sup>2</sup>: cimento e a relação entre o agregado de ARM/solo definidas previamente, sendo o ponto menos 50% de solo e 50% de agregado e o ponto mais 30% de solo e 70% de agregado e o ponto central 37,5% de solo e 62,5% de agregado. O ponto central e as variações para mais e para menos constam na Tabela 17.

**Tabela 17 – Dosagens escolhidas**

	<b>Cimento</b>	<b>Relação ARM/Solo</b>
-1	10%	1,00 (50% solo/50%ARM)
0	12%	1,67 (37,5% solo/62,5% ARM)
+1	14%	2,33 (30%solo/70% ARM)

**Fonte: A autoria própria (2021).**

O planejamento experimental gerou cinco dosagens diferentes de cimento e solo corrigido conforme apresentado na Tabela 18.

**Tabela 18 – Dosagens geradas**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Cimento</b>	<b>Relação ARM/Solo</b>
A	10%	1,00
B	10%	2,33
C	14%	1,00
D	14%	2,33
E	12%	1,67

**Fonte: A autoria própria (2021).**

Elaboraram-se dois delineamentos experimentais cada um com uma variável resposta, isto é, um para a resistência à compressão e outro para a absorção de água. Na Tabela 19 consta o delineamento experimental para a resistência a compressão, em triplicata. Enquanto a Tabela 20 apresenta o delineamento experimental para a absorção de água, em duplicata.

**Tabela 19 – Delineamento experimental: Resistência à compressão**

<b>Amostra</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Cimento</b>	<b>Relação ARM/Solo</b>
1	AR1	10%	1,00
2	BR1	10%	2,33
3	CR1	14%	1,00
4	DR1	14%	2,33
5	ER1	12%	1,67
6	AR2	10%	1,00
7	BR2	10%	2,33
8	CR2	14%	1,00
9	DR2	14%	2,33
10	ER2	12%	1,67
11	AR3	10%	1,00
12	BR3	10%	2,33
13	CR3	14%	1,00
14	DR3	14%	2,33
15	ER3	12%	1,67

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Tabela 20 – Delineamento experimental: Absorção de água**

<b>Amostra</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Cimento</b>	<b>Relação ARM/Solo</b>
1	AA1	10%	1,00
2	BA1	10%	2,33
3	CA1	14%	1,00
4	DA1	14%	2,33
5	EA1	12%	1,67
6	AA2	10%	1,00
7	BA2	10%	2,33
8	CA2	14%	1,00
9	DA2	14%	2,33
10	EA2	12%	1,67

**Fonte: Autoria própria (2021).**

Resumidamente, primeiro definiu-se a variável de interesse, também conhecida como a variável resposta que foi a resistência à compressão e absorção de água. Em seguida, analisou-se quais eram os fatores que poderiam ou não interferir na variável resposta, que foram o teor de cimento e a composição de solo corrigido. Estes fatores assumem um valor, os quais são chamados de níveis. O planejamento fatorial forneceu as combinações dos níveis de cada fator, que resultou nas dosagens de solo/corrigido-cimento.

#### 4.4 Teor de umidade ótima

O ensaio de compactação foi norteado pela NBR 12023 (ABNT, 2012g) e foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Pato Branco. A umidade ideal de trabalho ou umidade ótima, foi determinada pelo teor de umidade correspondente ao valor da massa específica aparente seca máxima na curva de compactação. O ensaio foi feito considerando as proporções da Tabela 21, sendo o teor de cimento relativo ao total da mistura.

**Tabela 21 – Dosagens teor de umidade**

Nomenclatura	Cimento	Solo	ARM
A	10%	50%	50%
B	10%	30%	70%
C	14%	50%	50%
D	14%	30%	70%
E	12%	37,5%	62,5%

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Figura 25 – Ensaio de compactação**



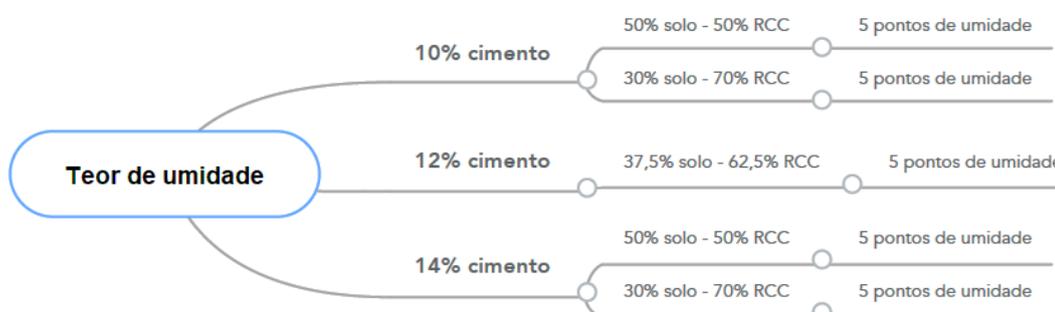
**Fonte: Autoria própria (2021).**

A NBR 12023 (ABNT, 2012g) apresenta os métodos para determinação da relação do teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo-cimento, sem reuso do material, quando compactadas com energia normal, também conhecido como ensaio de *Proctor* (Figura 25).

A norma contém dois métodos que dependem da granulometria do solo. O método A é para solos com 100% das partículas com diâmetro menor que 4,75 mm e o método B para solos com até 30% de partículas com diâmetro maior que 19 mm. Como o solo foi caracterizado como passante 100% na peneira de malha 4,75 mm, foi utilizado o método A.

Conforme o método A, foram preparados cerca de 15 kg de material para cada dosagem de solo corrigido e determinou-se o teor de umidade conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a). Para cada dosagem, dividiu-se os 15kg de material em 5 partes iguais para cada ponto da curva de compactação. Adicionou-se o cimento Portland conforme as dosagens da Tabela 21, misturando-os até homogeneidade na cor. A Figura 26 apresenta um mapa mental do experimento.

**Figura 26 – Mapa mental do ensaio do teor de umidade ótima**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

A água foi adicionada em quantidades controladas na mistura seca de cimento e solo corrigido até uniformidade, como pode ser visto na Figura 27. De forma que para cada porção da mistura seca tenha sido adicionado uma quantidade de água diferente da anterior, sendo dois no ramo seco e três no ramo úmido (ABNT, 2012g).

**Figura 27 - Solo-cimento em preparação**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 28 – Compactação do solo-cimento**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 29 - Amostra compactada com o molde**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para a compactação, o cilindro foi montado à base, com uma folha de papel filtro no fundo para evitar a aderência da amostra na base do molde. Colocou-se uma quantidade de material no molde, compactando cada camada com 26 golpes como exemplificado na Figura 28, totalizando 3 camadas, foi escarificado o topo da primeira e da segunda camada. Após a compactação das três camadas, removeu-se o colarinho e o excesso de material que não deve ultrapassar 10 mm. Rasou-se a superfície do topo do molde para deixá-la lisa e, retirou-se o molde da base e o papel filtro e pesando o conjunto como indicado na Figura 29, a massa do molde deve ser subtraída, obtendo assim a massa da amostra compactada úmida ( $m_w$ ) (ABNT, 2012g).

Para remover o corpo de prova do molde foi utilizado o extrator, em seguida o corpo de prova, exemplificado na Figura 30, foi cortado ao meio no sentido vertical para retirar uma amostra de no mínimo 100g para determinar o teor de umidade como demonstrado pela Figura 31, pesando a massa bruta úmida (recipiente mais a amostra úmida)  $m_{bu}$ . A amostra foi colocada para secar em estufa até constância da massa, pesou-se novamente a massa bruta seca (recipiente mais amostra seca)  $m_{bs}$  (ABNT, 2012g).

**Figura 30 - Corpo de prova cilíndrico de solo-cimento**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 31 - Amostra para determinação do teor de umidade após o ensaio de compactação**



Fonte: Autoria própria (2021).

O cálculo do teor de umidade da amostra compactada foi feito através da equação 1:

$$\omega = \frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} \times 100 \quad (1)$$

$\omega$  é o teor de umidade da amostra compactada (%);

$m_{bu}$  é a massa da cápsula metálica mais a amostra úmida (g);

$m_{bs}$  é a massa da cápsula mais a amostra seca (g);

$m$  é a massa da cápsula (g).

Na sequência, foi calculado a massa específica aparente da amostra compactada utilizando a equação 2:

$$\rho = \frac{m_h}{V} \quad (2)$$

$\rho$  é a massa específica aparente da amostra compactada ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_h$  é a massa da amostra compactada (g);

$V$  é o volume do molde em  $\text{cm}^3$ .

Foi calculado a massa específica aparente seca da amostra compactada pela equação 3:

$$\rho_s = \frac{\rho}{\omega+100} \times 100 \quad (3)$$

$\rho_s$  é a massa específica aparente seca da amostra compactada ( $\text{g/cm}^3$ );

$\omega$  é o teor de umidade da amostra compactada (%).

Em seguida, gerou-se um gráfico onde na abscissa foi marcado os teores de umidade ( $\omega$ ) e na ordenada a massa específica aparente seca ( $\rho_s$ ). Foi traçado uma curva de compactação, gerando uma equação parabólica. Ao derivar a equação e igualar a zero foi calculado o valor de  $x$ , que representa o teor de umidade ótima de compactação.

As Tabelas com os dados e os gráficos do ensaio de compactação para determinação do teor de umidade ótima encontram-se no Apêndice C. De forma resumida, a Tabela 22 apresenta as equações geradas pelo gráfico de compactação e os respectivos teores de umidade ótima para todas as dosagens. Observa-se que os teores de umidade ótima para a dosagem de 50/50 solo corrigido foram as mais elevadas e as dosagens com os menores teores de umidade ótima foram as que continham 30/70 solo corrigido. Por fim, o valor intermediário do teor de umidade ótima também correspondeu ao ponto central da dosagem referente a 37,5/62,5 de solo corrigido. Pode ser observado que a diferença nas dosagens de cimento resultou em pequenas mudanças no teor de umidade ótima.

**Tabela 22 – Teor de umidade ótima**

<b>Dosagem</b>	<b>Equação</b>	<b>Teor de umidade ótimo</b>
50/50 solo corrigido e 10% cimento (A)	$y = -0,0042x^2 + 0,2002x - 0,7774$	23,8%
30/70 solo corrigido e 10% cimento (B)	$y = -0,0038x^2 + 0,1564x + 0,0573$	20,6%
50/50 solo corrigido e 14% cimento (C)	$y = -0,0047x^2 + 0,2262x - 1,0976$	24,1%
30/70 solo corrigido e 14% cimento (D)	$y = -0,005x^2 + 0,2194x - 0,7469$	21,9%
37,5/62,5 solo corrigido e 12% cimento (E)	$y = -0,0029x^2 + 0,1344x + 0,0666$	23,2%

**Fonte: Autoria própria (2021).**

#### 4.5 Moldagem dos corpos de prova de solo-cimento

A execução das amostras foi orientada pela NBR 12024 (ABNT, 2012h) que instrui os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova (CP) cilíndricos. A moldagem das amostras foi executada no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Pato Branco.

A NBR 12024 (ABNT, 2012h) possui dois métodos que devem ser empregados conforme a granulometria do solo, de maneira análoga ao ensaio de compactação, foi utilizado o método A.

Foram preparados 5 kg de amostra para cada dosagem de solo/corrigido-cimento conforme apresentado na Tabela 23. A porção referente ao solo corrigido foi usada para determinar a quantidade de material para a correção.

**Tabela 23 – Dosagens executadas**

Dosagem	Massa total CP cilíndrico (g)	Cimento (g)	Solo corrigido (g)
Cimento 10% e solo corrigido 90%	5000	500	4500
Cimento 12% e solo corrigido 88%	5000	600	4400
Cimento 14% e solo corrigido 86%	5000	700	4300

**Fonte: Autoria própria (2021).**

A Tabela 24 apresenta as correções do solo nas relações de 1,0 e 2,33, para a dosagem de 10% cimento e 90% de solo corrigido.

**Tabela 24 – Correção para dosagem de cimento 10% e solo 90%**

Dosagem	Massa total solo/corrigido (g)	Solo (g)	ARM (g)
50% solo e 50% ARM (1,0)	4500	2250	2250
30% solo e 70% ARM (2,33)	4500	1350	3150

**Fonte: Autoria própria (2021).**

A Tabela 25 contém as correções do solo nas relações de 1,0 e 2,33, para a dosagem de 14% cimento e 86% de solo corrigido.

**Tabela 25 – Correção para dosagem de cimento 14% e solo 86%**

Dosagem	Massa total solo/corrigido (g)	Solo (g)	ARM (g)
50% solo e 50% ARM (1,0)	4300	2150	2150
30% solo e 70% ARM (2,33)	4300	1290	3010

Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, a Tabela 26 contém a correção do solo na relação de 1,67 para a dosagem de 12% cimento e 88% de solo.

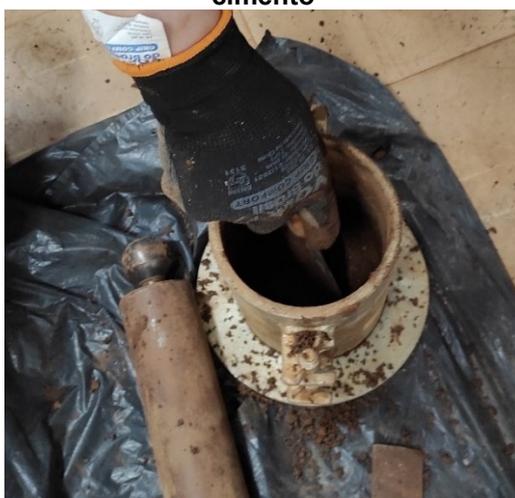
<b>Tabela 26 – Correção para dosagem de cimento 12% e solo 88%</b>			
<b>Dosagem</b>	<b>Massa total solo/corrigido (g)</b>	<b>Solo (g)</b>	<b>ARM (g)</b>
37,5% solo e 62,5% ARM (1,67)	4400	1650	2750

Fonte: Autoria própria (2021).

O solo corrigido e cimento foram misturados até a homogeneização e a água foi adicionada em quantidade suficiente para atingir a umidade ótima determinada para cada uma das dosagens, acrescentando 0,5 a 1,0 ponto percentual de umidade para considerar a perda de água por evaporação. O material foi misturado até homogeneização.

Em seguida os corpos de prova foram moldados da mesma forma que no ensaio de compactação da NBR 12023 (ABNT, 2012h). A aparelhagem necessária foi a mesma do ensaio de compactação da NBR 12023 (ABNT, 2012g), com o acréscimo de uma câmara úmida com umidade relativa do ar não inferior a 95% e temperatura de 23 °C variando  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

**Figura 32 - Execução das amostras de solo-cimento**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 33 - Extrator de corpo de prova**



Fonte: Autoria própria (2021).

Resumidamente, compactou-se 3 camadas iguais com 26 golpes em cada camada, escarificando entre a primeira e segunda camada representado pela Figura 32. Quando se colocou a segunda camada, retirou-se uma amostra de cerca de 100g que foi utilizada para determinar o teor de umidade de compactação para cada uma

das dosagens. O material sobressalente do molde foi rasado e removeu-se o molde da base juntamente com o papel filtro e o conjunto molde mais amostra compactada foi pesado subtraindo a massa do molde, obtendo-se apenas a massa da amostra compactada úmida ( $m_w$ ). Então a amostra foi extraída no extrator de corpo de prova (Figura 33).

Para todos as dosagens foi determinado o grau de compactação, pois a NBR 12024 (ABNT, 2012h) determina que deve estar entre 98% e 102% e a umidade de moldagem entre um intervalo de  $\pm 0,5$  ponto percentual da umidade ótima.

Foram moldados ao todo 25 corpos de prova (CP) cilíndricos de solo-cimento que podem ser vistos na Figura 34, seguindo as dosagens do planejamento experimental para a resistência à compressão (Tabela 19) e para a absorção de água (Tabela 20). Ou seja, foram moldadas 15 amostras para o ensaio de resistência à compressão e 10 amostras para o ensaio de absorção de água.

**Figura 34 - Amostras moldadas**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

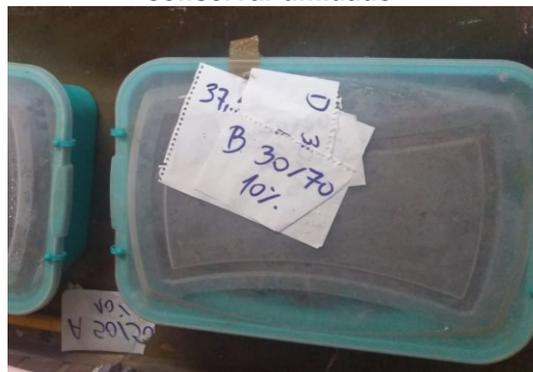
Os CP cilíndricos foram moldados e devido a fragilidade do material as amostras foram deixadas em uma superfície plana nas primeiras 12 horas, foram mantidas úmidas aspergindo água com um borrifador. Após o aumento da resistência inicial dos CP, as amostras foram colocadas em um recipiente plástico com tampa com uma lâmina d'água (Figura 35 e 36) para proporcionar a cura úmida indicada pela norma por 7 dias.

Figura 35 - Câmara úmida adaptada



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 36 - Recipiente fechado para conservar umidade



Fonte: Autoria própria (2021).

Para todas as dosagens foi determinado o grau de compactação conforme indicado pela NBR 12024 (ABNT, 2012h), os resultados encontram-se no Apêndice D.

Na Tabela 27 constam os resultados médios do teor de umidade de moldagem e a massa específica aparente seca de moldagem. O cálculo da massa específica aparente seca para a umidade ótima, foi calculado com a curva de compactação, apresentada na Tabela 22, gerada para cada dosagem com a umidade ótima correspondente ao x. O grau de compactação foi calculado multiplicando a massa específica aparente seca de cada amostra por 100 e dividindo pela massa específica aparente seca da umidade ótima, expresso em porcentagem.

Tabela 27 – Teor de umidade de compactação

Dosagem	Umidade de moldagem	Umidade ótima	Massa esp. ap. seca de calculado para umidade de moldagem (g/cm <sup>3</sup> )	Massa esp. ap. seca moldagem (g/cm <sup>3</sup> )	Grau de compactação
50/50 solo corrigido e 10% cimento (A)	24,3%	23,8%	1,593	1,608	99%
30/70 solo corrigido e 10% cimento (B)	21,2%	20,6%	1,668	1,667	100%
50/50 solo corrigido e 14% cimento (C)	24,2%	24,1%	1,586	1,624	98%
30/70 solo corrigido e 14% cimento (D)	21,7%	21,9%	1,633	1,660	98%
37,5/62,5 solo corrigido e 12% cimento (E)	22,8%	23,2%	1,616	1,624	99%

Fonte: Autoria própria (2021).

Como indicado pela norma o grau de compactação deve estar entre 98% e 102% e a umidade de moldagem entre um intervalo de  $\pm 0,5$  ponto percentual da umidade ótima. Observa-se que apenas a amostra da dosagem B ficou com a umidade de moldagem um pouco fora do limite da umidade ótima, porém apresentou o grau de compactação em 100%. As demais dosagens apresentaram o teor de umidade e o grau de compactação dentro dos limites indicados em norma.

#### **4.6 Ensaaios de qualidade**

Os ensaios de qualidade foram executados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no Campus de Pato Branco. Foi utilizada a NBR 12025 (ABNT, 2012i) que apresenta os métodos de ensaio para a determinação da resistência à compressão e absorção de água de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento.

##### **Resistência à compressão simples:**

O ensaio de resistência à compressão (Figura 37) foi realizado pelo laboratório de materiais de construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Pato Branco e o relatório do ensaio encontra-se no Anexo C. As amostras foram ensaiadas aos 28 dias de idade, na condição saturada após 4 horas imersos.

**Figura 37 - Ensaio de resistência à compressão**



Fonte: Autoria própria (2021).

A NBR 12025 (ABNT, 2012i) estabelece os métodos de ensaio de compressão simples do solo-cimento para corpos de prova cilíndricos. Esse método serve tanto para a determinação em laboratório do teor de cimento como para a estabilizado do solo para o controle de qualidade do solo-cimento em obra.

#### **Absorção de água:**

A NBR 13555 (ABNT, 2013b) traz o método de ensaio da absorção de água para corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. a aparelhagem utilizada foi uma balança com capacidade de 10 kg, tanque para imersão dos corpos de prova e uma estufa com temperaturas entra 105°C e 110°C.

Após o período de cura as amostras foram levadas na estufa até constância da massa e pesadas para determinar a massa seca ( $m_1$ ). Em seguida, as amostras foram imersas em água por 24h, conforme Figura 38 e novamente foram pesados após esse período para determinar a massa úmida ( $m_2$ ).

O cálculo de absorção foi feito com a equação 4:

$$A \% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

**Figura 38 - Amostras de solo-cimento imersas em água**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Resultados

Os ensaios de resistência à compressão e absorção de água seguiram conforme estabelecido na metodologia pelo planejamento experimental completo 2<sup>2</sup>. As variáveis independentes foram a dosagem do cimento e a relação solo/corrigido com ARM. E as variáveis dependentes foram a resistência à compressão e absorção de água. O intervalo de confiança foi de 95% e o valor p menor que 0,05.

#### 5.1.1 Resistência à compressão

A Tabela 28 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão. Os valores de referência variam conforme o emprego do solo-cimento. A NBR 11798 (ABNT, 2012d) traz os requisitos para utilização do solo-cimento como material de base de estradas, orienta que a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura deve ser de no mínimo 2,1MPa. A nomenclatura apresentada na Tabela 28 possui três dígitos, o primeiro refere-se as dosagens A, B, C, D e E da Tabela 27 utilizada na moldagem das amostras. O R refere-se ao ensaio de resistência à compressão. E os números 1, 2 e 3 é referente a repetição do ensaio.

Observa-se que os CP que não atingiram a resistência mínima foram os feitos com 50% de ARM e 50% de solo, e o teor de cimento de 10%. A mesma relação de ARM/solo com o teor de cimento de 14% proporcionou o alcance da resistência à compressão mínima exigido em norma. Sendo os melhores resultados proporcionados pela maior relação de 70% de ARM e 30% solo e 14% de cimento.

**Tabela 28 – Delineamento experimental: Resistência à compressão**

Nomenclatura	Cimento	Relação ARM/Solo	Resistência à compressão (MPa)
AR1	10%	1,00	1,38
BR1	10%	2,33	2,43
CR1	14%	1,00	2,53
DR1	14%	2,33	3,43
ER1	12%	1,67	2,54
AR2	10%	1,00	1,68
BR2	10%	2,33	2,36
CR2	14%	1,00	2,39
DR2	14%	2,33	3,28
ER2	12%	1,67	2,58
AR3	10%	1,00	1,53
BR3	10%	2,33	2,58
CR3	14%	1,00	2,23
DR3	14%	2,33	3,39
ER3	12%	1,67	2,60

EX: AR1 – Dosagem A e ensaio de resistência à compressão R, amostra 1.

**Fonte: Autoria própria (2021).**

A Tabela 29 contém a ANOVA que foi gerada permitindo uma análise das significâncias dos fatores analisados sobre a variável resposta de resistência à compressão. Conforme indicado pela ANOVA a dosagem de cimento e a relação de solo e ARM são estatisticamente significativas ( $p$ -valor  $<5\%$ ), ou seja, rejeitamos a hipótese nula de igualdade de média, isso significa que a resistência à compressão nos diferentes níveis não são todas iguais. E a interação entre as variáveis não foi significativa ( $p$ -valor  $>5\%$ ), ou seja, em uma ação conjunta não produzem um efeito significativo na variável resposta. Dessa forma, investiga-se apenas os efeitos do ARM/solo e do cimento.

O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) é o valor do ajuste da equação dos efeitos e foi estimado em 0,9665, isso significa que 96,65% da variação total em torno da média é explicada pela regressão e ficando apenas 3,35% para os resíduos. Quanto mais próximo de 1 for o  $R^2$  melhor é o meu modelo, ou seja, aproximadamente 96,65% da variabilidade em  $y$  é explicada pela variabilidade em  $x$ .

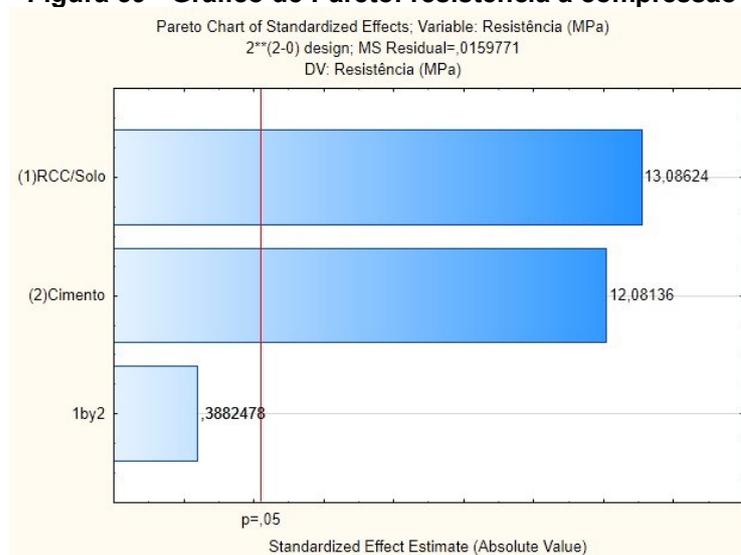
Tabela 29 – ANOVA: Resistência à compressão

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	p-valor
(1) ARM/Solo	2,736075	1	2,736075	171,2496	0,000000
(2) Cimento	2,332008	1	2,332008	145,9592	0,000000
(1) x (2)	0,002408	1	0,002408	0,1507	0,705241
Erro	0,175748	11	0,015977		
Soma total	5,246240	14			

Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 39 apresenta o gráfico de Pareto que representa quais variáveis produzem ou não efeitos significativos na variável resposta, neste caso, na resistência à compressão. A linha vermelha a representação do p-valor, tudo o que passa dessa linha é significativo. Observa-se em ordem decrescente que o fator que mais significativa na resistência à compressão é a relação de ARM e solo. E novamente, observa-se que a interação dos fatores não é significativa.

Figura 39 - Gráfico de Pareto: resistência à compressão

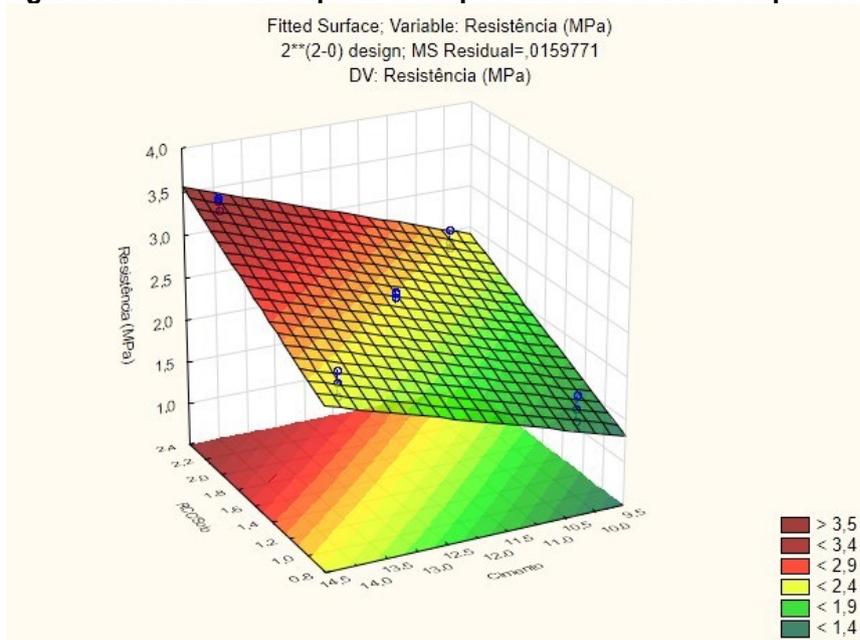


Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 40 apresenta o gráfico dos preditos que são dos dados gerados pelo modelo versus observados que são os dados experimentais, para os resultados da resistência à compressão, sendo a linha representada pelo modelo e os pequenos círculos os dados experimentais. É possível observar que embora haja algumas distorções entre o modelo e os dados do ensaio representada pelos desvios entre os



**Figura 41 - Gráfico de superfície resposta: resistência à compressão**



Fonte: Autoria própria (2021).

### 5.1.2 Absorção de água

A Tabela 30 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água. Os valores de referência também variam conforme o emprego do solo-cimento. A NBR 11798 (ABNT, 2012d) que trata dos requisitos para material de base de solo-cimento, não possui indicação para os limites de absorção de água. Então adotou-se os valores estabelecidos pela NBR 10834 (ABNT, 2012f), que apresenta os requisitos para tijolos e blocos de solo-cimento e orienta que nenhum dos valores individuais deve ser maior que 22% com idade mínima de 7 dias, e a absorção média deve ser menor que 20%.

De forma similar a resistência à compressão, as amostras que não se enquadram na absorção de água máxima foram com a relação de 50% de ARM e 50% de solo e 10% de cimento com uma média de 22,66% de absorção de água. E as amostras com 70% de ARM e 30% de solo e 14% de cimento apresentaram as menores absorções, cerca de 18,13%, variando pouco menos de 1,38% de comparado a mistura com a mesma relação de ARM/solo e 10% de cimento, com cerca de 19,51%. A nomenclatura apresentada na Tabela 30 possui três dígitos, o primeiro refere-se as dosagens A, B, C, D e E da Tabela 27 utilizada na moldagem das amostras. O A refere-se ao ensaio de absorção de água. E os números 1 e 2 é referente a repetição do ensaio.

**Tabela 30 – Delineamento experimental: Absorção de água**

Nomenclatura	Cimento	Relação ARM/Solo	Absorção de água (%)
AA1	10%	1,00	22,63%
BA1	10%	2,33	19,80%
CA1	14%	1,00	21,42%
DA1	14%	2,33	17,99%
EA1	12%	1,67	21,39%
AA2	10%	1,00	22,69%
BA2	10%	2,33	19,22%
CA2	14%	1,00	21,85%
DA2	14%	2,33	18,26%
EA2	12%	1,67	20,87%

EX: AA1 – Dosagem A e ensaio de absorção de água A, amostra 1.

**Fonte: Autoria própria (2021).**

A Tabela 31 apresenta a ANOVA, que permite avaliar a significância dos fatores analisados sobre a variável resposta de absorção de água. De acordo com os valores obtidos na ANOVA, observa-se que os fatores de cimento e ARM/solo são estatisticamente significativos ( $p$ -valor  $<5\%$ ), ou seja, rejeitamos a hipótese nula de igualdade de média, isso significa que a absorção de água nos diferentes níveis não são todas iguais. E a interação entre as variáveis não foi significativa ( $p$ -valor  $>5\%$ ).

**Tabela 31 – ANOVA: Absorção de água**

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	p-valor
(1) ARM/Solo	22,17780	1	22,17780	1204323	0,000034
(2) Cimento	2,90405	1	2,90405	15,7699	0,007357
(1) x (2)	0,06480	1	0,06480	0,3519	0,574712
Erro	1,10491	6	0,18415		
Soma total	26,25156	9			

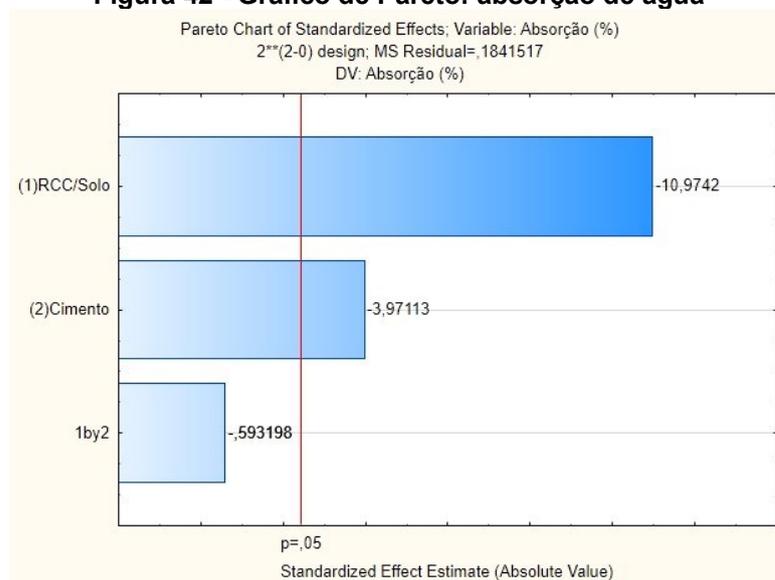
**Fonte: Autoria própria (2021).**

O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) é o valor do ajuste da equação dos efeitos e foi estimado em 0,95791, quanto mais próximo de 1 melhor é o modelo. Como o coeficiente de correlação ficou próximo de 1, significa que o modelo ficou aproximadamente 95,79% da variabilidade em  $y$  é explicada pela variabilidade em  $x$ .

A Figura 42 apresenta o gráfico de Pareto que representa quais variáveis produzem ou não efeitos significativos na variável resposta absorção de água. A linha vermelha a representação do  $p$ -valor, tudo o que passa dessa linha é significativo. De

maneira similar aos resultados da resistência à compressão, observa-se em ordem decrescente que o fator que mais significativa na absorção de água é a relação de ARM e solo. E novamente, observa-se que a interação dos fatores não é significativa.

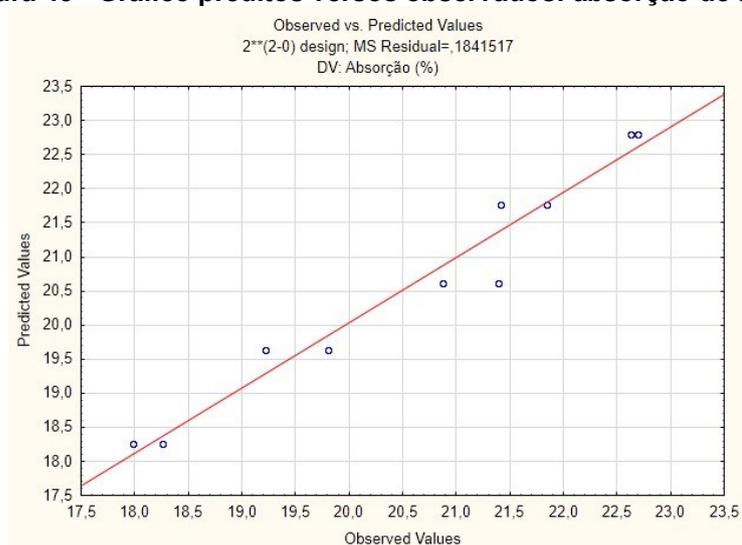
**Figura 42 - Gráfico de Pareto: absorção de água**



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 43 apresenta o gráfico dos preditos que são dos dados gerados pelo modelo versus observados que são os dados experimentais para os resultados da absorção de água, sendo a linha representada pelo modelo e os pequenos círculos os dados. É possível observar que houveram distorções entre o modelo e os dados do ensaio representada pelos desvios entre os valores observados e o modelo, os pontos de distribuíram melhor ao longo da linha do modelo.

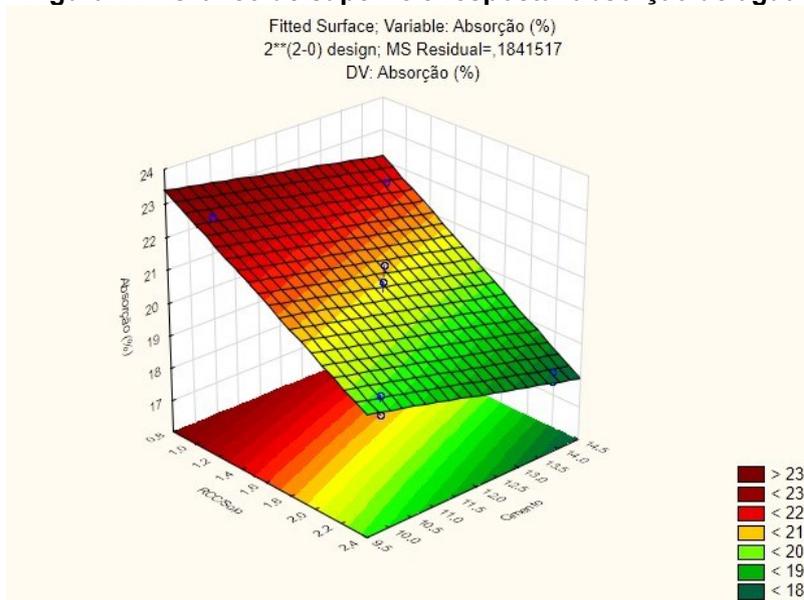
**Figura 43 - Gráfico preditos versus observados: absorção de água**



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 44 apresenta o gráfico de superfície resposta do ensaio de absorção de água. No eixo x (cimento) e y (RCD/solo) encontram-se os fatores avaliados que foram o cimento e a relação de ARM/solo e no eixo z a variável resposta que foi a absorção de água. Observa-se que da mesma forma que na superfície resposta da resistência à compressão, quanto maior os valores da relação de ARM e solo e maior a dosagem de cimento ocorreram os menores valores de absorção de água. E maiores dosagens de cimento e menor a relação de ARM/solo não produzem tanto efeito na absorção de água.

**Figura 44 - Gráfico de superfície resposta: absorção de água**



Fonte: Autoria própria (2021).

## 5.2 Discussões

Os resultados médios para resistência à compressão e absorção de água encontram-se na Tabela 32. A relação de ARM/solo de 50/50 e 10% de cimento foi a única dosagem que não atingiu a resistência à compressão mínima de 2,1 MPa aos 28 dias, sendo 1,53 MPa a média da resistência à compressão dos CPs. Essa dosagem extrapolou a máxima admissível para absorção de água de 22%, ficando com 22,66%. Ao aumentar a dosagem de cimento para 14% e manter a relação 50/50 para o ARM/solo, foi observado um aumento na resistência à compressão para 2,38

MPa e a absorção de água reduziu para 21,64%, isso possibilita o enquadramento da dosagem da relação 50/50 de ARM/solo aos valores exigidos em normas. Os resultados do ponto central, respectivamente 62,5/37,5 de ARM/solo e 12% de cimento apresentaram resistência à compressão média de 2,57 MPa e absorção de água de 21,13%. De forma similar, as dosagens com relação de 70/30 de ARM/solo para o teor de 10% de cimento apresentaram a resistência à compressão de 2,46 MPa e absorção de água 19,51% e para o teor de 14% de cimento a resistência à compressão foi de 3,37 Mpa e a absorção de água foi de 28,13%.

**Tabela 32 – Resultados médias para resistência à compressão e absorção de água**

Dosagem	Resistência à compressão média (MPa)	Absorção de água (%)
50/50 solo corrigido e 10% cimento (A)	1,53	22,66
30/70 solo corrigido e 10% cimento (B)	2,46	19,51
50/50 solo corrigido e 14% cimento (C)	2,38	21,64
30/70 solo corrigido e 14% cimento (D)	3,37	18,13
37,5/62,5 solo corrigido e 12% cimento (E)	2,57	21,13

**Fonte: Autoria própria (2021).**

Considerando que o valor mais restritivo das normas para a resistência à compressão foi de 2,1MPa, observa-se que apenas a amostra com 10% de cimento e a correção do solo com 50% de solo e 50% de ARM ficou fora do mínimo exigido em norma apresentando um valor médio de resistência à compressão de 1,53MPa.

De forma análoga, o valor mais restritivo para a absorção de água indicado pelas normas foi de 22% para os valores individuais e 20% para as médias, observa-se que a dosagem que ultrapassou o limite de absorção de água também foi para 10% de cimento e 50% de solo e 50% de ARM, apresentando os valores individuais de 22,63% e 22,69% e a média de 22,66%.

Percebe-se que quanto maior a relação de ARM/solo e da dosagem de cimento na mistura melhor foram os resultados do ensaio de resistência à compressão e de absorção de água. Porém, verificando os resultados de maneira individual, o aumento do ARM/solo foi mais significativo do que o aumento da dosagem de cimento.

Embora os melhores resultados de resistência à compressão e absorção de água foram para a relação de 30/70 de solo corrigido e 14% de cimento, isso não significa que essa é a dosagem ideal, uma vez que ela ultrapassou os limites da NBR

11798 (ABNT, 2012d) para a resistência à compressão simples deve ser de no mínimo 2,1MPa e a NBR 10834 (ABNT, 2012f) a absorção média deve ser menor que 20%.

As propriedades do solo mais indicados para a produção do solo-cimento, são os que apresentam um teor de areia de 65% e um teor de argila de 10%. Mas isso não impossibilita a utilização de solos argilosos, que podem ser empregados desde que sejam corrigidos adicionando materiais com uma granulometria maior, como areia, pó de rocha, resíduos sólidos processados, entre outros. Contudo, existem alguns solos que não são indicados para fabricação de solo-cimento, como os solos que contenham muita matéria orgânica, que são expansivos e aqueles que contém sais solúveis em excesso (DIVYA *et al.*, 2017).

Outro ponto importante que precisa ser controlado é o volume de água na mistura, a água na quantidade certa fará o aglomerante (cal ou cimento) reagir e hidratar totalmente, porém quando adicionado em excesso, uma parte não é utilizada nas reações químicas do cimento, aumentando a porosidade e reduzindo a resistência final do material (DIVYA *et al.*, 2017).

O estudo de Silveira e Nóbrega (2006), utilizou um solo classificado segundo a D-3282 como A-6, com LL de 31%, LP de 19% e IP de 12% e a fração menor 0,002 mm (fração de argila) de 36%. Incorporou ARM em duas misturas de resíduo-solo nas diluições de 75% e 100%, utilizou o cimento CP II-E com um teor de 8% de cimento em massa. A cura foi feita por 7, 28, 60 e 90 dias e o solo-cimento foi ensaiado para determinar a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Na pesquisa, todas as amostras ultrapassaram a resistência mínima de 2,1 MPa. De forma similar, a absorção de água manteve-se abaixo dos 20%.

Na pesquisa desenvolvida por Reis e Matos (2017) produziram tijolos de solo-cimento com RCD. O solo utilizado na pesquisa apresentava composição granulométrica era de 22% de argila, 4,6% de silte e 73,4% de areia. O solo foi considerado como não plástico pois não foi possível determinar o LL e LP. Utilizaram três teores de cimento 8%, 10% e 12%, e realizaram a substituição da massa de solo por RCD em 25% e 50%. O autor não atingiu a resistência à compressão mínima aos 28 dias, entretanto a absorção de água para todas as dosagens atendeu à máxima indicada em norma. O aumento de cimento na mistura melhorou a resistência a compressão dos tijolos e as composições de 25% de RCD e 12% de cimento

apontaram os melhores resultados, porém isso só foi atendido ao ensaiar a resistência à compressão aos 56 dias para uma composição.

No trabalho de Silva *et al.* (2014) utilizaram um solo com LL de 28,40%, LP de 17,8% e IP de 10,6%. Incorporaram resíduos cerâmicos ao solo-cimento utilizando os teores de cimento CP II-F e cal hidratada em relação a massa de solo de 8%, 10% e 12% e os teores de resíduos cerâmicos adicionados relativos à massa de solo foi de 2% e 4%. As melhores resistências à compressão e absorção de água foram com 2% e 4% de RCD, porém combinando cimento e cal como aglomerante com os percentuais de 8%, 10% e 12%.

Por fim, Segantini e Wada (2011) utilizaram um solo classificado como A-4 arenoso fino, com 21,8% de argila, 20,2% de silte e 57,7% de areia, e o LL de 27,7%, LP de 18,3% e IP de 9,4%. Realizaram um estudo de dosagem de solo-cimento, iniciou utilizando o cimento CP II-Z nos teores de 6%, 8% e 10% na fabricação de solo-cimento com RCD com 20% e 40%. Após avaliarem os resultados concluíram que poderiam trabalhar com 6% de cimento e também adotar incorporações de RCD maiores que 40%, então na segunda fase adotaram a incorporação de RCD na ordem de 60, 80 e 100% em relação a massa de solo, e o teor de cimento ficou entre 2% e 4%. Para verificar a qualidade do solo-cimento, utilizaram o ensaio de resistência à compressão. Os melhores resultados foram com 4% de cimento, com adição de no mínimo 20% de RCD e até 100% de RCD em relação a massa de solo.

Os resultados dessa pesquisa foram no geral satisfatórios quando comparado aos requisitos das normas quanto a resistência à compressão e absorção de água. Apenas uma dosagem ficou fora dos limites, porém ao aumentar o teor de cimento o solo-cimento ficou dentro dos limites de qualidade.

A dosagem com a relação de 70/30 de ARM/solo e 10% de cimento apresentou a resistência à compressão e absorção de água mais próxima dos limites. Demonstrando que um aumento na incorporação de ARM na mistura de solo-cimento, além de melhorar as características, proporciona o aproveitamento do material de forma significativa.

O solo-cimento é um material versátil que pode ser aplicado na execução de pisos, seja na pavimentação rodoviária ou urbana; com o emprego de solo-cimento ensacado para reduzir a erosão ocasionada pela água no reforço de encostas, revestimentos de canais, proteção de saídas de água em galerias, entre outros; na

construção de paredes monolíticas ou então para o levantamento de alvenaria no formato de blocos ou tijolos (ABCP, 1996).

Embora a metodologia utilizada nessa pesquisa tenha sido baseada na NBR 12253 de 2012 que determina o procedimento de dosagem para emprego do solo-cimento como camada de pavimento, isso não impede a utilização dessa dosagem na fabricação outros produtos de solo-cimento, uma vez que os valores de referência para a resistência à compressão e absorção de água utilizados foram os mais restritivos entre as normas técnicas de solo-cimento.

Para o emprego do solo-cimento como material de base de estradas, a NBR 11798 (ABNT, 2012d) orienta que a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura deve ser de no mínimo 2,1MPa. A norma não possui indicação para os limites de absorção de água.

Com a finalidade de empregar o solo-cimento em parede monolítica, a NBR 13553 (ABNT, 2012k) indica que a resistência à compressão simples, aos sete dias, deve ser igual ou maior que 1,0MPa. A norma estabelece que a absorção de água deve ser igual ou inferior a 20%.

Para os tijolos e blocos de solo-cimento a NBR 10834 (ABNT, 2012f) apresenta para a resistência à compressão que nenhum dos valores individuais deve ser menor que 1,7MPa com idade mínima de 7 dias, e a resistência média deve ser maior que 2,0MPa. E para a absorção de água nenhum dos valores individuais deve ser maior que 22% com idade mínima de 7 dias, e a absorção média deve ser menor que 20%.

Supondo que uma fábrica de tijolos de solo-cimento utilize a dosagem de 70/30 de ARM/solo com o teor de cimento de 10%, considerando que essa dosagem atendeu aos valores de referência da NBR 10834 (ABNT, 2012f) para a produção de tijolos e blocos de solo-cimento. Considerando uma produção diária de 1200 unidades de tijolos de solo-cimento feitos com uma prensa manual profissional modelo Transformer 12,5x25 da marca Sahara. Cada unidade, segundo o fabricante pesa em média 2,5 kg, um tijolo utilizaria cerca de 250 g de cimento, 675 g de solo e 1575 g de ARM. Em um dia, seriam utilizados cerca de 1890 kg de ARM (AGUILAR, 2022).

Ainda segundo o fabricante das prensas de tijolos e blocos de solo-cimento Sahara, para a construção de uma casa térrea de aproximadamente 52 m<sup>2</sup> são

utilizados cerca de 10 milheiros, ou seja, 10.000 unidades de tijolos, isso corresponde a 15.750 kg de ARM que seriam reintroduzidos no sistema produtivo.

A pesquisa de Restelli *et al.* (2018) avaliou a viabilidade econômica de implantação de uma fábrica de tijolos de solo-cimento. Os autores consideraram uma fábrica com a capacidade de produzir 3.000 unidades/dia, ou seja, 60.000 unidades/mês, porém ao aplicar o cenário mais provável de 70% da produção total estimada, a produção média esperada, considerando um volume de vendas foi estimado de 42.000 unidades/mês. Isso corresponde aproximadamente a 504.000 unidades/ano.

De acordo com a dosagem ideal determinada nessa pesquisa, considerando a produção anual analisada por Restelli *et al.* (2018), resultaria em um consumo de aproximadamente 793,8 toneladas de resíduos de construção civil em um ano.

De forma análoga, supondo que a melhor dosagem de 10% de cimento e 2,33 de ARM/solo seja utilizada na execução de pavimento flexível. Para isso, foi considerado a pesquisa de Monte (2012), que realizou um estudo de caso em uma estrada de aproximadamente 9km em Portugal, parte feita com uma camada de solo-cimento e parte sem. A área total de pavimento executado foi de 213.000 m<sup>2</sup>, sendo metade a área de pavimento que foi utilizado o solo-cimento como camada base, ou seja, 106.500m<sup>2</sup>. A espessura da camada de solo-cimento foi de 25cm de espessura.

A massa específica aparente seca máxima para a dosagem de 10% de cimento e a relação 2,33 de ARM/solo foi de 1,668 g/cm<sup>3</sup>. Ou seja, para o trecho de pavimento flexível com base de solo-cimento com área de 106.500m<sup>2</sup> e 25cm de espessura, seriam empregues 27.979 toneladas de RCD.

Segundo Monte (2012) a utilização do solo-cimento forneceu uma economia de 20% no comparativo com o pavimento flexível executado sem a camada de solo-cimento, permitiu um aumento de cerca de sete vezes o número de eixos padrão admissíveis de projeto para a estrada e proporcionou uma diferença de 18% na espessura total do pavimento.

O setor da construção civil é o responsável por cerca de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos E no Brasil em 2018, foram geradas cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Estima-se que cerca 40,5% dos resíduos gerados foram despejados em locais inadequados por 3.001 municípios. Esses locais inadequados são considerados os lixões e aterros controlados, que não possuem um

sistema de gestão eficiente com medidas necessárias para proteger a saúde e o meio ambiente. A carência de um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos resulta na deficiência das exigências e fiscalização acerca dos RCD (ABRELPE, 2019; BRASIL, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

A reintrodução dos RCD no sistema produtivo para a correção de solos argilosos na fabricação de solo-cimento apresentou resultados satisfatórios. A dosagem de 70/30 de ARM/solo e 10% de cimento demonstrou ser a melhor entre as dosagens avaliadas. A aplicação dessa dosagem para outras aplicações precisa ser avaliada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi constatado que a correção do solo argiloso com ARM proveniente de uma usina recicladora de RCD demonstrou-se eficiente na produção de solo-cimento. A maior relação de ARM/solo adicionado na mistura apresentou os melhores resultados de resistência à compressão e absorção de água, juntamente com dosagens mais altas de cimento.

Após a caracterização do solo natural foi confirmado a necessidade de correção para o emprego na produção de solo-cimento, de forma que o teor de argila mais silte passasse de 94,4% para um valor entre 10% a 50%. E a classificação segundo a ASTM D 3282 que era A-7 precisava apresentar a classifica A1, A2 ou A4. Após a incorporação dos ARM na correção do solo argiloso nas proporções de ARM/solo de 50/50, 62,5/37,5 e 70/30, o solo corrigido atingiu as características indicadas para a utilização no solo-cimento.

Os teores de cimento definidos foram 10%, 12% e 14%. Após o planejamento experimental, definiu-se cinco dosagens de solo corrigido e cimento, que foram 10% de cimento e 50/50 de ARM/solo, 14% de cimento e 50/50 de ARM/solo, 10% de cimento e 70/30 de ARM/solo, 14% de cimento e 70/30 de ARM/solo e 12% de cimento e 62,5/37,5 de ARM/solo.

Apenas a dosagem com 10% de cimento e 50/50 de ARM/solo obteve 1,53MPa de resistência à compressão e 22,66% de absorção de água, não atingindo os valores de referência para a resistência à compressão de 2,1 MPa e absorção de água de 20%. E a dosagem com a relação de 70/30 de ARM/solo e 10% de cimento apresentou a resistência à compressão de 2,46 MPa e absorção de água de 19,51%, apresentando os valores mais próximos dos limites, representando o melhor custo-benefício das dosagens avaliadas.

### 6.1 Perspectiva para trabalhos futuros

Como o solo-cimento apresenta uma ampla variedade de aplicações, apresenta-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Estudo de menores dosagens de cimento para a relação de solo corrigido de 2,33;

- Execução de blocos ou tijolos de solo-cimento feitos com 10% de cimento e a relação de 2,33 ARM/solo;
- Comparação de amostras no formato cilíndrico e no formato de blocos ou tijolos;
- Estudo da variabilidade do ARM de RCD provenientes de usina recicladora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, F. **Tijolos ecológicos Solo Cimento**, 2022. Disponível em: <<https://www.jarfel.com.br/informativos/tijolo-ecologico-solo-cimento.php>>. Acesso em: 1 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP BT-106**: Guia básico de utilização do cimento portland. São Paulo: ACBP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP BT-110**: construção de paredes monolíticas com solo-cimento compactado. São Paulo: ACBP, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP BT-111**: Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo: ACBP, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP BT-117**: o solo-cimento e suas aplicações rurais. São Paulo: ABCP, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ABCP ET-35**: Dosagem das misturas de solo-cimento. São Paulo: ACBP, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. 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 12253**: solo-cimento: dosagem para emprego em camada de pavimento: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8491**: tijolo de solo-cimento: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10833**: fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11798**: materiais para base de solo-cimento: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8492**: tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10834**: bloco de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12023**: solo-cimento: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012g.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12025**: solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012i.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13554**: solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012j.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13553**: materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012k.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10836**: bloco de solo-cimento sem função estrutural: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13555**: solo-cimento: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16174**: solo-cimento: determinação do teor de cimento em misturas fresca de solo-cimento: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013c.

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 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABRECON. **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção**

civil, 2011. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil/>>. Acesso em: 23 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA. **ABRELPE. Panorama dos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019, p. 68. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 23 out. 2021.

AFAJ, H. ADNAN HASSN. Effect of Creep Rate on Behavior of Clay: Cement Soil. **International Journal of Advanced Research**, India, v. 6, n. 3, 2018, p. 1352–1362.

ANJUM, T. *et al.* Production of soil-cement bricks using sludge as a partial substitute. **Earth Science Malaysia (ESMY)**, Malasia, v. 1, n. 2, 2017, p. 10–12.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 558*: standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures. West Conshohocken: ASTM, 2011.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1632*: Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory. West Conshohocken: ASTM, 2017.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1633*: Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. West Conshohocken: ASTM, 2017.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1635*: standard test method for flexural strength of soil-cement using simple beam with third-point loading. West Conshohocken: ASTM, 2019.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5982*: Standard test method for determining cement content of fresh soil-cement (heat of neutralization method). West Conshohocken: ASTM, 2015.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 559*: Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. West Conshohocken: ASTM, 2015.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 806*: Standard test method for cement content of hardened soil-cement mixtures. West Conshohocken: ASTM, 2019.

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3282-14*: standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. West Conshohocken: ASTM, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6. ed, v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2019a.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6. ed., v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2019b.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para

engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2006.

BEUTLER, C. S. **Estudo da adequabilidade do uso de areia de fundição e cimento supersulfatado em blocos de solo-cimento**. 2017. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento acadêmico de construção civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

BRASIL. Congresso Nacional. **Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 01 abr. 2021.

BRASIL, Ministério das cidades. **Área de manejo de resíduos da construção civil e resíduos volumosos**. Brasília, DF: Ministérios das cidades, 2005. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/12813>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 2 de 9 de outubro de 2008**. Brasília, DF: Ministérios da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2008. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/documentos/INn2de09.10.2008.pdf>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

BRISKIEVICZ, J. F. **Avaliação das propriedades de blocos de solo-cimento utilizando resíduos cerâmicos de construção civil**. 2018. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento acadêmico de construção civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

*British Standards Institution*. 1924-2: Hydraulically bound and stabilized materials for civil engineering purposes Sample preparation and testing of materials during and after treatment. West Conshohocken: 2018.

CADORIN, D. A.; MELLO, N. A. DE; MONTEMEZZO, E. Aspectos químicos e morfológicos dos solos urbanos utilizados pelas espécies *Lagerstroemia indica* L., *Schinus molle* L. e *Bauhinia variegata* L.: em três bairros da cidade de Pato Branco-PR. **REVSBAU**, Piracicaba, v. 8, n. 3, 2013, p. 39–51. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/66427>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6. ed., v. 2 Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CBIC. **Estabelecimentos na Construção Civil por Tamanho**, 2020. Disponível em: <[http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/tabela\\_10.B.02\\_5.xlsx](http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/tabela_10.B.02_5.xlsx)>. Acesso em: 01 ago. 2022.

CONAMA. **Resolução nº 307**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: DF, 2002. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=108894>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

DIVYA, S. *et al*. Experimental study of soil cement bricks and characteristics

compressive strength of brick masonry wall. 6 ed NATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE PRACTICES IN CONSTRUCTION AND WASTE MANAGEMENT. **Anais...** Coimbatore, Tamil nadu: International Journal of Engineering Research and Modern Education, 2017. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/144779646.pdf>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

EMBRAPA. **Mapa de solos do estado do Paraná**, 2020. Disponível em: <[http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana\\_solos\\_20201105](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana_solos_20201105)>. Acesso em: 28 ago. 2022.

HOSSAIN, A. S. M. F. *et al.* Observation of the behavior of organic soil by adding lime, fly ash and cement. **Journal of Advances in Geotechnical Engineering**, v. 2, n. 3, 2019, p. 1–5. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/A-S-M-Hossain-2/publication/336021568\\_Observation\\_of\\_the\\_Behavior\\_of\\_Organic\\_Soil\\_by\\_Adding\\_Lime\\_Fly\\_Ash\\_and\\_Cement/links/5d8b361e299bf10cff0b7274/Observation-of-the-Behavior-of-Organic-Soil-by-Adding-Lime-Fly-Ash-and-Cement.pdf](https://www.researchgate.net/profile/A-S-M-Hossain-2/publication/336021568_Observation_of_the_Behavior_of_Organic_Soil_by_Adding_Lime_Fly_Ash_and_Cement/links/5d8b361e299bf10cff0b7274/Observation-of-the-Behavior-of-Organic-Soil-by-Adding-Lime-Fly-Ash-and-Cement.pdf)>. Acesso em: 11 setembro 2022.

IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção**, 2019. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=754>>. Acesso em: 10 abr. 2022.

IBGE. **Portal de Mapas do IBGE**, 2021. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa223417>>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ISAIA, G. C. **Concreto : ciência e tecnologia**. 1. Ed, São Paulo: IBRACON, 2011.

ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio**, 2021. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

JÚNIOR, J. *et al.* Comparative study of plans for integrated residue management of construction: an analysis documental. **Journal of research fundamental care on line**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 6, 2013, p. 382–389. Disponível em: <<https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/54928>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

LEONEL, R. F. *et al.* Caracterização de tijolos de solo-cimento com incorporação de areia descartada de fundição. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, 2017, , p. 329–335. Disponível em: <<https://www.scielo.br/jj/ce/a/WTnBLWTybWskcKvFvz7F7vr/?format=pdf&lang=en>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

LIMA, T. V; ALEXANDRE, J. Estabilização de três solos argilosos para a produção de blocos ecológicos (solo-cimento). ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE. **Anais...** Salvador: ENTAC, 2006.

LINARES-UNAMUNZAGA, A. *et al.* New procedure for compacting prismatic specimens of cement-treated base materials. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 8, n. 6, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/6/970>>. Acesso em: 11

setembro 2022.

LINARES-UNAMUNZAGA, A. *et al.* Flexural strength prediction models for soil-cement from unconfined compressive strength at seven days. **Materials**, v. 12, n. 3, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/3/387>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

MONTE, M. A. V. Do. **Aplicação de solo-cimento em pavimentos flexíveis**, 2012, 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68251/1/000154750.pdf>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

MOTTA, J. C. S. S. *et al.* Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **E-Xacta**, Belo Horizonte, v. 7, n. 2014, 2014, p. 13–26. Disponível em: <<https://revistas.unibh.br/dcet/article/view/1038> >. Acesso em: 11 setembro 2022.

OLIVEIRA, L. J. C. *et al.* Gestão de resíduos: uma análise sobre os impactos da geração de rejeitos na construção civil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 5, 2020, p. 24447–24462. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/9550>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

PASCHOALIN, J. A.; STOROPOLI, J. H.; DIAS, A. J. G. Evaluation of compressive strength and water absorption of soil-cement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 38, n. 2, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/28458>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

PEDROSA, P. F. *et al.* Avaliação tecnológica de misturas de solo-cimento com resíduos da indústria de pneus recauchutados para a produção de tijolos. CONGRESSO ANUAL DA ABM. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2017. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/avaliacao-tecnologica-de-misturas-de-solo-cimento-com-residuos-da-industria-de-pneus-recauchutados-para-a-producao-de-tijolos> >. Acesso em: 11 setembro 2022.

PITTA, M. R. Solo-cimento para revestimento de barragens de terra, diques e reservatórios. **ABCP**, n. 4ª edição, 2000, p. 1–20. Disponível em: <<https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/ET-34.pdf>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

PREFEITURA DE FLORIANÓPOLIS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: PMGIRS**, 2017. Disponível em: <<https://www.pmf.sc.gov.br/sistemas/pmgirs/>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

REIS, L. R. DE M.; MATOS, J. M. E. DE. **Utilização de resíduos da construção e demolição na fabricação de tijolos de solo-cimento**, 2017, 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Piauí, Piauí, 2017.

RESTELLI, R. *et al.* Análise de viabilidade econômica da implantação de uma fábrica de tijolos de solo-cimento. 38 ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais...** Maceió: ENEGEP, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25270>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

RICHARDS, D. L.; HADLEY, H. R. **Soil-Cement Guide for water resources applications**. 1. Ed., Illinois: Portland Cement Association, 2006.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. Ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SEBRAE. **Anuário do trabalho na micro e pequena empresa**. São Paulo: Dieese, 6. ed, 2013. Disponível em: <<https://www.dieese.org.br/anuario/2013/anuarioSebrae2013.html>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SEGANTINI, A. A. DA S.; WADA, P. H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum – Technology**, Maringá, v. 33, n. 2, 2011, p. 179–183. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/9377>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SILVA, C. Z. *et al.* Umidade ótima de compactação de solo-cimento para diferentes traços. XIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONTRUÍDO. **Anais...** Canela: ENTAC, 2010.

SILVA, L.; LAFAYATTE, K. P. V. Avaliação das propriedades do resíduo da construção civil RCD como subsídio para confecção de tijolos de solo-cimento. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 2, n. 1, 2016, p. 1–4. Disponível em: <<http://revistas.poli.br/~anais/index.php/rep/article/view/346>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SILVA, V. M. *et al.* Incorporation of ceramic waste into binary and ternary soil-cement formulations for the production of solid bricks. **Materials Research**, v. 17, n. 2, 2014, p. 326–331. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/mr/a/6K3ktX35hRdMjtYPwC69fjt/abstract/?lang=en>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SILVEIRA, P. E. M.; NÓBREGA, C. Aplicação do resíduo de construção e demolição em solo-cimento. HOLOS ENVIRONMENT. **Anais...**Rio Claro: CEA/UNESP, 2006. Disponível em: <<https://holos.emnuvens.com.br/holos/article/view/320>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SOARES, A. R. *et al.* Estudo da incorporação do lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgoto na formulação de tijolos ecológicos de solo-cimento. 10 SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 2016. Disponível em: <<https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3573>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SOUZA, U. E. L. DE *et al.* Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, 2004, p. 33–46. Disponível em: <<https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3573>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, 2008, p. 205–212. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Qx3zyWVxQJPst4DWZyY3WqD/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 11 setembro 2022.

SULLIVAN, C. C.; HORWITZ-BENNETT, B. The Basics of Brick. **Building Design & Construction**, West Yorkshire, v. 49, n. 10, 2008.

TURGUT, P. Manufacturing of building bricks without Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 37, 2012, p. 361-367. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261200385X>>. Acesso em: 11 setembro 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**. 2017. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento acadêmico de construção civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

**APÊNDICE A - CONCENTRAÇÕES DE AREIA, SILTE E ARGILA**

## CONCENTRAÇÕES DE AREIA, SILTE E ARGILA PARA AS COMPOSIÇÕES DE SOLO CORRIGIDO

**Tabela 33 – Concentração de areia e argila+silte para a composição de 50% de solo e 50% ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Silte+Argila (g)</b>	<b>Total (g)</b>
Solo	28	472	500
ARM	500	0	500
Solo + ARM	528	472	1000

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Tabela 34 – Concentração de areia e argila+silte para a composição de 37,5% de solo e 62,5% ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Silte+Argila (g)</b>	<b>Total (g)</b>
Solo	21	354	375
ARM	625	0	625
Solo + ARM	646	354	1000

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Tabela 35 – Concentração de areia e argila+silte para a composição de 30% de solo e 70% ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Silte+Argila (g)</b>	<b>Total (g)</b>
Solo	16,8	283,2	300
ARM	700	0	700
Solo + ARM	716,8	283,2	1000

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Tabela 36 – Material passante para a composição de 50% de solo e 50% ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Passante 4,75mm (g)</b>	<b>Passante 0,075mm (g)</b>
Solo	500	472
ARM	500	85
Solo + ARM	1000	557

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Tabela 37 – Material passante para a composição de 37,5% de solo e 62,5% ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Passante 4,75mm (g)</b>	<b>Passante 0,075mm (g)</b>
Solo	375	354
ARM	625	106,3
Solo + ARM	1000	460,3

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Tabela 38 – Material passante para a composição de 30% de solo e 70% ARM**

<b>Materiais</b>	<b>Passante 4,75mm (g)</b>	<b>Passante 0,075mm (g)</b>
Solo	300	283,2
ARM	700	119
Solo + ARM	1000	402,2

**Fonte: Autoria própria (2021).**

**APÊNDICE B – ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE**

## ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE DO SOLO NATURAL E SOLO CORRIGIDO

O ensaio de limite de liquidez foi norteado pela NBR 6459 (ABNT, 2016b), para sua execução utilizou-se um equipamento chamado Casagrande. Esse equipamento é dotado de um prato côncavo e uma manivela que ao ser girada provoca um golpe no prato, com sucessivos golpes uma fenda previamente feita na amostra colocada no prato côncavo se fecha, o número de golpes necessário para fechar cerca de 1cm da rasura juntamente com o teor de umidade desse ponto são utilizados na elaboração de um gráfico, cuja equação da reta fornece a umidade do solo para o limite de liquidez representado por 25 golpes.

O procedimento foi repetido para 5 pontos de umidade diferentes, em réplica para cada amostra, ou seja, para uma amostra de solo e para todas as dosagens de solo corrigido com ARM definidas no planejamento experimental.

Com os resultados do número de golpes necessários para cada teor de umidade, foi elaborado um gráfico ajustando uma reta pelos pontos obtidos. Com a equação da reta, foi determinado o limite de liquidez do solo através teor de umidade relativo a 25 golpes expresso em porcentagem.

O ensaio de limite de plasticidade foi feito seguindo a NBR 7180 (ABNT, 2016c), repetindo 3 vezes para cada amostra. Iniciou-se colocando uma amostra de solo em uma cápsula de porcelana, em seguida adicionou-se água destilada misturando a amostra de forma vigorosa por cerca de 20 minutos. Quando a amostra apresentou uma consistência de pasta plástica, retirou-se 10g do material e moldou-se uma pequena bola.

A bola foi colocada sobre uma placa de vidro e foi pressionada com a palma da mão rolando até formar um cilindro. Quando o cilindro atingiu o diâmetro de 3mm e tamanho de 100mm apresentando pequenas fissuras, o cilindro foi transferido imediatamente para uma cápsula metálica e foi determinado o teor umidade conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a) Os teores de umidade não podem variar mais que 5% do valor médio (ABNT, 2016a).

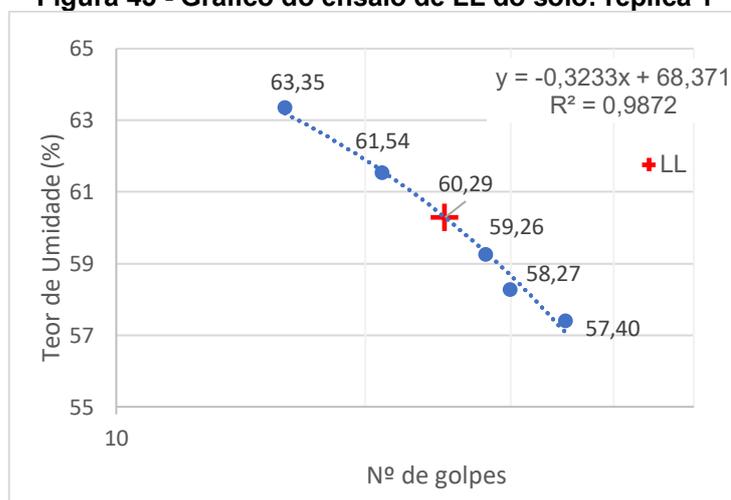
A Tabela 39 apresenta os resultados do ensaio de limite de liquidez do solo natural para as 2 réplicas. A Figura 45 refere-se ao gráfico da réplica 1 e a Figura 46 ao gráfico da réplica 2. A Tabela 40 apresenta o limite de plasticidade do solo natural.

Tabela 39 - Limite de liquidez do solo natural

	Número de golpes	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
<b>Réplica 1</b>	35	26,74	25,09	22,21	<b>57,40</b>
	30	27,85	26,17	23,28	<b>58,27</b>
	28	29,66	26,94	22,35	<b>59,26</b>
	21	28,51	26,27	22,63	<b>61,54</b>
	16	28,27	26,27	23,11	<b>63,35</b>
<b>Réplica 2</b>	40	25,49	24,43	22,46	<b>53,67</b>
	35	28,29	27,43	25,85	<b>54,53</b>
	30	27,07	25,37	22,33	<b>55,83</b>
	23	25,83	24,47	22,12	<b>57,87</b>
	15	26,89	25,09	22,14	<b>60,98</b>

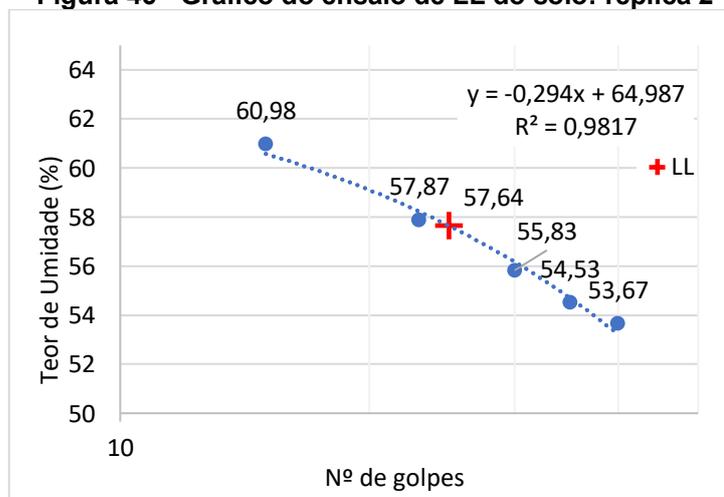
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 45 - Gráfico do ensaio de LL do solo: réplica 1



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 46 - Gráfico do ensaio de LL do solo: réplica 2



Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 40 - Limite de plasticidade do solo natural**

	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
<b>Réplica 1</b>	24,15	23,59	22,26	<b>42,11</b>
	23,85	23,31	22,03	<b>42,19</b>
	26,98	26,48	25,24	<b>40,32</b>
<b>Réplica 2</b>	24,29	23,84	22,75	<b>41,38</b>
	22,59	22,08	20,92	<b>43,97</b>
	23,62	23,12	21,92	<b>41,67</b>

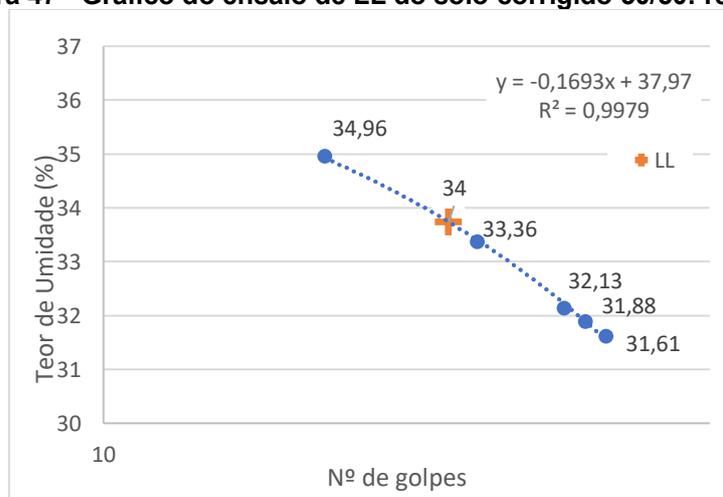
Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 47, Figura 48 e Tabela 41 constam os resultados do limite de liquidez do solo corrigido na proporção de 50% de solo e 50% ARM. E a Tabela 42 contém os resultados do ensaio de limite de plasticidade.

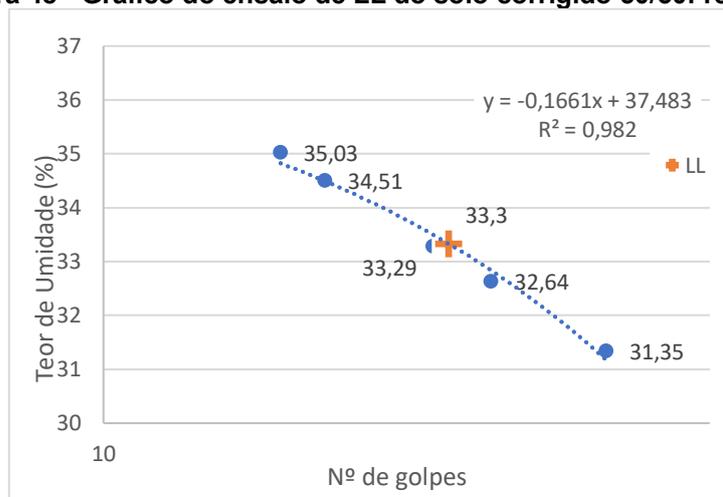
**Tabela 41 - Limite de liquidez do solo corrigido relação 50/50**

	Número de golpes	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
<b>Réplica 1</b>	38	17,73	16,02	10,62	<b>31,61</b>
	36	14,67	13,67	10,54	<b>31,88</b>
	34	14,04	13,18	10,50	<b>32,13</b>
	27	15,41	14,18	10,49	<b>33,36</b>
	18	16,38	14,69	9,87	<b>34,96</b>
<b>Réplica 2</b>	38	28,18	27,20	24,09	<b>31,35</b>
	28	26,84	25,90	23,02	<b>32,64</b>
	24	28,25	27,00	23,25	<b>33,29</b>
	18	28,42	26,90	22,50	<b>34,51</b>
	16	29,80	28,90	26,33	<b>35,03</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 47 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 50/50: réplica 1**

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 48 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 50/50: réplica 2**

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 42 - Limite de plasticidade do solo corrigido 50/50**

	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
<b>Réplica 1</b>	12,31	11,96	10,64	<b>26,52</b>
	12,91	12,53	11,06	<b>25,85</b>
	12,26	11,91	10,50	<b>24,47</b>
<b>Réplica 2</b>	23,07	22,80	21,53	<b>20,87</b>
	24,35	24,10	23,13	<b>25,77</b>
	23,60	23,30	22,04	<b>23,81</b>

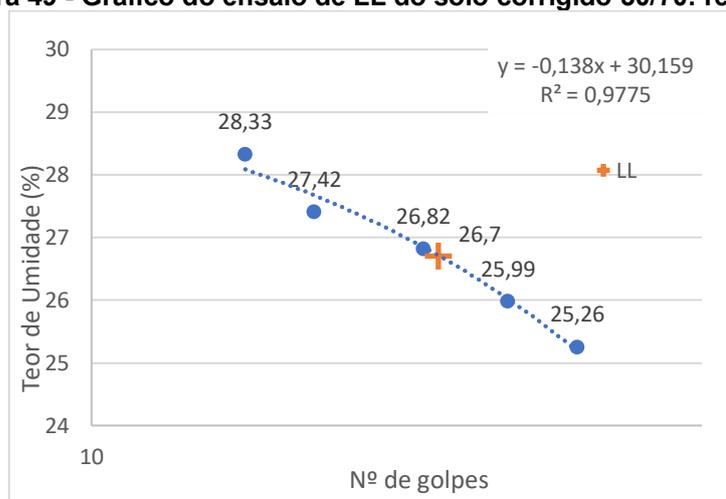
Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 49, Figura 50 e Tabela 43 constam os resultados do limite de liquidez do solo corrigido na proporção de 30% de solo e 70% ARM. E a Tabela 44 contém os resultados do ensaio de limite de plasticidade.

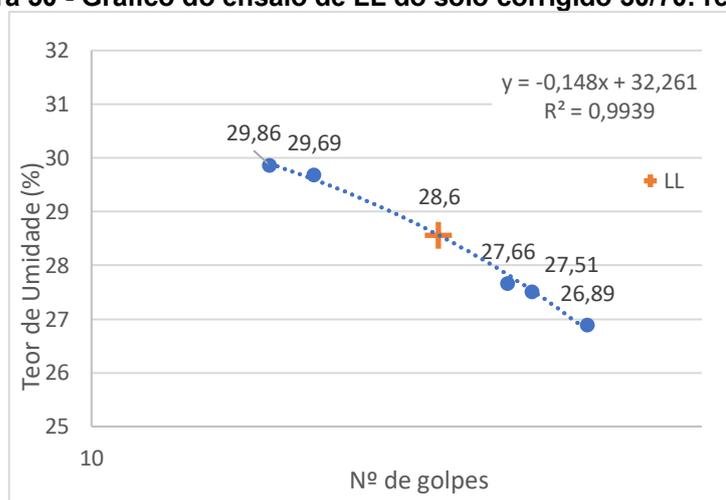
**Tabela 43 - Limite de liquidez do solo corrigido relação 30/70**

	Número de golpes	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
<b>Réplica 1</b>	36	15,51	14,53	10,67	<b>25,26</b>
	30	27,71	26,96	24,07	<b>25,99</b>
	24	26,43	25,51	22,08	<b>26,82</b>
	18	27,00	26,15	23,05	<b>27,42</b>
	15	27,99	26,82	22,69	<b>28,33</b>
<b>Réplica 2</b>	37	26,29	25,40	22,09	<b>26,89</b>
	32	26,25	25,10	20,92	<b>27,51</b>
	30	26,24	25,30	21,92	<b>27,66</b>
	18	26,06	25,30	22,74	<b>29,69</b>
	16	25,54	24,90	22,76	<b>29,86</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 49 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 30/70: réplica 1**

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 50 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 30/70: réplica 2**

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 44 - Limite de plasticidade do solo corrigido 30/70**

	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
<b>Réplica 1</b>	23,82	23,50	22,26	<b>25,81</b>
	23,70	23,40	22,03	<b>21,97</b>
	23,75	23,48	22,36	<b>24,46</b>
<b>Réplica 2</b>	27,21	26,80	25,24	<b>26,35</b>
	24,81	24,50	23,24	<b>24,60</b>
	22,61	22,40	21,50	<b>23,33</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

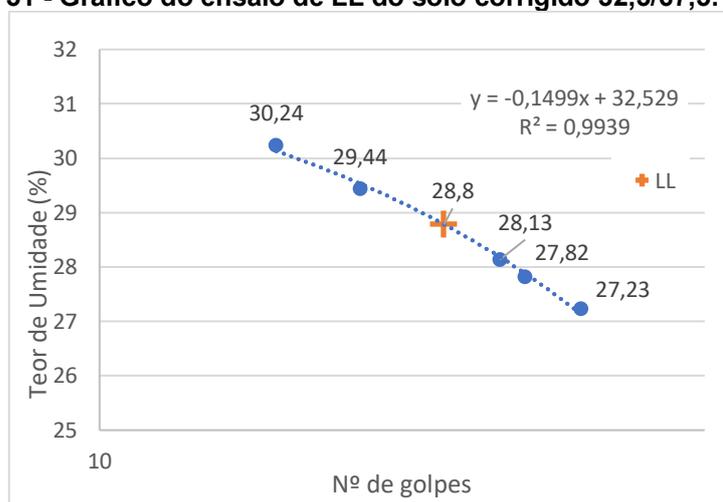
Na Figura 51, Figura 52 e Tabela 45 constam os resultados do limite de liquidez do solo corrigido na proporção de 30% de solo e 70% ARM. E a Tabela 46 contém os resultados do ensaio de limite de plasticidade.

Tabela 45 - Limite de liquidez do solo corrigido relação 30/70

	Número de golpes	Massa úmida - M1 (g)	Massa seca - M2 (g)	Massa tara - M3 (g)	Teor de umidade (%)
Réplica 1	36	27,86	26,53	21,65	<b>27,23</b>
	31	28,38	27,22	23,05	<b>27,82</b>
	29	26,39	25,47	22,20	<b>28,13</b>
	20	28,19	27,09	23,35	<b>29,44</b>
	16	14,59	13,58	10,24	<b>30,24</b>
Réplica 2	35	25,71	24,80	21,45	<b>27,16</b>
	30	30,15	28,90	24,41	<b>27,73</b>
	28	26,31	25,30	21,73	<b>28,29</b>
	23	25,84	24,80	21,26	<b>29,38</b>
	15	27,64	26,40	22,36	<b>30,69</b>

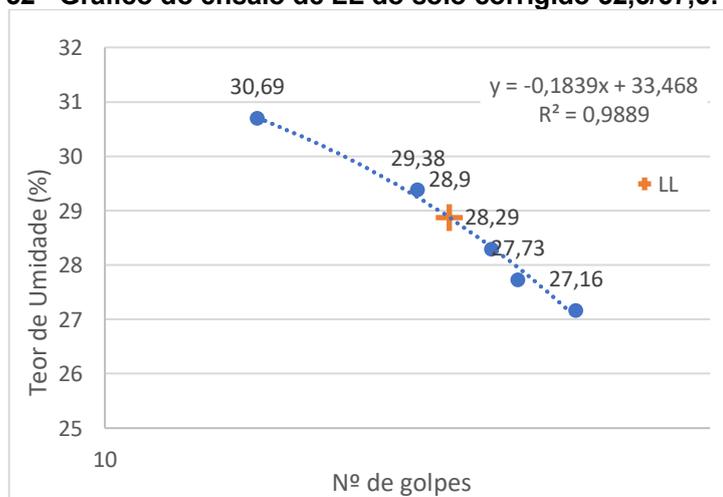
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 51 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 32,5/67,5: réplica 1



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 52 - Gráfico do ensaio de LL do solo corrigido 32,5/67,5: réplica 2



Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 46 - Limite de plasticidade do solo corrigido 32,5/67,5**

	<b>Massa úmida - M1 (g)</b>	<b>Massa seca - M2 (g)</b>	<b>Massa tara - M3 (g)</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>
<b>Réplica 1</b>	22,89	22,51	20,97	<b>24,68</b>
	24,04	23,65	22,09	<b>25,00</b>
	23,85	23,54	22,28	<b>24,60</b>
<b>Réplica 2</b>	23,61	23,30	22,00	<b>23,80</b>
	22,90	22,60	21,41	<b>25,21</b>
	23,35	23,00	21,64	<b>25,74</b>

**Fonte: Autoria própria (2021).**

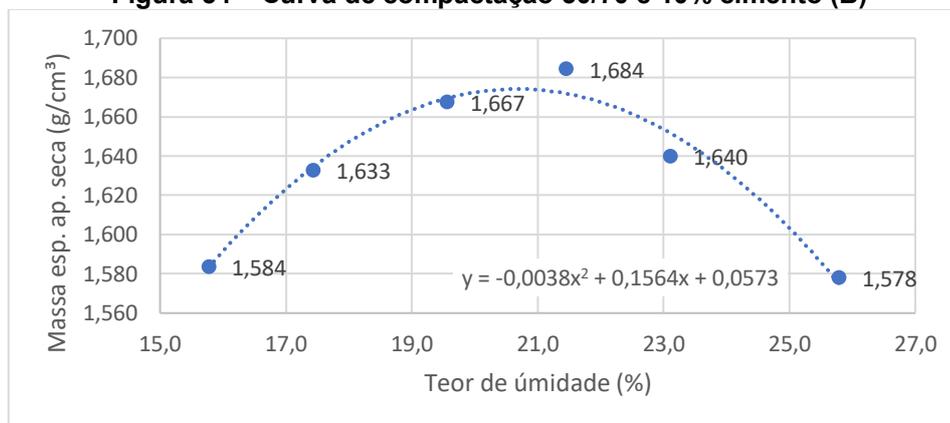
## **APÊNDICE C – TEOR DE UMIDADE DE COMPACTAÇÃO**



<b>(mh) Amostra compactada + molde (g)</b>	4190,1	4274,0	4349,8	4401,8	4375,00	4341,2
<b>(m) Tara cápsula (g)</b>	22,6	22,1	21,9	22,8	23,5	27,4
<b>(mbu) massa umida + cápsula (g)</b>	134,2	129,9	124,6	133,2	153,0	127,9
<b>(mbs) massa seca + cápsula (g)</b>	119,0	113,9	107,8	113,7	128,7	107,3
<b>(w) teor de umidade (%)</b>	15,77	17,43	19,56	21,45	23,10	25,78
<b>(p) massa esp. aparente compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,83	1,92	1,99	2,05	2,02	1,98
<b>(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,584	1,633	1,667	1,684	1,640	1,578

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 54 – Curva de compactação 30/70 e 10% cimento (B)



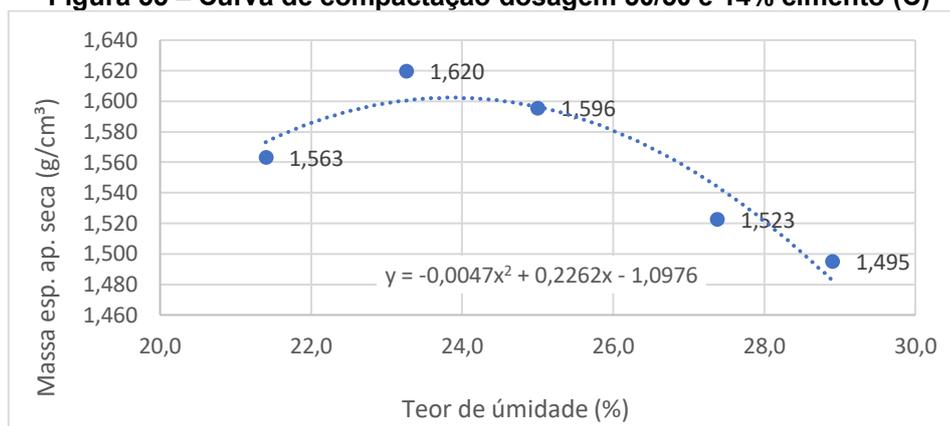
Fonte: Autoria própria (2021).

O ensaio para a amostra com 14% de cimento e 86% do solo corrigido com 50% de solo e 50% de ARM apresenta-se na Tabela 49 e gerou o gráfico da Figura 55.

Tabela 49 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 14% cimento (C)

Ponto	1	2	3	4	5
<b>Tara do molde (g)</b>	2361,5	2361,5	2361,5	2361,5	2361,5
<b>(mh) Amostra compactada + molde (g)</b>	4254,6	4352,9	4351,0	4296,0	4283,6
<b>(m) Tara cápsula (g)</b>	21,40	23,1	22,5	21,5	21,2
<b>(mbu) massa umida + cápsula (g)</b>	134,3	125,9	112,0	122,0	133,6
<b>(mbs) massa seca + cápsula (g)</b>	114,4	106,5	94,1	100,4	108,4
<b>(w) teor de umidade (%)</b>	21,40	23,26	25,00	27,38	28,90
<b>(p) massa esp. aparente compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,90	2,00	1,99	1,94	1,93
<b>(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,563	1,620	1,596	1,523	1,495

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 55 – Curva de compactação dosagem 50/50 e 14% cimento (C)**

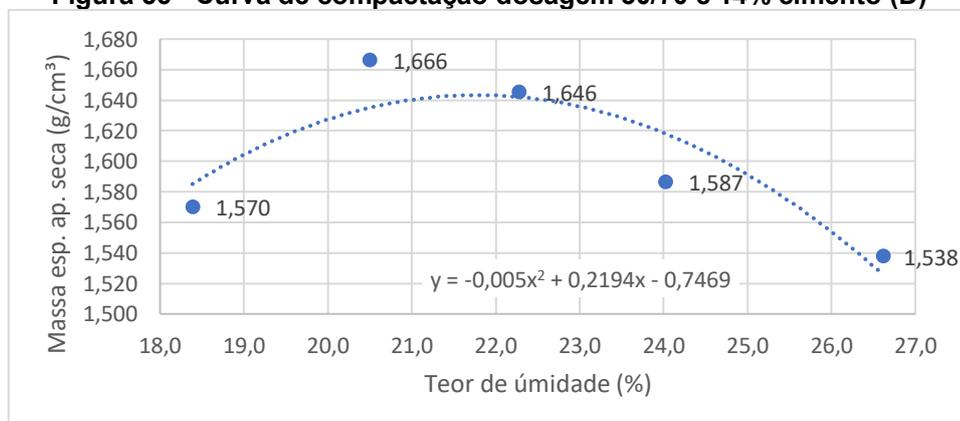
Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 50 apresenta os resultados do ensaio para a amostra com 14% de cimento e 86% do solo corrigido com 30% de solo e 70% de ARM que gerou o gráfico da Figura 56.

**Tabela 50 - Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 14% cimento (D)**

Ponto	1	2	3	4	5
Tara do molde (g)	2375,1	2375,1	2375,1	2375,1	2375,1
(mh) Amostra compactada + molde (g)	4229,1	4377,7	4382,1	4337,7	4317,2
(m) Tara cápsula (g)	21,80	22,1	21,5	22,2	23,0
(mbu) massa umida + cápsula (g)	127,4	128,5	123,6	136,3	136,7
(mbs) massa seca + cápsula (g)	111,0	110,4	105,0	114,2	112,8
(w) teor de umidade (%)	18,39	20,50	22,28	24,02	26,61
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm³)	1,86	2,01	2,01	1,97	1,95
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm³)	1,570	1,666	1,646	1,587	1,538

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 56 - Curva de compactação dosagem 30/70 e 14% cimento (D)**

Fonte: Autoria própria (2021).

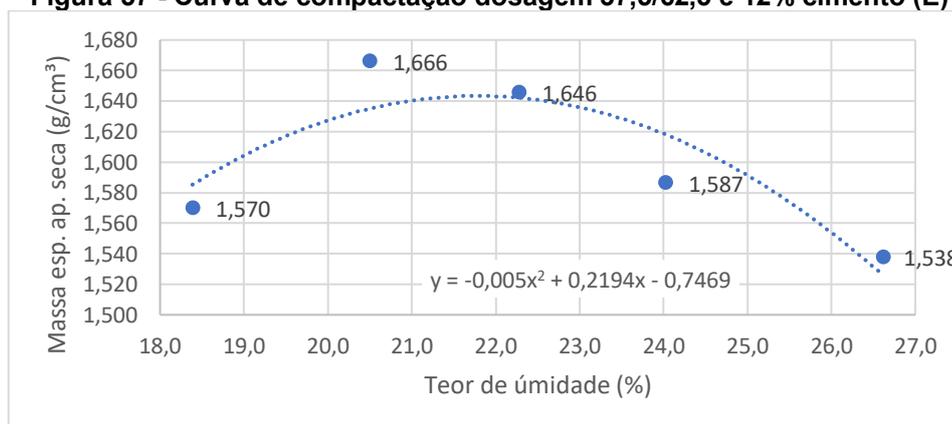
A Tabela 51 contém os resultados do ensaio para a amostra com 12% de cimento e 88% do solo corrigido com 37,5% de solo e 62,5% de ARM que gerou o gráfico da Figura 57.

**Tabela 51 - Teor de umidade ótima dosagem 37,5/62,5 e 12% cimento (E)**

Ponto	1	2	3	4	5	6
Tara do molde (g)	2375,1	2375,1	2375,1	2375,1	2375,1	2375,1
(mh) Amostra compactada + molde (g)	4179,2	4243,7	4314,1	4392,5	4371,4	4323,7
(m) Tara cápsula (g)	21,6	25,3	21,3	22,7	22,0	23,3
(mbu) massa umida + cápsula (g)	128,0	133,4	129,3	136,6	140,5	138,4
(mbs) massa seca + cápsula (g)	112,1	115,4	110,0	114,8	116,5	113,0
(w) teor de umidade (%)	17,6	20,0	21,8	23,7	25,4	28,3
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,81	1,87	1,94	2,02	2,00	1,95
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,538	1,561	1,597	1,635	1,596	1,523

Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 57 - Curva de compactação dosagem 37,5/62,5 e 12% cimento (E)**



Fonte: Autoria própria (2021).

## **APÊNDICE D – GRAU DE COMPACTAÇÃO**

## GRAU DE COMPACTAÇÃO

A umidade de compactação foi determinada pelo teor de umidade correspondente ao momento de compactação da segunda camada na execução dos corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. Foram retiradas duas amostras de cada dosagem.

A Tabela 52 consta o ensaio para a amostra com 10% de cimento e 90% do solo corrigido com 50% de solo e 50% de ARM.

**Tabela 52 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 10% cimento (A)**

Ponto	1	2
Tara do molde	2361	2375,9
(mh) Amostra compactada + molde	4339,8	4348,1
(m) Tara cápsula	25,29	21,44
(mbu) massa umida + cápsula	113,95	115,16
(mbs) massa seca + cápsula	96,56	96,88
(w) teor de umidade	24,40	24,23
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,984	1,977
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,595	1,592

Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 53 consta o ensaio para a amostra com 10% de cimento e 90% do solo corrigido com 30% de solo e 70% de ARM.

**Tabela 53 – Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 10% cimento (B)**

Ponto	1	2
Tara do molde	2361	2375,9
(mh) Amostra compactada + molde	4377,6	4391,7
(m) Tara cápsula	22,62	22,08
(mbu) massa umida + cápsula	109,32	111,31
(mbs) massa seca + cápsula	94,3	95,56
(w) teor de umidade	20,95	21,43
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	2,022	2,021
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,672	1,664

Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 54 consta o ensaio para a amostra com 14% de cimento e 86% do solo corrigido com 50% de solo e 50% de ARM.

**Tabela 54 – Teor de umidade ótima dosagem 50/50 e 14% cimento (C)**

Ponto	1	2
Tara do molde	2361	2375,9
(mh) Amostra compactada + molde	4357,7	4308,5
(m) Tara cápsula	23,41	21,54
(mbu) massa umida + cápsula	115,45	118,13
(mbs) massa seca + cápsula	97,72	99,09
(w) teor de umidade	23,86	24,55
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	2,002	1,938
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,616	1,556

Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 55 consta o ensaio para a amostra com 14% de cimento e 86% do solo corrigido com 30% de solo e 70% de ARM.

**Tabela 55 – Teor de umidade ótima dosagem 30/70 e 14% cimento (D)**

Ponto	1	2
Tara do molde	2361	2375,9
(mh) Amostra compactada + molde	4336,3	4366,7
(m) Tara cápsula	23,02	23,67
(mbu) massa umida + cápsula	109,19	102,74
(mbs) massa seca + cápsula	94,19	88,26
(w) teor de umidade	21,08	22,42
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,980	1,996
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,636	1,630

Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 56 consta o ensaio para a amostra com 12% de cimento e 88% do solo corrigido com 37,5% de solo e 62,5% de ARM.

**Tabela 56 – Teor de umidade ótima dosagem 37,5/62,5 e 12% cimento (E)**

Ponto	1	2
Tara do molde	2361	2375,9
(mh) Amostra compactada + molde	4334,0	4360,7
(m) Tara cápsula	21,29	22,08
(mbu) massa umida + cápsula	127,20	121,69
(mbs) massa seca + cápsula	108,33	102,44
(w) teor de umidade	21,68	23,95
(p) massa esp. aparente compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,978	1,990
(ps) massa esp. aparente seca compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,626	1,605

Fonte: Autoria própria (2021).

## **ANEXO A - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO**



Ministério da Educação  
 Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
 Campus Pato Branco  
 Laboratório de Solos UTFPR  
 Rodovia PR 469, Km 01. Cx. Postal 571 - 85501-970  
 Telefone: (46) 3220 2539 Pato Branco - PR



## LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS

Solicitante: Jéssica Filipe Briskievicz  
 PG: Programa de pós graduação em Engenharia ambiental  
 Orientador: Fernanda Batista de Souza  
 Amostra: 387P  
 Profundidade: 0 a 50 cm  
 IES: UTFPR-Francisco Beltrão

### Resultado da Análise de Física do Solo

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
387 P	78,0	16,4	5,6

Para maiores esclarecimentos consulte um Engenheiro Agrônomo.

De acordo com a Instrução Normativa nº 2, de 09 de outubro de 2008, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, este solo é classificado como do TIPO 3

Este resultado representa a amostra enviada pelo interessado.

Pato Branco, 15 de setembro de 2021

**ANEXO B – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA RCD**

 <b>LEME</b> Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia	Rua Universitária 2069, Jardim Universitário CEP 85819-110 Cascavel- PR. Fone: 45.3220 7236	 <b>unioeste</b> Universidade Estadual do Oeste do Paraná
	<b>RELATÓRIO DE ENSAIO</b>	Nº: 168/2021

**Interessado:** Pedreira Motter  
 CNPJ: 77.595.445/0001-51  
 PR 483 s/n CX postal 22 – Francisco Beltrão – PR.  
 CEP: 85.601- 000

Telefone: (46) 3524 4062

**Assunto:** OS 75/2021 - Ensaio de granulometria e determinação de material pulverulento.

**Material ensaiado:** Material reciclado, areia.

**Data do recebimento do material:** 13 de maio de 2021.

**Período de realização dos ensaios:** 14 a 24 de maio de 2021.

## 1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios de granulometria e determinação de material pulverulento.

Salientamos que a amostra do material para caracterização foi coletada e enviada ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia da Unioeste pelo cliente, cabendo ao Laboratório a realização do ensaio e a apresentação dos resultados.

Os resultados apresentados neste relatório referem-se exclusivamente a amostra ensaiada.

## 2. MÉTODOS DE ENSAIO E NORMAS REFERENCIADAS

O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos das normas:  
 ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica;  
 ABNT NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificação;  
 ABNT NBR NM 27:2001 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório;  
 ABNT NBR NM 46:2003 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075mm

## 3. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de granulometria e determinação de material pulverulento do agregado, estão apresentados abaixo.

 <p><b>LEME</b> Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia</p>	<p>Rua Universitária 2069, Jardim Universitário CEP 85819-110 Cascavel- PR. Fone: 45.3220 7236</p>	 <p><b>unioeste</b> Universidade Estadual do Oeste do Paraná</p>

**Tabela 01 – Massa unitária do agregado na condição solto e seco em estufa.**

Massa unitária solta, areia reciclada		
Umidade do material (%) = 0,00		
Ensaio nº	Valor individual kg/m <sup>3</sup>	Valor médio kg/m <sup>3</sup>
1	1260	1262
2	1264	
3	1263	

**Tabela 02 – Massa específica aparente.**

Massa específica aparente, areia reciclada.			
Ensaio nº	Valor individual g/cm <sup>3</sup>	Valor médio g/cm <sup>3</sup>	Valor médio kg/m <sup>3</sup>
1	2,36	2,34	2340
2	2,33		
3	2,33		

Responsável Técnico.



Assinado de forma digital  
por GIOVANNA PATRICIA  
GAVA  
OYAMADA:99884089949  
Dados: 2021.05.25  
10:14:58 -03'00'

**ANEXO C – RELATÓRIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

		Ministério de Educação Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Pato Branco Departamento de Engenharia Civil																																																																																																																																																					
SOLICITANTE :	UTFPR - Francisco Beltrão				Relatório: 01																																																																																																																																																		
Obrac:	Não Identificado																																																																																																																																																						
<b>SOLO-CIMENTO - ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS NBR 12025/2012</b>																																																																																																																																																							
<p>O presente parecer técnico trata da determinação da resistência à compressão de corpos de prova de solo-cimento cilíndricos.</p> <p>O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 12025/2012 - Solo-Cimento - Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. As amostras foram coletas e identificadas pela solicitante <b>Jéssica Filipe Brisklevicz</b>. Os valores de resistência à compressão estão exibidos na tabela a seguir.</p> <p style="text-align: center;"><b>Tabela - Resistência à compressão do solo-cimento</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Identificação</th> <th colspan="2">Data</th> <th rowspan="2">Módulo (N/mm²)</th> <th rowspan="2">Diâmetro (mm)</th> <th rowspan="2">Altura (mm)</th> <th rowspan="2">Área (mm²)</th> <th rowspan="2">Carga (N)</th> <th rowspan="2">Rc (MPa)</th> </tr> <tr> <th>Moldagem</th> <th>Ruptura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>AR1 - 50/50 10%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/2021</td><td>28</td><td>100,1</td><td>128,3</td><td>7859,42</td><td>10858</td><td>1,38</td></tr> <tr><td>AR2 - 50/50 10%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/2012</td><td>28</td><td>100,0</td><td>129,4</td><td>7851,57</td><td>13185</td><td>1,88</td></tr> <tr><td>AR3 - 50/50 10%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/2003</td><td>28</td><td>100,1</td><td>128,9</td><td>7885,71</td><td>12027</td><td>1,53</td></tr> <tr><td>BR1 - 30/70 10%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1994</td><td>28</td><td>100,1</td><td>128,4</td><td>7888,85</td><td>19129</td><td>2,43</td></tr> <tr><td>BR2 - 30/70 10%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1985</td><td>28</td><td>99,7</td><td>127,3</td><td>7795,15</td><td>18409</td><td>2,38</td></tr> <tr><td>BR3 - 30/70 10%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1976</td><td>28</td><td>100,0</td><td>128,9</td><td>7853,14</td><td>20287</td><td>2,58</td></tr> <tr><td>CR1 - 50/50 14%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1987</td><td>28</td><td>100,1</td><td>127,0</td><td>7887,28</td><td>19898</td><td>2,53</td></tr> <tr><td>CR2 - 50/50 14%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1958</td><td>28</td><td>99,9</td><td>127,5</td><td>7839,01</td><td>18789</td><td>2,39</td></tr> <tr><td>CR3 - 50/50 14%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1949</td><td>28</td><td>100,0</td><td>128,7</td><td>7858,28</td><td>17520</td><td>2,23</td></tr> <tr><td>DR1 - 30/70 14%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1940</td><td>28</td><td>100,1</td><td>128,8</td><td>7859,42</td><td>28920</td><td>3,43</td></tr> <tr><td>DR2 - 30/70 14%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1931</td><td>28</td><td>100,0</td><td>128,5</td><td>7850,00</td><td>25781</td><td>3,28</td></tr> <tr><td>DR3 - 30/70 14%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1922</td><td>28</td><td>100,0</td><td>127,1</td><td>7848,43</td><td>28580</td><td>3,39</td></tr> <tr><td>ER1 - 37,5/62,5 12%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1913</td><td>28</td><td>100,1</td><td>127,1</td><td>7884,14</td><td>19988</td><td>2,54</td></tr> <tr><td>ER2 - 37,5/62,5 12%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/1904</td><td>28</td><td>100,0</td><td>127,4</td><td>7848,43</td><td>20237</td><td>2,58</td></tr> <tr><td>ER3 - 37,5/62,5 12%</td><td>21/09/2021</td><td>19/10/2021</td><td>28</td><td>99,9</td><td>128,4</td><td>7832,74</td><td>20337</td><td>2,60</td></tr> </tbody> </table> <p>Os corpos-de-prova foram ensaiados na sua condição úmida, após 4 horas imersos.</p>						Identificação	Data		Módulo (N/mm²)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm²)	Carga (N)	Rc (MPa)	Moldagem	Ruptura	AR1 - 50/50 10%	21/09/2021	19/10/2021	28	100,1	128,3	7859,42	10858	1,38	AR2 - 50/50 10%	21/09/2021	19/10/2012	28	100,0	129,4	7851,57	13185	1,88	AR3 - 50/50 10%	21/09/2021	19/10/2003	28	100,1	128,9	7885,71	12027	1,53	BR1 - 30/70 10%	21/09/2021	19/10/1994	28	100,1	128,4	7888,85	19129	2,43	BR2 - 30/70 10%	21/09/2021	19/10/1985	28	99,7	127,3	7795,15	18409	2,38	BR3 - 30/70 10%	21/09/2021	19/10/1976	28	100,0	128,9	7853,14	20287	2,58	CR1 - 50/50 14%	21/09/2021	19/10/1987	28	100,1	127,0	7887,28	19898	2,53	CR2 - 50/50 14%	21/09/2021	19/10/1958	28	99,9	127,5	7839,01	18789	2,39	CR3 - 50/50 14%	21/09/2021	19/10/1949	28	100,0	128,7	7858,28	17520	2,23	DR1 - 30/70 14%	21/09/2021	19/10/1940	28	100,1	128,8	7859,42	28920	3,43	DR2 - 30/70 14%	21/09/2021	19/10/1931	28	100,0	128,5	7850,00	25781	3,28	DR3 - 30/70 14%	21/09/2021	19/10/1922	28	100,0	127,1	7848,43	28580	3,39	ER1 - 37,5/62,5 12%	21/09/2021	19/10/1913	28	100,1	127,1	7884,14	19988	2,54	ER2 - 37,5/62,5 12%	21/09/2021	19/10/1904	28	100,0	127,4	7848,43	20237	2,58	ER3 - 37,5/62,5 12%	21/09/2021	19/10/2021	28	99,9	128,4	7832,74	20337	2,60
Identificação	Data		Módulo (N/mm²)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)		Área (mm²)	Carga (N)							Rc (MPa)																																																																																																																																								
	Moldagem	Ruptura																																																																																																																																																					
AR1 - 50/50 10%	21/09/2021	19/10/2021	28	100,1	128,3	7859,42	10858	1,38																																																																																																																																															
AR2 - 50/50 10%	21/09/2021	19/10/2012	28	100,0	129,4	7851,57	13185	1,88																																																																																																																																															
AR3 - 50/50 10%	21/09/2021	19/10/2003	28	100,1	128,9	7885,71	12027	1,53																																																																																																																																															
BR1 - 30/70 10%	21/09/2021	19/10/1994	28	100,1	128,4	7888,85	19129	2,43																																																																																																																																															
BR2 - 30/70 10%	21/09/2021	19/10/1985	28	99,7	127,3	7795,15	18409	2,38																																																																																																																																															
BR3 - 30/70 10%	21/09/2021	19/10/1976	28	100,0	128,9	7853,14	20287	2,58																																																																																																																																															
CR1 - 50/50 14%	21/09/2021	19/10/1987	28	100,1	127,0	7887,28	19898	2,53																																																																																																																																															
CR2 - 50/50 14%	21/09/2021	19/10/1958	28	99,9	127,5	7839,01	18789	2,39																																																																																																																																															
CR3 - 50/50 14%	21/09/2021	19/10/1949	28	100,0	128,7	7858,28	17520	2,23																																																																																																																																															
DR1 - 30/70 14%	21/09/2021	19/10/1940	28	100,1	128,8	7859,42	28920	3,43																																																																																																																																															
DR2 - 30/70 14%	21/09/2021	19/10/1931	28	100,0	128,5	7850,00	25781	3,28																																																																																																																																															
DR3 - 30/70 14%	21/09/2021	19/10/1922	28	100,0	127,1	7848,43	28580	3,39																																																																																																																																															
ER1 - 37,5/62,5 12%	21/09/2021	19/10/1913	28	100,1	127,1	7884,14	19988	2,54																																																																																																																																															
ER2 - 37,5/62,5 12%	21/09/2021	19/10/1904	28	100,0	127,4	7848,43	20237	2,58																																																																																																																																															
ER3 - 37,5/62,5 12%	21/09/2021	19/10/2021	28	99,9	128,4	7832,74	20337	2,60																																																																																																																																															
20 de Outubro 2021			Prof. José Miguel Etchalar																																																																																																																																																				
			Responsável pelo Laboratório de Materiais																																																																																																																																																				