

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – MESTRADO**

ANGÉLICA VINCI DO NASCIMENTO GIMENES RIOS

**USO POTENCIAL DA ETRINGITA OBTIDA NO
TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS EM
APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

MARINGÁ
2022

ANGÉLICA VINCI DO NASCIMENTO GIMENES RIOS

**USO POTENCIAL DA ETRINGITA OBTIDA NO
TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS EM
APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Juliana Azoia
Lukiantchuki

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Cláudia Telles Benatti

MARINGÁ
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

R589u

Rios, Angélica Vinci do Nascimento Gimenes

Uso potencial da etringita obtida no tratamento de efluentes industriais em aplicações geotécnicas / Angélica Vinci do Nascimento Gimenes Rios. -- Maringá, PR, 2022.
94 f.: il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki.

Coorientadora: Profa. Dra. Cláudia Telles Benatti.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Solo arenoso. 2. Efluentes industriais - Tratamento. 3. Resíduos industriais - Tratamento. 4. Anodização. 5. Etringita. I. Lukiantchuki, Juliana Azoia, orient. II. Benatti, Cláudia Telles, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 624

ANGÉLICA VINCI DO NASCIMENTO GIMENES RIOS

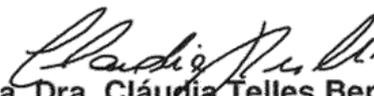
**USO POTENCIAL DA ETRINGITA OBTIDA NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES INDUSTRIAIS EM APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 25/03/2022, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



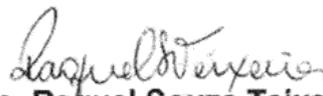
Profa. Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Orientadora



Profa. Dra. Cláudia Telles Benatti
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
Universidade Estadual de Maringá
Coorientadora



Prof. Dr. Antonio Belincanta
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana
Universidade Estadual de Maringá



Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Londrina

À minha família por todo apoio, compreensão e orações ao longo dessa caminhada e à Deus por mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de primeiramente agradecer a Deus, pois Ele tem estado comigo, me fortalecendo e me cuidando em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao meus pais, Antônio Barbosa Gimenes e Beatriz Vinci do Nascimento Gimenes, por todo o incentivo, amor, orações e por sempre estarem disponíveis para me ajudar nessa caminhada.

Ao meu marido, Marcelo Fernando Rojas Rios, dedico o mais profundo agradecimento por todo o amor, cuidado, apoio, ajuda e compreensão. Obrigada por estar presente em todos os momentos de ansiedade, sendo minha calma e meu porto seguro. Te amo além do que as palavras possam expressar.

Agradeço pelas orientações das Professoras Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki e Dra. Claudia Telles Benatti e por toda a ajuda e compreensão. Agradeço toda ajuda do Cipriano José de A. Freire, técnico do laboratório de solos, no auxílio na realização dos ensaios.

Sou extremamente grata pelo auxílio do meu grande amigo, professor Dr. Julio Cesar Tocacelli Colella. Obrigada por nos momentos de desespero me incentivar a continuar, por me auxiliar em várias etapas da pesquisa.

Gostaria de agradecer ao Centro Universitário Unifatecie, que disponibilizou sua estufa para a secagem do material e ao Hamilton C. C. Biagio do Laboratório Rural de Maringá, pelo auxílio e suporte em alguns ensaios.

E por fim gostaria de agradecer à Universidade Estadual de Maringá, pela infraestrutura e por todos os colaboradores que tornaram essa pesquisa possível.

Agradecimento à Capes

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecimento à Capes

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

RESUMO

O uso de resíduos industriais como material de construção e em obras geotécnicas estão se tornando cada vez mais atrativos como uma solução ambientalmente correta e econômica. A pesquisa buscou analisar o uso de um resíduo de um processo de pós tratamento de efluente de anodização, que busca a redução da concentração de sulfato. Atualmente no Brasil, embora se tenha a resolução CONAMA no. 430 de 2011, que especifica os parâmetros de lançamento em corpos hídricos, não se tem um parâmetro direto quanto a concentração de sulfato e o ciclo desse composto dentro dos mesmos, se em alta concentração, pode ocasionar problemas a saúde. A precipitação da etringita seria uma opção para uma maior redução da concentração de sulfato e o seu uso em matrizes de solo-cimento possibilitaria uma destinação diferenciada a esse resíduo. Para isso foram realizados ensaios de caracterização dos materiais e das matrizes de solo-cimento-etringita, onde variou-se os teores de cimento e de etringita, de acordo com a interpretação dos ensaios de dosagem físico química, além de ensaios de resistência mecânica das matrizes através de ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral. Dentre os ensaios de caracterização se teve o ensaio de DRX, que indicou a presença de esmectita e vermiculita na amostra de etringita, argilominerais ativos, além dos ensaios de limites de liquidez e limite de plasticidade, que divergiram do esperado, no qual se teve uma redução desses parâmetros mesmo com a presença de argilominerais ativos na composição da etringita, sendo necessário verificar a interferência do pH nas reações químicas dentro das matrizes. Quanto a resistência às compressão simples (qu), as matrizes contendo apenas solo-cimento (SC) apresentaram ganhos de resistência muito superiores as demais matrizes, sendo o destaque a matriz SC5 que aos 14 dias apresentou qu igual a 3,23 MPa. As matrizes contendo solo-cimento-etringita (SCE), tiveram uma redução da resistência evidente em relação as matrizes contendo solo-cimento, no qual pode-se perceber que a adição de etringita atrapalha as reações de hidratação do cimento. Para as matrizes solo-etringita (SE) o aumento de resistência em relação ao solo natural não foi superior a 67,18%. Para a resistência a tração por compressão diametral se teve um padrão parecido, no qual as matrizes de SC apresentaram valores superiores as demais. Embora, verificou-se valores inferiores ao obtido pelo solo puro nas matrizes de SE. Os resultados indicam que a junção de etringita com solo-cimento não parece ser interessante em termos de resistência.

Palavras-chave: Solo Arenoso; Estabilização de Solo; Efluentes; Anodização; Resíduos Industriais; Etringita.

ABSTRACT

The use of industrial waste as construction material and in geotechnical works are becoming increasingly attractive as an ecologically correct and economical solution. The research sought to analyze the use of a residue from an anodized effluent post-treatment process, which seeks to reduce the concentration of sulfate. Currently in Brazil, although CONAMA resolution n. 430 of 2011, which specifies the parameters of release into water bodies, there is no direct parameter regarding the concentration of sulfate and the cycle of this compound within them, if in high concentration, can cause health problems. The precipitation of ettringite would be an option to further reduce the concentration of sulfate and its use in soil-cement matrices would allow a differentiated destination for this residue. For this, characterization tests of the materials and soil-cement-ettringite matrices were carried out, where the cement and ettringite contents were varied, according to the interpretation of the physical-chemical dosage tests, in addition to mechanical resistance tests of the matrices through tests of simple compressive strength and tensile strength by diametral compression. Among the characterization tests, the XRD test stands out, which indicated the presence of smectite and vermiculite in the ettringite sample, active clay minerals, in addition to the liquidity limit and plasticity limit tests, which diverged from the expected, in which there were reduction of these parameters even with the presence of active clay minerals in the composition of the ettringite, being necessary to verify the interference of the pH in the chemical reactions inside the matrices. As for the simple compressive strength (q_u), the matrices containing only soil-cement (SC) showed much higher strength gains than the other matrices, with emphasis on the SC5 matrix which at 14 days showed q_u equal to 3.23 MPa. The matrices containing soil-cement-ettringite (SCE) had an evident reduction of strength in relation to the matrices containing soil-cement, in which it can be observed that the addition of ettringite interferes in the cement hydration reactions. For the soil-ettringite (SE) matrices, the increase in resistance in relation to the natural soil was not greater than 67.18%. For the tensile strength by diametral compression, there was a similar pattern, in which the SC matrices presented higher values than the others. However, lower values were found than those obtained by pure soil in the SE matrices. The results indicate that the junction of ettringite with soil-cement does not seem to be interesting in terms of strength.

Keywords: Sandy Soil; Soil Stabilization; Effluents; Anodizing; Industrial Waste; Ettringite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Horizontes constituintes de um perfil de solo.....	19
Figura 2.2 – (a) tetraedro de sílica e (b) octaedro de alumina.....	22
Figura 2.3 – (a) lâmina sílica e (b) lâmina de alumina.....	22
Figura 2.4 – Espécies de argilominerais.....	23
Figura 5.1 – Fluxograma referente a sequência dos processos de anodização.....	34
Figura 6.1 – Mineral etringita encontrado: a) na Alemanha; b) na região de Kuruman no Sul da África.....	36
Figura 6.2 – Estrutura do cristal de etringita.....	37
Figura 6.3 – Imagem da interface pasta/agregado de uma amostra de concreto contendo cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cristais de etringita e cristais de gipsita.....	37
Figura 8.1 – Localização do local da coleta.....	41
Figura 8.2 – Foto do equipamento com georreferenciamento do ponto de coleta	41
Figura 8.3 – Foto do local de coleta	42
Figura 8.4 – Solo secando ao ar.....	42
Figura 8.5 - Equipamento Hach DR 2800.....	44
Figura 8.6 – Reagentes: (a) Cloreto de Cálcio e (b) Hidróxido de Alumínio.....	44
Figura 8.7 – Agitação das soluções no Jar Test.....	45
Figura 8.8 – Solução em Repouso.....	45
Figura 8.9 – Lodo: (a) úmido e (b) após secagem em estufa.....	45
Figura 8.10 – (a) Moinho utilizado e (b) vista interna do moinho com material e barras de aço.....	46
Figura 8.11 – Soluções em repouso para ensaio de pH.....	47
Figura 8.12 – Leitura do pH das soluções.....	48
Figura 8.13 – Dosagem físico química: (a) Solo-cimento e (b) solo-etringita.....	51
Figura 8.14 – Equipamento ensaio de compactação: (a) cilindro e (b) soquete.....	53
Figura 8.15 – Desforma dos corpos-de-prova.....	54
Figura 8.16 – Equipamento para moldagem de corpos de prova de 5x10 cm para ensaios de resistência.....	54
Figura 8.17 – Corpos de prova em imersão.....	55
Figura 8.18 – Prensa de CBR, utilizada para os ensaios de resistência.....	55

Figura 8.19 – Peça para posicionamento do corpo-de-prova para ensaio de tração por compressão diametral.....	56
Figura 9.1 – Ensaio de Massa específica dos Sólidos em duas amostras.....	59
Figura 9.2 – Gráfico da análise granulométrica do solo de Mandaguaçu-PR.....	59
Figura 9.3 - Granulometria da Etringita.....	60
Figura 9.4 – Curva granulométrica do cimento Portland CP II – Z 32.....	61
Figura 9.5 - Resultado da dosagem físico-química.....	63
Figura 9.6 - Resultado da dosagem físico-química de Ladeira (2021).....	64
Figura 9.7 – Ensaio de: (a) Limite de Liquidez e (b) Limite de Plasticidade.....	65
Figura 9.8 – Descoloração no equipamento logo após o uso.....	67
Figura 9.9 – Teste de secagem ao ar livre do lodo contendo etringita.....	67
Figura 9.10 – DRX do solo de Mandaguaçu-PR.....	71
Figura 9.11 – DRX do solo de Mandaguaçu-PR por Ladeira <i>et al.</i> (2019).....	72
Figura 9.12 – DRX da Etringita.....	73
Figura 9.13 – DRX do Cimento Portland CII -Z -32.....	73
Figura 9.14 – Curvas de compactação do (a) solo e (b) solo-cimento.....	74
Figura 9.15 – Curvas de compactação do (a) solo-tringita e (b) solo-cimento-tringita.....	75
Figura 9.16 – Gráfico de Resistência à Compressão Simples.....	78
Figura 9.17 – Gráfico de Resistência à Compressão Simples normalizada.....	78
Figura 9.18 – Corpo-de-prova de matriz solo-cimento após ensaio de resistência a compressão simples.....	80
Figura 9.19 – Corpo-de-prova de matriz solo-tringita após ensaio de resistência a compressão simples.....	80
Figura 9.20 – Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	81
Figura 9.21 – Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral normalizada.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1 – Classificação das pozolanas estabelecidas pela NBR 12653.....	39
Tabela 7.2 – Exigências químicas estabelecidas pela NBR 12653.....	39
Tabela 8.1 – Determinação das misturas solo-cimento e solo-etringita.....	51
Tabela 8.2 – Determinação das misturas solo-cimento-etringita.....	51
Tabela 9.1 – Resumo da análise química realizada no Agrisolum.....	57
Tabela 9.2 – Matrizes adotadas.....	65
Tabela 9.3 – Limites de Atterberg das Matrizes.....	65
Tabela 9.4 – Comparativo dos Limites de Atterberg para o solo de Mandaguaçu-PR.....	66
Tabela 9.5 – Resultado dos ensaios de pH.....	69
Tabela 9.6 – Parâmetros de compactação.....	75
Tabela 9.7 – Média dos valores dos índices físicos dos corpos-de-prova moldados.....	76
Tabela 9.8 – Resultados da Resistência a Compressão Simples.....	79
Tabela 9.9 – Resultados da Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS

IP	– Índice de plasticidade
SC	– Solo-cimento
OMS	– Organização Mundial da Saúde
EMBRAPA	– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
SNLCS	– Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo
SiBCS	– Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
ABCP	– Associação Brasileira de Cimento Portland
CBR	– California bearing ration
LL	– Limite de liquidez
LP	– Limite de plasticidade
IPT	– Instituto de Pesquisas Tecnológicas
CP's	– Corpos-de-prova
SE	– Solo-etringita
SCE	– Solo-cimento-etringita
pH	– Potencial hidrogeniônico
CTC	– Capacidade de troca catiônica
CP II – Z	– Cimento Portland Composto com Pozolana
DRX	– Difração de raio-X
qu	– Resistência à compressão simples na ruptura
σ_r	– Resistência à tração por compressão diametral na ruptura
ρ_s	– Massa específica dos sólidos
ρ_d	– Massa específica aparente seca
ρ	– Massa específica
e	– Índice de vazios
η	– Porosidade
Sr	– Saturação
S _{rup}	– Saturação na ruptura
ABS	– Absorção de água
H.R.B.	– Highway Research Board
SUCS	– Classificação Unificada do Solo
PCZ	– Ponto de carga zero

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	– Etringita
Ca	– Cálcio
Al	– Alumínio
SiO_2	– Dióxido de silício (Sílica)
Fe	– Ferro
CaSO_4	– Sulfato de cálcio (gipsita)
Al_2O_3	– Óxido de alumínio
Fe_2O_3	– Óxido de Ferro
Cu	– Cobre
Mg	– Magnésio
Mn	– Manganês
Zn	– Zinco
H_2SO_4	– Ácido sulfúrico
Si	– Silício
Cr	– Cromo
Ti	– Titânio
PAC	– Policloreto de alumínio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	– Hidróxido de cálcio (Portlandita)
$\text{Al}(\text{OH})_3$	– Hidróxido de alumínio
KCl	– Cloreto de potássio
CO_2	– Gás carbônico
2θ	– Posição angular
d	– Distância interplanar
Cd	– Cádimo
Co	– Cobalto
Pb	– Chumbo
SO_4^{2-}	– Sulfato
C-S-H	– Silicato de cálcio hidratado (Tobermorita)
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AFe}$	– Ferroaluminato de cálcio
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$	– Aluminato tricálcico
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$	– Silicato bicálcico
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$	– Silicato tricálcico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
	<i>1.2.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>17</i>
	<i>1.2.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>18</i>
2.	SOLO	19
2.1.	SOLO ARENOSO.....	20
2.2.	ARGILAS.....	21
2.3.	SOLOS TROPICAIS	23
2.4.	PROPRIEDADES DOS SOLOS	25
	<i>2.4.1. Estrutura.....</i>	<i>25</i>
	<i>2.4.2 Textura e consistência.....</i>	<i>26</i>
	<i>2.4.3. Porosidade</i>	<i>26</i>
	<i>2.4.4. Umidade.....</i>	<i>27</i>
	<i>2.4.5. Peso Específico.....</i>	<i>27</i>
	<i>2.4.6. Capacidade de troca catiônica (CTC), pH e matéria orgânica</i>	<i>28</i>
3.	CIMENTO PORTLAND	29
3.1.	PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	30
4.	SOLO-CIMENTO	32
5.	PROCESSO DE ANODIZAÇÃO DE ALUMÍNIO.....	32
6.	ETRINGITA	36
7.	ADIÇÕES MINERAIS EM COMPOSTOS COM CIMENTO PORTLAND ...	38
7.1.	ADIÇÕES MINERAIS COM ATIVIDADE POZOLÂNICA	38
8.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
8.1.	MATERIAIS	40
	<i>8.1.1. Solo</i>	<i>40</i>
	<i>8.1.2. Cimento.....</i>	<i>42</i>
	<i>8.1.3. Etringita.....</i>	<i>43</i>
8.2.	MÉTODOS.....	47
	<i>8.2.1. Determinação do pH do Solo e Misturas de Solo-Etringita.....</i>	<i>48</i>
	<i>8.2.2. Ensaios de DRX.....</i>	<i>49</i>
	<i>8.2.3. Determinação de Presença de Matéria Orgânica no Solo.....</i>	<i>50</i>
	<i>8.2.4. Distribuição Granulométrica a Laser da Etringita.....</i>	<i>51</i>

8.2.5. Atividade Pozolânica da Etringita.....	51
8.2.6. Dosagem Físico-Química de Misturas de Solo-cimento, Solo-tringita e Solo-cimento-tringita.....	51
8.2.7. Determinação Da Curva De Compactação Na Energia Normal Em Função Do Teor De Etringita.....	53
8.2.8. Determinação Da Resistência À Compressão De Misturas De Solo, Cimento E Etringita Moldadas Nas Condições Ótimas De Compactação.	54
8.2.9. Determinação Da Resistência À Tração Por Compressão Diametral De Misturas De Solo, Cimento E Etringita Moldadas Nas Condições Ótimas De Compactação.	57
9. RESULTADOS E ANÁLISES	58
9.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	58
9.1.1. Caracterização do solo.....	58
9.1.2. Distribuição Granulométrica A Laser Da Etringita.....	61
9.1.3. Atividade Pozolânica Da Etringita.....	63
9.1.4. Dosagem Físico-Química De Misturas De Solo-Cimento Em Função Da Quantidade De Etringita Em Substituição Ao Cimento	63
9.1.5. Limites de Atterberg.....	66
9.1.6. Classificação HBR e Unificada do Solo.....	69
9.1.7. Ensaio de pH.....	69
9.1.8. Difração De Raio-X (DRX).....	71
9.2. CURVAS DE COMPACTAÇÃO	75
9.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA.....	76
9.6.1. Resistência a Compressão Simples.....	77
9.6.2. Resistência a Tração por Compressão Diametral.....	81
10. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

O solo, com uma infinidade de funções e usos, tem sua origem na desintegração e decomposição de rochas por meio de um conjunto de processos mecânicos, químicos e biológicos sob a influência da ação do clima, da temperatura, da biota e pelo próprio relevo da região.

Além de servir de fonte para o desenvolvimento e manutenção do ecossistema terrestre, tem papel fundamental na área agrícola e é um material amplamente utilizado na construção civil como base para edificações, subleito, base e sub-base de pavimentações e em obras geotécnicas.

Embora possua inúmeras possibilidades de uso em obras geotécnicas, o solo em alguns casos é inadequado, pois suas propriedades (plasticidade, permeabilidade, resistência e expansão/retração) não atendem os requisitos de um determinado projeto de engenharia. Nessas situações se tem a opção de buscar o solo em outras jazidas ou então da realização de procedimentos para melhorar suas propriedades, sendo muito comum a adição de aglomerantes como o cimento (SANTOS, 2004).

A mistura de aglomerante ao solo permite a mudança das propriedades relacionadas à resistência e deformação da mistura. Muitos autores (ALMEIDA *et al.*, 2016; ROCHA; REZENDE, 2017; SILVA *et al.*, 2018; SALOMÃO; SILVA; BARBOSA, 2019) trazem a adição de cimento Portland como uma técnica muito eficiente para aumentar a resistência e a rigidez dos mesmos e, no caso de solos argilosos, para a redução da plasticidade.

Ao se realizar a estabilização química do solo com cimento Portland se tem o aumento da capacidade de suporte de carga dessa mistura além do aumento da resistência à compressão simples, diminuição da deformabilidade, diminuição da permeabilidade, redução do índice de plasticidade (IP) em solos plásticos, alteração nas características de contração e retração, entre outros (ROHLFES JUNIOR, 1996).

O solo-cimento (SC) é uma mistura de solo, cimento Portland e água, devidamente compactada, resultando em um material duro, cimentado e com ganho de resistência (FREIRE; BERALDO, 2003). A porcentagem de cimento utilizada vai depender do tipo de solo e do tipo de projeto, sendo necessário um estudo da sua dosagem.

Buscando a redução no consumo de altas quantidades de cimento, tem-se utilizado a incorporação de aditivos, fibras e outros materiais minerais com presença de atividade pozolânica na mistura solo-cimento, tais como fibra de sisal, cinza do bagaço de cana-de-

açúcar, resíduo cerâmico moído, lodo de esgoto calcinado, entre outros (ALMEIDA, 2018; FREITAS, 2018; OJEDA FARÍAS *et al.*, 2018; PIZONI, 2019).

O uso de lodo de processos industriais na construção civil vem sendo estudado em diversas aplicações, entre eles o lodo da indústria de anodização de peças de alumínio (SARTOR, 2006; SPRICIGO, 2017; NUERNBERG, 2018).

O processo de anodização, geralmente utiliza como principal reagente o ácido sulfúrico. Com o uso desse composto químico no processo de acabamento de superfícies, assim como na lixiviação de minerais, no processamento de minérios fosfatados, entre outros, se tem a geração de um volume considerável de efluentes contendo altas concentrações de sulfato (FERREIRA; LIMA; LEÃO, 2011), que se for lançado ao meio aquoso sem um tratamento adequado pode gerar problemas de degradação dos mananciais.

Segundo a Organização Mundial da Saúde - OMS, o teor recomendável para a concentração de sulfato em água potável para consumo deve ser inferior a 500 mg/L. No Brasil, o valor máximo permitido de sulfato em água para consumo humano é de 250 mg/L, ou seja, metade do teor recomendável pela OMS (BRASIL, 2021; WHO, 2008). Com relação aos corpos hídricos, no Brasil as condições para o lançamento de efluentes oriundos de sistemas de tratamento é regulada pela Resolução CONAMA no. 430 (BRASIL, 2011), cujos padrões de lançamento não incluem um parâmetro direto da concentração de sulfato.

Atualmente, via de regra, indústrias de tratamento de superfície utilizam um tratamento físico-químico a base de coagulante e polímeros para o tratamento dos efluentes oriundos de seus processos, que apresenta boa eficiência, adequando-o aos parâmetros atuais de lançamento nos corpos hídricos, mas pouco reduz a concentração de sulfato. De acordo com Sartor (2006), esta etapa produz lodo como subproduto, que pode ser dissolvido em ácido sulfúrico para recuperação do hidróxido de alumínio ou descartado em aterros industriais, o que pode ser dispendioso.

Dentre os métodos aplicáveis para a remoção do sulfato desses efluentes, a fase mineralógica etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) tem sido avaliada como precipitados os quais removem sulfato da solução aquosa concomitante à sua formação (MOLKE, 2019).

Esse composto mineral também é formado durante o processo de hidratação do cimento, por meio da reação química entre o aluminato tricálcico (C_3A), a gipsita e a água. Conforme Melo (2010), a formação dos cristais de etringita, ocorre durante a primeira hora após a hidratação do cimento, sendo essa etapa responsável pelo desenvolvimento da resistência inicial da pasta. No decorrer do tempo há o decréscimo da quantidade de sulfato dissolvido no meio e

a etringita instabiliza-se, convertendo-se em monossulfato hidratado (C_4ASH_{18}), o qual cristaliza em placas hexagonais (METHA; MONTEIRO, 2008), mais estável, contudo, altamente poroso e de baixa resistência mecânica.

Pode-se inferir que a etringita, derivada do processo de tratamento de efluentes de anodização, já está estabilizada e não se converteria em monossulfato hidratado, composto mais poroso. O uso desse material em matrizes de solo contendo cimento ou não, busca uma forma de reduzir a instabilidade desse composto dentro da matriz, conferindo resistência. Em um contexto no qual busca-se a conservação do ambiente, se tem a necessidade de desenvolver processos sustentáveis que visam a redução da concentração de sulfato em efluentes industriais ao mesmo tempo em que se tem um grande consumo de cimento na indústria da construção. Estudar a aplicação desse material como substituto do cimento Portland, ou até mesmo no solo natural, abre a possibilidade de fornecer uma destinação diferenciada, além de buscar uma redução no consumo de matéria prima em obras geotécnicas.

Logo o objetivo da pesquisa é avaliar, por meio da realização de ensaios laboratoriais, o uso da etringita, proveniente de pós tratamento em efluentes de anodização, em matrizes de solo-cimento, servindo como alternativa à destinação final para esse resíduo e buscando obter uma mistura com melhor desempenho mecânico para ser empregada em obras geotécnicas. Para isso foram adotados diferentes teores de cimento e etringita para moldagem de corpos-de-prova nas suas respectivas umidades ótimas de compactação.

1.1 JUSTIFICATIVA

A estabilização química de solos é um processo muito utilizado em obras geotécnicas. Um dos aspectos analisados para a escolha desse tipo de técnica é o consumo de materiais, pois dependendo das características do solo se necessita de uma quantidade muito alta de material ligante, o que encarece o projeto, podendo o tornar inviável (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Além do aspecto financeiro, atualmente, ao se analisar e escolher processos se tem a questão da conservação ambiental cada vez mais presente. A produção do cimento, por exemplo, é um processo industrial que causa grande impacto ao ambiente e a saúde, tanto pelo consumo de matéria prima, quanto pela emissão de gases e poluentes.

Conforme o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 2010), a indústria do cimento é responsável pela parcela de aproximadamente 5% das emissões mundiais de CO_2 , sendo o processo de calcinação responsável por 60% a 65% do total das emissões. No

Brasil, em 2019, se teve 24,9% das emissões de CO₂ por processos industriais atribuídas ao setor de produção de cimento (BRASIL, 2020).

Ao se estudar a viabilidade de se incorporar produtos como substituição parcial do cimento Portland em uma matriz de solo-cimento, busca-se uma forma de minimizar esses problemas, uma vez que há a possibilidade da redução da quantidade necessária desse material (PEREIRA, 2012).

Alinhado a isso, comumente no Brasil se tem o processo de tratamento do efluente de anodização com o ajuste do potencial hidrogeniônico (pH) e uso de polímeros e floculantes, sendo reduzido um percentual da concentração de sulfato e o sobrenadante sendo reutilizado ou descartado diretamente em corpos hídricos (MENEGHESSO, 2009).

Porém esse efluente ainda apresenta uma alta concentração de sulfato que em corpos d'água afeta de maneira negativa a vida aquática e se essa água for ingerida, por humanos ou animais, se tem um efeito laxativo (USEPA, 2002 apud. PINA *et al.*, 2011).

O sulfato no abastecimento industrial e na rede de esgoto pode acarretar em problemas como incrustações em caldeira e trocadores de calor, corrosão em coletores de esgoto de concreto e contaminação de mananciais (NASCIMENTO, 2017). Conforme o autor, em trechos de baixa declividade e com existência de matéria orgânica, pode-se ter a transformação do sulfato e sulfeto, com exalação de gás sulfídrico, que além de causar problemas de corrosão em coletores é tóxico.

O estudo da utilização da etringita em matrizes de solo-cimento, busca atender aos aspectos de conservação ambiental relacionados ao processo de anodização e da indústria da construção civil, além de fornecer uma alternativa para a destinação desse resíduo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o efeito do uso da etringita, obtida como resíduo de um pós tratamento em efluente de anodização, como um material geotécnico.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a precipitação da etringita em laboratório, por meio de pós tratamento em efluente de anodização;
- Realizar a caracterização física, química e mineralógica da etringita;
- Avaliar o efeito da incorporação da etringita nas propriedades de compactação de um solo típico do Município de Mandaguaçu, no noroeste do estado do Paraná;
- Avaliar o efeito da incorporação da etringita no comportamento mecânico das matrizes, submetidas a diferentes teores de cimento/etringita em função do tempo de cura;

2. SOLO

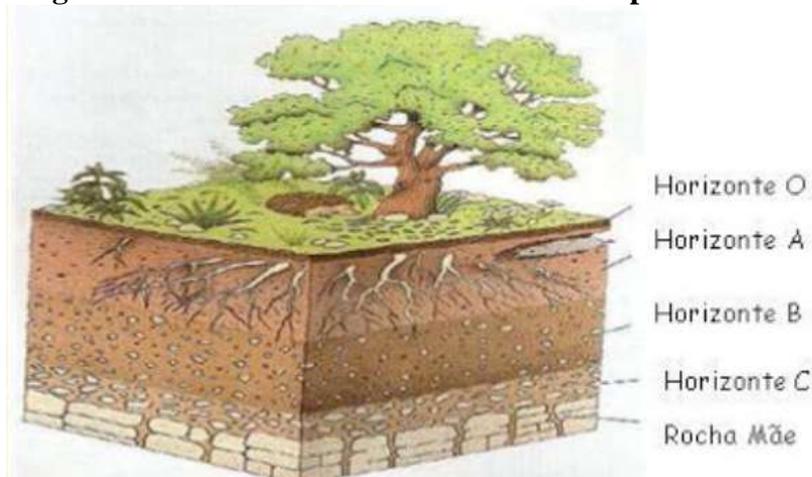
O termo “solo” pode ter várias definições de acordo com a área de estudo envolvida, independente disso o solo tem papel fundamental para a humanidade. Em termos de engenharia, o solo pode ser definido como um material não cimentado, composto por grãos minerais e matéria orgânica decomposta, com os espaços vazios entre as partículas preenchidos por líquido e gás.

O solo residual pode ser definido como uma formação natural de espessura variável, resultante da transformação de uma rocha-mãe por meio da influência de processos físicos, físico-químicos e biológicos, cuja estrutura é solta e removível.

Segundo Santos *et al.* (2013), o solo é um conjunto de corpos naturais, tridimensionais, dinâmicos, compostos de três fases, sólida, líquida e gasosa, sendo formado por materiais minerais e orgânicos e que recobre a maior parte da superfície terrestre. “Quando examinados a partir da superfície, consistem de seções aproximadamente paralelas, organizadas em camadas e/ou horizontes que se distinguem do material de origem inicial” em decorrência dos processos transformadores.

Em Pedologia, as camadas que constituem um perfil são denominadas horizontes e, como mostra a Figura 2.1, designam-se pelas letras: O (Horizonte orgânico superficial), A (Horizonte mineral superficial ou subjacente ao Horizonte O), B (Horizonte superficial mineral abaixo do horizonte B), C (Horizonte mineral pouco afetado pelos processos pedogenéticos mais superficiais) e R (Substrato rochoso). Esses horizontes se diferenciam pela cor e composição química (DELGADO, 2007; CAPUTO, 1988).

Figura 2.1 – Horizontes constituintes de um perfil de solo



Fonte: Terra em transformação (2009).

Os solos apresentam propriedades que influenciam diretamente no seu comportamento, as quais em função do uso ou da área de análise podem apresentar maior ou menor relevância. O comportamento de um o solo no campo depende das propriedades das partículas, assim como das propriedades derivadas da interação entre essas partículas dentro da massa de solo. De forma geral, podem-se separar as propriedades do solo em físicas, químicas e mecânicas.

Mesmo sendo heterogêneo e complexo, o solo é um material muito utilizado na construção civil devido ao seu baixo custo, disponibilidade e facilidade de manuseio, embora se devam observar as questões da durabilidade e dos efeitos da umidade (ABIKO, 1980).

2.1.SOLO ARENOSO

Segundo Das (2011), uma forma de classificar o solo é pelo tamanho das partículas, sendo sua separação feita em pedregulho, areia, silte e argila e os intervalos de variação mudando para diferentes organizações. Os solos arenosos são compostos em sua maior parte por partículas de areia.

No Brasil, a ABNT NBR 6502/1995 define a areia como sendo um “solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm”. Em relação a sua composição mineralógica, esse tipo de solo é principalmente constituído por quartzo, podendo conter também outros minerais primários em quantidades variadas, tais como vários tipos de feldspato e alguns tipos de óxidos (BRADY, 1989). Quanto ao formato das partículas de areia, estes podem ser arredondados, ou, então, angulosos, com faces lisas ou rugosas com grãos rígidos e volumosos (SENÇO, 2007).

Os solos de granulometria mais grossa, como no caso das areias, apresentam boa capacidade de suporte de carga, além de uma ótima capacidade de drenagem. Esse tipo de material é praticamente incompressível quando está no estado compactado, mas em seu estado solto pode-se ter alterações significativas de volume (BUDHU, 2010).

Para Brady (1989), as areias possuem capacidade de retenção de água reduzida devido ao grande espaçamento entre as partículas sólidas, o que causa uma rápida passagem de água e ar pelos poros, além disso são solos que não podem ser moldados, ou seja, sem plasticidade e não possuem água adsorvida.

2.2.ARGILAS

As argilas podem ser definidas como a fração mais fina dos solos, constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade (ABNT, 1995).

Para Das (2011), as argilas são formadas principalmente por partículas de mica, argilominerais e outros minerais, com formato lamelar e diâmetro menor que 0,002 mm, no qual os argilominerais são silicatos de alumínio complexos em formato de cristais, dentre os quais se destacam três grupos principais: caulinitas, montmorilonitas e ilitas.

Segundo Caputo (1988), as argilas apresentam uma constituição química complexa, constituídas basicamente de sílica (SiO_2) em forma coloidal e sesquióxidos metálicos da forma geral R_2O_3 onde o símbolo R representa o alumínio (Al) e o ferro (Fe). A razão em peso entre sílica e sesquióxidos, chamada razão de sesquióxidos, varia de 1,33 a 2,00 em solos lateríticos, sendo maior que 2,00 para os solos não-lateríticos.

Solos de granulometria fina apresentam baixa capacidade de carga em comparação com solos de granulometria grossa, são praticamente impermeáveis, apresentam variação de volume e resistência com a mudança na umidade e seu comportamento varia com a composição mineralógica (BUDHU, 2010).

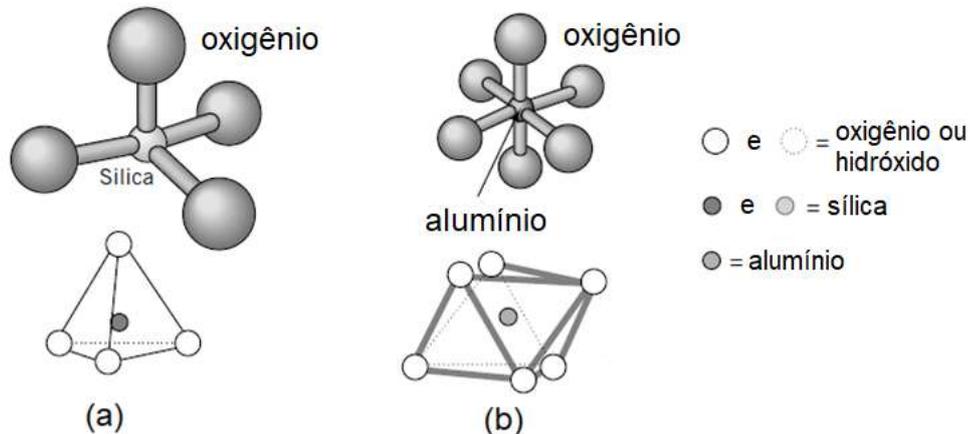
Conforme Brady (1989), a superfície de contato é a característica mais influenciada pelo tipo e tamanho das partículas. Quanto mais fina a textura do solo, maior será a superfície de contato de suas partículas, o que está afeta diretamente propriedades como a adsorção de água, dilatação, plasticidade e coesão do solo.

A maioria dos solos apresenta uma porcentagem de argila, a qual também pode ser definida como partículas que “desenvolvem plasticidade ao serem misturadas a uma quantidade de água limitada” (GRIM, 1953 apud DAS, 2011).

2.2.1. Argilominerais

Os minerais são classificados de acordo com a composição química e estrutura. Os argilominerais são silicatos de alumínio complexos formados por duas unidades básicas: tetraedro de sílica, composto por um átomo de silício rodeado por quatro átomos de oxigênio (Figura 2.2a); e octaedro de alumina, composto por um átomo de alumínio rodeado por seis hidroxilas (Figura 2.2b) (DAS, 2011).

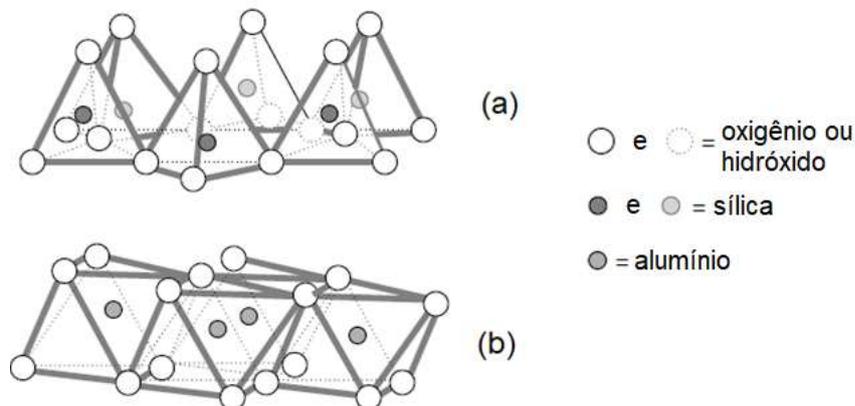
Figura 2.2 – (a) tetraedro de sílica e (b) octaedro de alumina.



Fonte: adaptado de Budhu (2010).

Os tetraedros de sílica se combinam para formar *lâminas sílica*, que consiste em camadas finas no qual três íons de oxigênio são compartilhados entre os tetraedros de sílica (Figura 2.3a) e a combinação de unidades de octaedros de alumina formam as *lâminas de alumina* (Figura 2.3b) (BUDHU, 2010).

Figura 2.3 – (a) lâmina sílica e (b) lâmina de alumina.

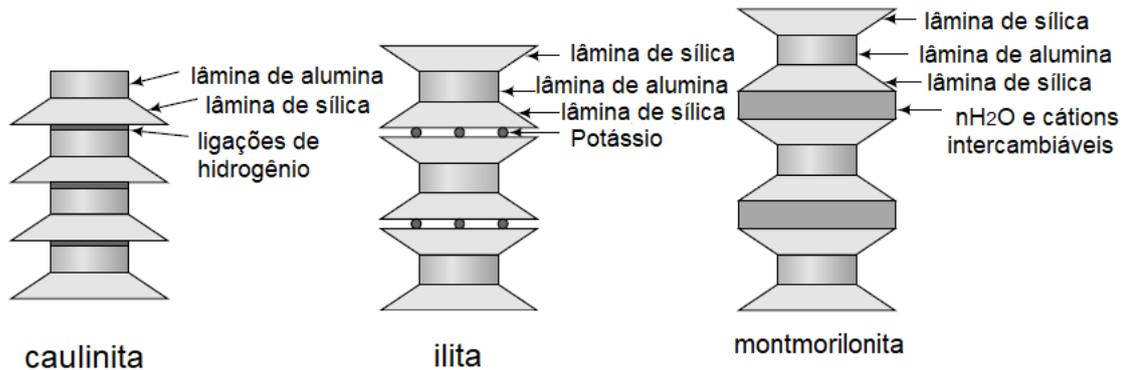


Fonte: adaptado de Budhu (2010).

Para Das (2011), as *lâminas de alumina* são chamadas de *lâminas octaédricas* ou *lâminas de gbsita*, sendo em alguns casos os átomos de alumínio substituído pelo magnésio, no qual a lâmina passa a ser denominada de *lâmina de brucita*.

Existem três grupos principais de argilominerais: as caulinitas, as montmorilonitas e illitas (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Espécies de argilominerais



Fonte: adaptado de Budhu (2010).

Conforme Terzaghi, Peck e Mesri, (1996), o comportamento do solo, principalmente em relação a suas propriedades físicas, está relacionado com as interações entre as partículas de argila, a água e os diversos materiais dissolvidos na água.

As caulinitas são argilominerais relativamente estáveis na presença de água, já as montmorilonitas, principal integrante de grupo de minerais argilosos conhecidos como esmectitas, são muito expansivas e instáveis na presença de água devido ao tipo de ligação entre as suas unidades. No caso das illitas se tem uma estrutura semelhante as montmorilonitas, porém menos expansivas. As unidades das illitas diferente das montmorilonitas são ligadas por potássio (CAPUTO, 1988; DAS, 2011).

As argilas montmorilonitas apresentam um maior limite de liquidez (LL), seguidos das illíticas e por fim das caulíníticas. Se a montmorilonita é o mineral predominante, pode-se ter a infiltração de grandes quantidades de água nos espaços entre as partículas, o que aumenta o limite de liquidez desse solo (BUDHU, 2010).

Além das caulinitas, illitas e montmorilonitas, outros argilominerais são comumente encontrados, tais como a clorita, a halosita, alofane, a vermiculita e a atapulgita (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; DAS, 2011).

2.3.SOLOS TROPICAIS

Outra questão a ser observada é o caso de solos tropicais, onde se tem solos formados essencialmente por processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas (RESCHETTI JUNIOR, 2008).

Os solos tropicais encontram-se em condições não saturadas, além de serem submetidos a variações de umidade constantes, causando modificações no comportamento geotécnico dos

mesmos ao longo de sua vida útil. Visando o uso desse material na construção civil é necessário compreender seu comportamento mecânico após a compactação (DELGADO, 2007).

Em um perfil de solo tropical normalmente são encontrados dois tipos de solo, o laterítico e o saprolítico. O primeiro tipo compreende os solos que sofreram um processo de laterização em decorrência de intemperismo intenso e rápido, característicos de regiões de altas temperaturas, com estações chuvosas e secas alternadas, tendo como resultado a lixiviação da sílica coloidal e conseqüentemente um enriquecimento do solo com óxidos de ferro e alumínio, além da permanência da caulinita como argilo-mineral predominante. Esses solos ocupam a parte superficial do maciço em áreas bem drenadas e possuem coloração característica: vermelha, alaranjada e amarela (CAPUTO, 1988; DELGADO, 2007; NAGOMI; VILLIBOR, 1995 apud RESCHETTI JUNIOR, 2008).

Quanto aos solos saprolíticos, estes constituem predominantemente a parte subjacente da camada de solos lateríticos. Localizam-se em terrenos bem drenados (sem nível freático emergente). São predominantemente heterogêneos (manchados, listrados ou xistosos) e apresentam frequentemente camadas de formas complexas, presença de matações, dobras e camadas inclinadas. Originam-se pela decomposição de rocha matriz, sendo, portanto, genuinamente residual e assim, herdando a as estruturas, além de desenvolver outras feições decorrentes da heterogeneidade de atuação do processo de intemperismo. Apresentam cores variadas, tais como: branco, preto, azul, verde, roxo, róseo, amarelo, vermelho e variegado (DELGADO, 2007).

Segundo Gutierrez (2005), o tipo mais comum de solo laterítico é o latossolo, cuja terminologia é adotada pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo (SNLCS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Os Latossolos são solos espessos, com camadas superiores a 5 metros de profundidade, presente em praticamente todas as regiões do país, derivados de diferentes tipos de rochas (GUTIERREZ, 2005).

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos - SiBCS, os latossolos são solos normalmente muito profundos com espessura raramente inferior a 1 m, apresentam horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 2 a 3 m da superfície. O horizonte B latossólico apresentam solos em avançado estado de intemperização, com lixiviação das bases e constituído, geralmente, por quantidades variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, argilominerais do tipo 1:1, quartzo e outros minerais. Esse tipo de horizonte possui textura francoarenosa ou mais fina com baixos teores de silte (SANTOS *et al.*, 2013).

Cerca de 50% do território nacional e 30% do território do estado do Paraná são revestidos por latossolos, sendo, no último caso, encontrados em dois tipos de texturas predominantes, arenosa no noroeste do estado e argilosa no norte (GUTIERREZ, 2005).

A pesquisa atual foi desenvolvida com o solo de Mandaguaçu, cidade situada na região metropolitana de Maringá e que pertence à região Norte-Central Paranaense, onde se tem um solo derivado da Formação Caiuá, a qual é constituída, principalmente, por arenitos finos e muito finos, com cores que variam do vermelho-arroxeadado a vermelho, tendo pequenos teores de matriz lamítica (lama litificada) (GUTIERREZ, 2005; GONÇALVES *et al.*, 2018).

2.4.PROPRIEDADES DOS SOLOS

Como algumas das propriedades físicas de relevância para o estudo dos solos se têm a estrutura, textura, consistência, porosidade, umidade, peso específico, densidade, permeabilidade (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; BUDHU, 2010).

As propriedades químicas do solo estão relacionadas à capacidade de troca catiônica, potencial hidrogeniônico (pH), teor de nutrientes, condutividade elétrica e matéria orgânica, já as propriedades mecânicas ao comportamento tensão vs. deformação desse material (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009; MORETI, 2012).

2.4.1. Estrutura

A estrutura do solo é uma propriedade relacionada com o arranjo das suas partículas sólidas (CAPUTO, 1988). Para Hillel (1982, apud. FERREIRA *et al.*, 1999) trata-se de uma propriedade de cunho qualitativo diretamente relacionada com os processos de formação desse solo.

Segundo o SiBCS, a estrutura do solo tem grande influência no desenvolvimento de plantas, relacionados a aspectos como o sistema radicular, armazenamento e disponibilidade de água e nutrientes e resistência à erosão. Esta propriedade física está ligada a três aspectos principais, sendo eles o tipo e o tamanho das partículas e o grau de desenvolvimento da massa de solo (SANTOS *et al.*, 2013).

Conforme Santana (1998 apud. LIMA *et al.*, 2019), em relação ao comportamento de solo tropicais compactados em função da sua estrutura, tem-se que os solos com fração grossa constituído por partículas mais angulares e rugosas possuem resistência mais elevada, além de que a presença de partículas mais arredondadas influencia na propriedade massa específica aparente seca.

2.4.2. Textura e consistência

O termo textura refere-se ao grau de finura e uniformidade do solo, sendo relacionado com a fração granulométrica das partículas de areia, argila e silte e a sensação que estas partículas oferecem ao se esfregar o solo entre os dedos (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996). Segundo Budhu (2010) essa propriedade do solo refere-se à aparência ou sensação de um solo ao tato, tendo a areia e o cascalho como solos granulares e as argilas e siltes como solos de granulometria fina.

Para o SiBCS a textura do solo representa a distribuição quantitativa das frações de areia, argila e silte dentro de uma amostra, sendo utilizado como parâmetro de descrição, identificação e classificação de solo (SANTOS, *et al.*, 2013).

As argilas apresentam sensação suave ao tato, são pegajosas ao toque quando molhadas, mas são resistentes quando secas, além da água fluir mais lentamente por elas. Já as areias são ásperas e apresentam partículas visíveis ao olho nu, são menos resistentes que as argilas quando secas e drenam água muito rapidamente. Os siltes, embora sejam mais finos que a areia, ainda apresentam certa aspereza ao toque, o que se assemelha a uma lixa fina, além de apresentar melhor drenagem em relação as argilas (BUDHU, 2010).

Quanto a consistência, essa é uma propriedade ligada a plasticidade dos solos, sendo o primeiro termo relativo ao grau de adesão entre as partículas de solo e à resistência oferecida contra forças que tendem a deformar ou romper a massa de solo. Já a plasticidade está relacionada com a quantidade e o tipo de argila dentro do maciço de solo, pois quanto a fração de argila maior é a variedade de estados de consistência em que pode ser encontrado (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Conforme Caputo (1988) a plasticidade é uma das propriedades mais importantes de solos argilosos e consiste, para determinadas condições de umidade, na maior ou menor capacidade de se modelar o solo sem que haja variação do seu volume.

2.4.3. Porosidade

De forma geral, pode-se definir a porosidade de uma amostra de solo como a razão do volume de vazios pelo volume total da amostra, sendo o volume de vazios o volume que não é ocupado pelas partículas sólidas (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

A porosidade em solos granulares grossos pode variar amplamente conforme o arranjo das partículas, a forma dos grãos, a uniformidade do tamanho do grão, e das condições de sedimentação. Para um mesmo tipo de solo em um estado mais denso se tem uma menor porosidade (BUDHU, 2010).

O espaço poroso de um solo está relacionado com a porção volumétrica ocupada por ar e água no solo, sendo o tamanho destes espaços, em sua maior parte, decorrência da arrumação entre as partículas (BRADY, 1989). Segundo Teixeira *et al.* (2017), um dos aspectos importantes para compreender o comportamento do solo é o conhecimento da porosidade total deste, pois leva a entender o movimento e a retenção de água, ar e soluções dentro do solo.

2.4.4. Umidade

A umidade é umas das principais propriedades do solo, pois interfere diretamente da consistência de argilas e no grau de compactação dos solos, sendo expressa geralmente em porcentagem do peso de água para o peso de solo (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996; BUDHU, 2010; LIMA *et al.*, 2019).

Dentro do solo pode-se ter a água apresentada sob diversas formas, com propriedades que podem variar totalmente da água livre, as quais seriam a água constituinte em determinados tipos de solo, a água adsorvida, a água higroscópica, a água capilar e, por fim, a água livre (SENÇO, 2007).

A água possui uma elevada tensão de superfície, que fica evidenciado na interface água-ar, cujo produto final leva as partículas de água a se comportar como se estivessem recobertas por uma membrana elástica. Esse fenômeno afeta diretamente o comportamento de solos argilosos que possuem moléculas de água adsorvidas (BRADY, 1989).

A água no solo também é de extrema importância quanto a análise das tensões no solo, sendo a poropressão ou tensão neutra fundamentalmente relacionada ao comportamento do solo nas condições de campo (BUDHU, 2010).

2.4.5. Peso Específico

O peso específico das partículas sólidas é uma propriedade definida pela razão da massa total pelo volume total (CAPUTO, 1988). Conforme Brady (1989) solo de granulometria mais fina, tais como as argilas, apresentam densidade menores que solos arenosos, pois a organização

das partículas sólidas de solos de textura fina assegura um elevado volume de vazios, além de baixa densidade de volume.

2.4.6. Permeabilidade

A permeabilidade está relacionada com a capacidade de escoamento da água por uma massa de solo. Também denominada de condutividade hidráulica, é a principal propriedade física no que diz respeito ao fluxo de água nos solos (BUDHU, 2010).

“O conhecimento da permeabilidade de um solo é de importância em diversos problemas práticos de engenharia, tais como: drenagem, rebaixamento do nível d'água, recalques, etc” (CAPUTO, 1988). Essa propriedade é quantificada através do coeficiente de permeabilidade, que está relacionada aos vazios do solo. Conforme o autor, cada tipo de solo apresenta um coeficiente de permeabilidade e para um mesmo solo este coeficiente é variável, dependendo de fatores como a temperatura e o índice de vazios. Sendo necessário levar em consideração o formato e o tamanho dos vazios.

2.4.7. Capacidade de troca catiônica (CTC), pH e matéria orgânica

Em termos de construção civil geralmente se tem o foco em três propriedades químicas do solo: a CTC, o pH e a matéria orgânica.

A CTC está relacionada com a capacidade de armazenamento de cátions nos argilominerais, pois a areia tem CTC nula. Quanto maior o CTC, maior a capacidade de armazenamento de cátion, o que também mostra como a fração “argila é muito mais reativa que a areia, sendo capaz de interagir mais com a água, diminuindo seu efeito lubrificante entre as partículas minerais, assim como é capaz de apresentar maior coesão, diminuindo a suscetibilidade à compactação do solo” (MENTGES *et al.*, 2006).

O potencial hidrogeniônico, ou seja, o pH é escala que determina a concentração de íons H^+ na solução do solo, que pode influenciar na formação de nutrientes e em outras reações (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Conforme Brady (1989), o pH do solo está relacionado a saturação ou lixiviação de bases nas camadas superficiais de solos. A acidez ($pH < 7,0$) ou alcalinidade ($pH > 7,0$) do solo está ligada à sua mineralogia e o seu processo de formação. Em solos tropicais o pH geralmente

está relacionado como a proporção entre óxi-hidróxidos de ferro e alumínio e o teor de argilominerais (MIGUEL, 2020).

A matéria orgânica do solo é um conjunto de resíduos animais e vegetais parcialmente decompostos e sintetizados, resultante da atividade de microrganismos no solo. Sua presença no solo é a principal fonte de fósforo, enxofre e nitrogênio, além de influenciar nas propriedades do solo, tais como a absorção de água (BRADY, 1989).

Segundo Caputo (1988), a presença de matéria orgânica no solo pode interferir em propriedades do solo como a consistência, no qual a presença de uma pequena porcentagem desse material no solo pode elevar o valor do limite de plasticidade, sem necessariamente elevar o limite de liquidez, obtendo assim um baixo valor do índice de plasticidade para esse solo.

3. CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland surgiu da queima de calcário e argila, finamente moídos e misturados sob altas temperaturas, cujo resultado foi um pó de características semelhantes a uma pedra abundante da ilha de Portland. O processo foi patenteado pelo inglês Joseph Aspdin em 1830, sendo seu uso difundido gradativamente assim como aprimorados os processos para a fabricação do produto (PEDROSO, 2009).

Segundo a ABNT NBR 5741/2019, o cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante essa operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a essa mistura de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonatados, nos teores indicados nas normas específicas.

Conforme Bauer (2000), o clínquer é um material de natureza granulosa, constituído em sua maior parte de silicatos hidráulicos de cálcio, resultante da calcinação de matérias primas, como rochas calcárias, argila, óxido de ferro e óxido de alumínio, finamente pulverizadas e homogêneas e conduzidas até a temperatura de fusão iminente.

Quanto a sua composição química, esse material é composto basicamente por: silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$), componente de maior responsabilidade pela resistência em todas as idades, mas principalmente para as idades iniciais; silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$), que apresenta maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas; aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$), que também contribui para a resistência,

especialmente no primeiro dia; e por ferroaluminato de cálcio ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AFe}$), que em nada contribui para a resistência (BAUER, 2000).

O mercado nacional disponibiliza diversas opções (sem contar as classes de resistência), para atender os mais variáveis tipos de obras, entre eles pode-se citar: Cimento Portland Comum (CP I e CP I-S), Cimento Portland Composto (CP II-E, CP II-Z e CP II-F), Cimento Portland de Alto Forno (CP III), Cimento Portland Pozolânico (CP IV), Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CP V-ARI), Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS), Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC), Cimento Portland Branco (CPB) e Cimento Para Poços Petrolíferos (CPP) (ABCP, 2002).

3.1. PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

Conforme Bauer (2000), a hidratação do cimento Portland é um processo complexo que envolve etapas como a dissolução do material em água, precipitação de cristais e gel com hidrolises e hidratação dos seus componentes.

O processo de hidratação consiste na reação dos compostos do cimento (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF) com a água formando compostos como o silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, etringita, monossulfaluminato de cálcio hidratado e do hidróxido de cálcio (GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006).

A hidratação do cimento evolui no decorrer do tempo e depende de diversos fatores que podem inferir na reatividade do cimento Portland, tais como a forma, tamanho e estrutura cristalina de suas partículas, finura do clínquer e quantidade de água envolvida na mistura (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005; METHA; MONTEIRO, 2008).

Conforme Taylor (1997 apud. GONÇALVES; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2006) todo o processo de hidratação se completa aos 365 dias, sendo que aos 28 dias de cura já se tem certa de 70% de grau de hidratação.

O mecanismo de hidratação do cimento consiste em fenômenos químicos e físicos, com início na reação química de hidratação das partículas do clínquer, com sequência no processo físico de formação dos cristais e entrelaçamento das fibras capilares (PAULON, 2005).

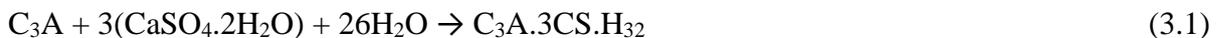
“Os principais produtos da hidratação do cimento Portland, são o silicato de cálcio hidratado (Tobermorita, C-S-H), o hidróxido de cálcio (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o sulfoaluminato de cálcio hidratado (Etringita)” (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Por se tratar de um processo complexo, “a reação de hidratação do cimento geralmente é explicada em termos de hidratação individual dos compostos do clínquer”, embora seja utilizado uma simplificação para melhor compreensão. Logo, pode-se separar o processo de hidratação pela hidratação dos compostos isolados, tais como dos aluminatos e ferroaluminatos e das fases silicato de cálcio (GARCIA, 2015).

No cimento Portland se tem uma pequena quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) e a reação desse composto puro com a água é muito rápida, o que resulta na pega instantânea, sendo essa uma característica negativa, pois pode inviabilizar o uso do concreto ou argamassa produzidos. Para reduzir esse efeito se tem a adição de sulfato de cálcio ao clínquer (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O sulfato de cálcio na forma de gipsita inibi a pega instantânea pois reage com os aluminatos formando um mineral denominado etringita, sendo esse um produto dos primeiros estágios de hidratação do cimento (SENF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Pode-se observar na Equação 3.1 (Collepari, 2003 apud. Melo, 2010), a reação de formação da etringita.



Além do aluminato tricálcico se tem os dois silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) como principais compostos cimentícios, obtendo como produtos da sua hidratação o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio, sendo suas reações de hidratação aproximadas apresentadas nas Equações 3.2 e 3.3 (NEVILLE; BROOKS, 2013).



Percebe-se que ambos silicatos necessitam aproximadamente da mesma quantidade de água para a hidratação, mas o silicato tricálcico produz mais que o dobro de hidróxido de cálcio do que o silicato bicálcico (NEVILLE; BROOKS, 2013).

“A hidratação do ferroaluminato é similar à do C_3A , entretanto as suas reações são mais lentas e liberam menor quantidade de calor de hidratação” (GARCIA, 2015).

4. SOLO-CIMENTO

A estabilização de um solo consiste em processos para melhorar a capacidade do solo de resistir a deformações e ruptura durante o período em que estiver exercendo funções que exigem essas características (SENÇO, 2001).

A adição de determinada porcentagem de cimento confere resistência ao solo e consiste em um processo denominado como estabilização química do solo, no qual se tem a alteração das propriedades do solo através de reações físico-químicas dos argilo-minerais com o cimento (MACÊDO, 2004).

Segundo Freire e Beraldo (2003) pode-se definir o solo-cimento como um material alternativo de construção que apresenta como vantagem seu baixo custo, resistência e durabilidade.

O solo-cimento tem várias aplicações na construção civil, tais como o uso na confecção de tijolos, blocos, paredes e muros, na preparação de bases e sub-bases de pavimentação, no reforço de aterros ou ensacado para a contenção de taludes e barragens (FREIRE; BERALDO, 2003; KOLLING; TROGELLO; MODOLO, 2012).

A qualidade do solo-cimento vai ser influenciada por fatores como o tipo do solo, o teor de cimento utilizado, o método de mistura escolhido e compactação, sendo que, entre os fatores citados, o tipo do solo o fator mais influente (SOUZA, 2006).

Segundo Pereira (2012), geralmente, o consumo de cimento está diretamente ligado com a presença de finos nos solos. Um solo com uma maior parcela de finos necessita de um maior consumo de cimento, com exceção de uma areia com distribuição granulométrica uniforme, que necessita de mais cimento do que solos arenosos com a presença de silte e argila.

A dosagem do solo-cimento, independentemente do método escolhido, consiste na realização de ensaios laboratoriais, os quais serão analisados e interpretados com base em critérios pré-estabelecidos.

5. PROCESSO DE ANODIZAÇÃO DE ALUMINÍNIO

O alumínio é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre, apresenta baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, além de ser considerado um material de alta resistência a corrosão (SARTOR, 2006; GOULART, 2021).

A superfície do alumínio é recoberta por uma camada de óxido natural, porém com espessura e dureza que variam, sendo necessário, para alguns usos, a substituição da camada de óxido natural por uma capa de espessura maior, através de processos químicos ou eletrolítico, como a anodização (NUERNBERG, 2018).

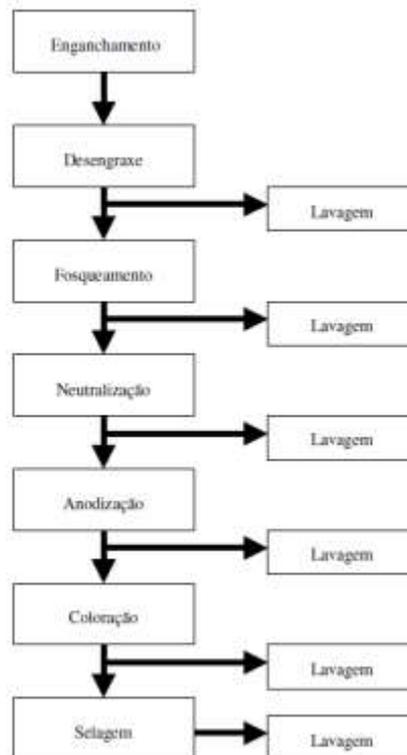
O processo de anodização é um processo de oxidação forçada, tendo os parâmetros eletroquímicos bem controlados, cuja função é minimizar as irregularidades superficiais em decorrência dos processos anteriores, além de proteger o metal contra a ação de agentes oxidantes externos (SPRICIGO, 2017).

Goulart (2021) apresenta as reações de formação da camada de óxido (Equações 5.1 e 5.2).



O processo de anodização é composto por diversas etapas, tais como limpeza, decapagem, anodização, pintura e selagem, como mostra a Figura 5.1 (SPRICIGO, 2017).

Figura 5.1 – Fluxograma referente a seqüência dos processos de anodização



Fonte: Grandini (2004) apud. Sartor (2006).

Primeiramente se tem o enganchamento das peças metálicas, que consiste em fixar os perfis nas gancheiras de alumínio, com a finalidade de manter as peças seguras durante a transferência entre os tanques ou durante a agitação da solução, além de garantir que as peças recebam uma camada anódica uniforme (SARTOR, 2006).

Após a fixação das peças é feito o desengraxe ou desengorduramento das peças, no qual se mergulha os perfis em um banho alcalino ou ácido levemente aquecido, com o objetivo de retirar os óleos, resíduos contaminantes, gorduras e óxidos da superfície (NUERNBERG, 2018).

Entre as etapas é realizada a lavagem dos perfis em água, tendo como finalidade garantir a ausência de resíduos na superfície do metal provenientes da etapa anterior, evitando assim a contaminação pelo arraste (SPRICIGO, 2017).

O fosqueamento é a etapa no qual se tem o banho da peça metálica em uma solução de soda cáustica com o objetivo de tornar a superfície do alumínio homogênea e causar um aspecto fosco. Geralmente se tem o uso da solução química aquecida ou com a uso de aditivos (NUERNBERG, 2018).

A etapa de neutralização consiste em um banho composto por ácido sulfúrico diluído e aditivos(opcional) com o objetivo de neutralizar os resíduos alcalinos do banho de fosqueamento e “manchas pretas” provenientes de reações químicas (SARTOR, 2006).

A anodização propriamente dita ocorre por meio do mergulho dessas peças em um tanque com solução de ácido sulfúrico ou, para algumas aplicações, ácido crômico (GOULART, 2021).

Conforme Nuernberg (2018), se tem uma etapa opcional durante o processo, a etapa de coloração, que depende da necessidade em relação ao produto final, sendo realizado por meio de imersão em corantes orgânicos ou por banhos em soluções de sal metálico. Para o autor a etapa mais importante da anodização é a selagem, pois fornece qualidade à camada anódica.

De modo geral, as indústrias de anodização produzem grandes quantidades de efluentes (ácidos e básicos) proveniente das etapas dos tratamentos e da lavagem entre os processos supracitados, os quais não podem ser descartados diretamente na rede de esgoto, sendo necessário o tratamento físico-químico desses efluentes antes de seu lançamento em corpos receptores (GOULART, 2021).

Conforme Pereira (2008), o tratamento físico-químico também pode ser separado em etapas, as quais são: neutralização, coagulação, floculação, sedimentação (branqueamento da “água”), filtração da “água” e filtração do lodo.

Para Padoin (2011), a neutralização dos efluentes consiste na alteração do pH dos efluente básicos e ácidos até atingirem pH entre 7 e 8, sendo essa relacionada ao nível de sulfato presente no efluente. Segundo o autor, se utiliza cal para neutralizar efluentes com níveis altos de sulfato, caso contrário pode-se utilizar soda cáustica, o que permite a obtenção de um lodo mais puro. Como resultado desta etapa se tem uma suspensão coloidal rica em hidróxido de alumínio e uma elevada quantidade de sobrenadante, sendo então realizada a etapa de coagulação, no qual se adiciona um agente coagulante que provoca a floculação, com os flocos formados constituídos principalmente por hidroxissulfatos de alumínio.

A floculação consiste na agitação lenta com a dosagem de um polieletrólito ocasionando a agregação das partículas que foram formadas na fase anterior, tornando-as maiores e lhes dando mais corpo e peso. Após a etapa de floculação se tem a separação (sedimentação) por decantação e a filtração em filtro prensa, onde ocorre a desidratação do lodo. O lodo por fim é posto em recipiente para transporte e descarte em local adequado (PEREIRA, 2008).

O sobrenadante resultante do processo físico-químico não é lançado diretamente na rede de esgoto, cujo no Brasil a concessionária que estabelece limites da concentração de sulfato, seu lançamento é direto em corpos hídricos, tendo seus parâmetros controlados pela Resolução n. 430, do CONAMA (BRASIL, 2011), o qual, como anteriormente citado, não apresenta parâmetro direto para a concentração de sulfato.

Buscando a redução da concentração do ânion sulfato ainda presente nesse sobrenadante se tem processos complementares que podem ser utilizados, tais como o uso de processos envolvendo membranas ou trocas iônicas, processos de precipitações químicas e redução biológica de sulfato (FERREIRA; LIMA; LEÃO, 2011), sendo os processos de precipitação química de compostos como a etringita e a jarosita economicamente mais atraentes.

A precipitação química apresenta baixo custo de investimento e um processo simples de operação se comparado aos outros métodos supracitados, porém se tem que observar os custos dos reagentes utilizados e para o descarte do lodo produzido (MOLKE, 2019). Em um efluente de uma indústria de anodização de alumínio como o utilizado nessa pesquisa, Molke (2019) apresenta a precipitação química da etringita como um tratamento adequado e eficiente para remoção de sulfato.

6. ETRINGITA

A etringita é um composto mineral que pode ser sintetizado ou encontrado na sua forma natural (Figura 6.1). Quimicamente, o mineral etringita é um sulfoaluminato de cálcio hidratado, cuja formulação é indicada por $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$, sendo parcialmente solúvel em água e a facilmente solúvel em ácidos diluídos (MELO, 2010; MATTOS, 2017).

Conforme Mattos (2017), em sua forma de mineral natural, a etringita é bastante encontrada na Europa, em maior número de regiões na Itália e na Alemanha, especialmente no município de Ettrigen, que deu origem ao nome da terminologia mineralógica. Segundo o autor, ainda se tem registros desse material na América do Norte, no sul da África, na Ásia, no Japão, em Israel, na Jordânia e na Palestina.

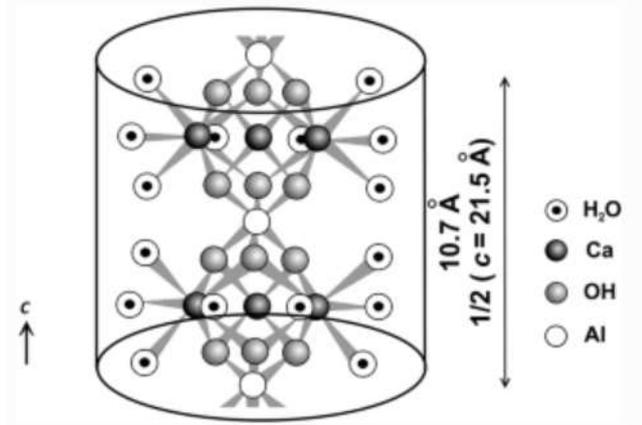
Figura 6.1 – Mineral etringita encontrado: a) na Alemanha; b) na região de Kuruman no Sul da África.



Fonte: Stephan Wolfsried (2006) e Le-Comptoir-Geologique, (2021).

A etringita é caracterizada por sua morfologia tipicamente composta por um prisma com seção hexagonal (Figura 6.2), cuja extremidade configura uma pirâmide, mas pode se apresentar também na forma acicular (agulha). Quanto à sua coloração, esse material na natureza pode ser encontrado nas cores amarelo brilhante, incolor (vai do transparente ao translúcido) e branca (MELO, 2010).

Figura 6.2 – Estrutura do cristal de etringita

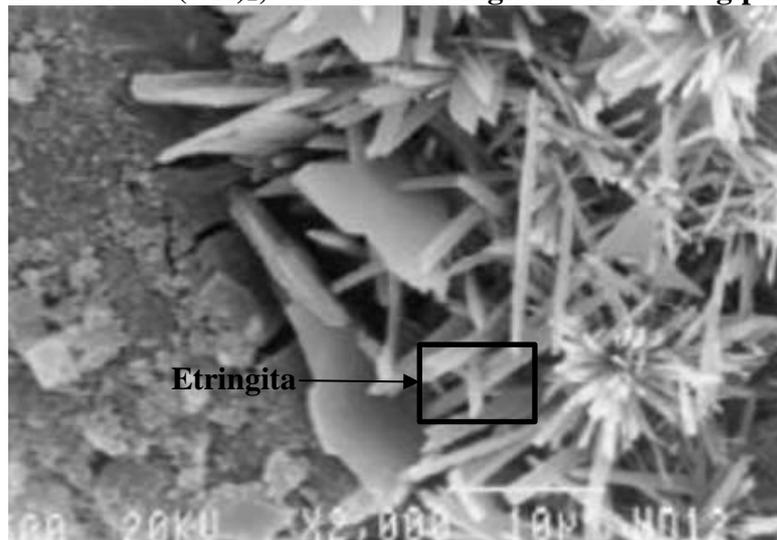


Fonte: Puppala *et al.* (2018).

A etringita também pode ser sintetizada por meio de processos químicos envolvendo soluções de sulfato, alumínio e cálcio, além de ser formada durante processos de reações químicas entre compostos, tais como no caso da hidratação do cimento.

Durante processo de hidratação do cimento Portland, se tem a formação de cristais de etringita principalmente nas primeiras horas, pois a reação do C_3A com água é imediata e por isto há a necessidade da adição de sulfato, proveniente da gipsita (CaSO_4), na composição do cimento para retardar a reação. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfato resulta na etringita (Figura 6.3) (SILVA, 2005).

Figura 6.3 – Imagem da interface pasta/agregado de uma amostra de concreto contendo cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cristais de etringita e cristais de gipsita



Fonte: Adaptado de Gomides *et al.* (2020).

Nas argamassas frescas à base de cimento, a fase de etringita e sua dispersão na pasta de cimento fresca desempenham um grande papel na trabalhabilidade desses materiais, sendo a fase mineral dominante com relação a essa propriedade (WINNEFELD *et al.*, 2009).

Na estabilização química, por meio do uso de cimento Portland e cal, em solos expansivos contendo sulfatos solúveis, se tem a precipitação e o crescimento da etringita causando problemas de desempenho relacionados à expansão (AKULA; LITTLE, 2021).

7. ADIÇÕES MINERAIS EM COMPOSTOS COM CIMENTO PORTLAND

Adições minerais são normalmente materiais sólidos que podem alterar as propriedades de compostos à base de cimento Portland. Esse tipo de material pode ser utilizado como substituição de parte do cimento e apresenta características pozolânicas ou atua como material de preenchimento, apresentando na maioria das vezes menor custo em relação ao cimento (SILVA, 2005).

Dal Molin (2005), analisando suas ações físico-químicas, classifica esse tipo de material em três grupos diferentes, os quais compreendem os materiais pozolânicos, os materiais cimentantes e filler.

Os materiais pozolânicos, são materiais finos e pulverulentos que, na presença de água, reagem quimicamente com a cal, formando compostos que têm propriedades cimentantes.

Os materiais cimentantes são aqueles que não necessitam reagir com a cal para produzir materiais com propriedades cimentantes, tais como cimentos naturais de alto-forno, os cimentos pobres e a cal hidráulica. Os cimentos de alto-forno ou metalúrgico reduz o calor de hidratação dos concretos, entretanto não é recomendado o seu uso em concretos estruturais, uma vez que o processo de auto-hidratação destes compostos ocorre de forma lenta e a disponibilidade desse produto não atenderia a demanda (BAUER, 2000; DAL MOLIN, 2005).

As adições minerais do tipo filler, que por Bauer (2000) recebe a denominação de materiais inertes, são materiais finamente divididos, quimicamente inertes ou quase não reativos, que, devido a sua pequena dimensão granulométrica, atuam basicamente com função de preenchimento dos vazios na mistura (BAUER, 2000; DAL MOLIN, 2005).

7.1. ADIÇÕES MINERAIS COM ATIVIDADE POZOLÂNICA

Silva (2005) define as pozolanas como materiais finos constituídos de sílica (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) que reagem com a cal na presença de água e com os diferentes

componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes.

Para Freire e Beraldo (2003), a avaliação de uma pozolana é fundamental fazer de uma análise química completa, sendo esta realizada por meio de ensaios utilizando os espectroscópicos (Ensaio de fluorescência de raios X) ou pela realização de ensaios clássicos por via úmida.

A ABNT NBR 12653/1992 estabelece exigências para que os materiais pozolânicos sejam considerados para uso como adição. A normativa classifica esse material de acordo com sua origem, como mostra a Tabela 7.1, além de apresentar as exigências mínimas quanto a sua composição química (Tabela 7.2), entre outros critérios.

Tabela 7.1 – Classificação das pozolanas estabelecidas pela NBR 12653

Classe	Materiais que Obedecem aos Requisitos
N	Pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas Calcinadas
C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso
E	Os materiais que diferem das classes anteriores e a cinza volante proveniente da queima de carvão sub-betuminoso

Fonte: ABNT NBR 12653 (1992).

Tabela 7.2 – Exigências químicas estabelecidas pela NBR 12653

Propriedade	Classe		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% mínimo)	70,0	70,0	50,0
SO ₃ (% máximo)	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (% máximo)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máximo)	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponível em Na ₂ O (% máximo)	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT NBR 12653 (1992).

Diversos estudos foram e estão sendo realizados com diversas adições minerais, sendo em sua maioria resíduos industriais. O uso de adições minerais confere aos compostos à base de cimento um menor calor de hidratação, melhora na resistência à fissuração térmica, redução da permeabilidade e contribui para uma durabilidade maior a ataques químicos (SILVA, 2005).

8. MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando analisar o uso da etringita como substituição parcial do cimento Portland em compósitos de solo-cimento, foi utilizada uma abordagem de natureza explicativa experimental, no qual, através de ensaios laboratoriais, foi possível verificar o comportamento das misturas, estabelecidas após análise das dosagens físico-química realizadas.

A princípio foi executada a caracterização de todos os materiais envolvidos na pesquisa, sendo realizada a caracterização geotécnica do solo e físico e química do cimento, da etringita e das misturas, utilizando os processos estabelecidos pelas suas respectivas normativas.

A fase seguinte da pesquisa consistiu na determinação da composição das matrizes, sendo realizados estudos da dosagem da mistura solo-cimento em função da porcentagem de substituição adotado.

Posteriormente foi analisado o comportamento das matrizes de solo puro, solo-cimento, solo-tringita e solo-cimento-tringita definidas, por meio de ensaios de compressão simples e de resistência a tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos.

8.1. MATERIAIS

Para a pesquisa foi utilizado um solo proveniente da cidade de Mandaguaçu-PR, cimento Portland e etringita, resíduo obtido do processo de tratamento para remoção de sulfato de efluentes de anodização de alumínio.

8.1.1. Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no município de Mandaguaçu no estado do Paraná (23°21'45,2"S e 52°05'23,6"W), conforme mostra Figura 8.1.

Figura 8.1 – Localização do local da coleta



Fonte: Autor (2021).

O local foi marcado utilizando um GPS Portátil Garmin eTrex10 (Figura 8.2), que busca dados do sistema GPS e GLONASS, para coletas posteriores. Para coleta se pegou material da parede do talude (Figura 8.3), sendo eliminado primeiro uma camada mais superficial.

Figura 8.2 – Foto do equipamento com georreferenciamento do ponto de coleta.



Fonte: Autor (2021).

Figura 8.3 – Foto do local de coleta



Fonte: Autor (2021).

Para os ensaios o material foi preparado de acordo com a norma ABNT NBR 6457/2016, sendo seco ao ar (Figura 8.4) até a umidade higroscópica, destorroado em mão de grau e almofariz, passado na peneira nº 4 (4,8 mm) e acondicionado em tambores.

Figura 8.4 – Solo secando ao ar



Fonte: Autor (2021).

8.1.2. Cimento

O cimento escolhido para ser utilizado na pesquisa foi o CP II-Z 32 da Votoran. O CP II-Z é um cimento composto com uma variação de 76% a 94% de clínquer e sulfatos de cálcio e 24% a 6% de materiais pozolânicos (LUKIANCHUKI *et al.*, 2019). Para o desenvolvimento

do estudo, foram realizados ensaios de estabilização físico-química para o solo em questão a fim de determinar o percentual de cimento utilizado.

8.1.3. Etringita

A etringita utilizada foi sintetizada no laboratório de saneamento ambiental da Universidade Estadual de Maringá - UEM por meio de um processo químico de precipitação. O processo utilizado foi adaptado da pesquisa realizada por Santos, Syllós e Benatti (2019).

Toda a análise do processo de produção foi realizada em becker de vidro graduado, sendo também utilizados equipamentos como balança analítica, pipetas, agitador magnético e/ou jar test, barra magnética, espátulas, entre outros.

O efluente utilizado é de uma indústria de anodização e coloração de metais do município de Maringá, noroeste do Paraná e para a realização dos ensaios de caracterização foi primeiramente feita uma estimativa da quantidade de material a ser utilizado por meio da precipitação química da etringita em uma amostra reduzida.

Outro aspecto verificado foi o uso do efluente bruto ou do efluente tratado na indústria, que corresponde ao efluente no qual se teve correção do pH para um pH alcalino e uso de policloreto de alumínio (PAC) e floculante (polímero catiônico), com uma redução inicial da concentração de sulfato (SO_4^{2-}).

Realizando o processo de precipitação da etringita para os dois tipos de efluentes na amostra reduzida, pode-se aceitar o uso do efluente tratado para a precipitação da etringita nas outras etapas da pesquisa.

Como a concentração de sulfato no efluente vai variar em função da quantidade e composição dos materiais preparados na indústria semanalmente, para cada recebimento do efluente foi feita a verificação da concentração de sulfato para o cálculo dos reagentes.

O cálculo dos reagentes é baseado no volume do efluente utilizada, na concentração de sulfato, obtida de amostra diluída em equipamento Hach DR 2800 disponível no Laboratório de saneamento ambiental (Figura 8.5) e nas razões $[Ca^{+2}]:[SO_4^{2-}]=2$ e $[Al^{+3}]:[SO_4^{2-}]=0,4$.

Figura 8.5 - Equipamento Hach DR 2800

Fonte: Autora (2021).

Quando ao volume de efluente em cada becker esse foi determinado de acordo com o material disponibilizado pela indústria, sendo necessário ajustar em alguns casos, o volume reacional e os reagentes para um dos becker's. A adição dos reagentes foi feita em agitação moderada até ser tudo dissolvido na solução, no qual primeiro se adiciona o cloreto de cálcio di-hidratado (Figura 8.6a) e em seguida o hidróxido de alumínio (Figura 8.6b).

Figura 8.6 – Reagentes: (a) Cloreto de Cálcio e (b) Hidróxido de Alumínio.

Fonte: Autora (2021).

Tendo feita a adição deixa-se a solução, por 30 minutos, em agitação rápida no jar test (Figura 8.7) e em seguida o becker será deixado por cerca de 48 h em condições estáticas (Figura 8.8).

Figura 8.7 – Agitação das soluções no Jar Test



Fonte: Autora (2021).

Figura 8.8 – Solução em Repouso



Fonte: Autora (2021).

Depois do repouso se retirou o sobrenadante, levando o lodo para secar em estufa, no qual se utilizou diversos tipos de recipientes, tais como bandejas metálicas, assadeira retangular de vidro temperado (Figura 8.9) e capsulas de porcelana. Como critério de verificação se o processo foi bem sucedido, se teve o cuidado de realizar, no final de cada ciclo, a análise da quantidade de sulfato no sobrenadante a ser descartado, sendo o parâmetro de aprovação a concentração aproximada de 1 g/L^{-1} .

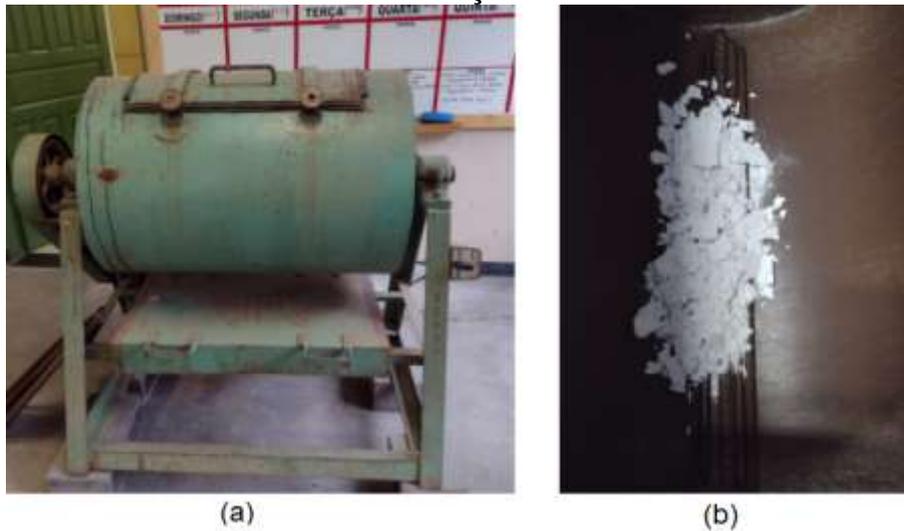
Figura 8.9 – Lodo: (a) úmido e (b) após secagem em estufa.



Fonte: Autora (2021).

O material foi triturado em moinho (Figura 8.10) no P02 da UEM, sendo necessário ainda passar o material final em peneira #40 (abertura de 0,42 mm), para o uso nos demais ensaios.

Figura 8.10 – (a) Moinho utilizado e (b) vista interna do moinho com material e barras de aço.



Fonte: Autora (2021).

Semanalmente na indústria que forneceu o efluente para a sintetização da etringita, em são produzidos 18 mil litros de efluente bruto, o que resultaria em torno de 780 kg de etringita semanalmente em apenas uma indústria. Para a produção em alta escala já se tem o processo de secagem do lodo resultante do tratamento do efluente na indústria, podendo ser aproveitado o processo para a secagem da etringita (lodo).

8.2. MÉTODOS

A pesquisa está dividida em três etapas, sendo elas a de caracterização dos materiais, estudos de dosagem e verificação de comportamento mecânico das misturas.

Para a caracterização do solo utilizado na pesquisa se teve a realização de ensaios de granulometria, limites de consistência, massa específica e ensaios mais específicos, como o de determinação do pH, de difração de raio-X (DRX) e de determinação de matéria orgânica.

Como o intuito da pesquisa é verificar a incorporação da etringita como substituição parcial do cimento foi necessário caracterizar separadamente estes materiais para verificar a possibilidade de similaridade entre eles. Para isso foram executados os ensaios de massa

específica e DRX, sendo as amostras de etringita e de cimento coletadas e preparadas de acordo com a norma ABNT NBR 5741/ 2019. Para caracterizar a Etringita foi feito também o ensaio da atividade pozolânica que este composto mineral possui e o ensaio de granulometria por difração a laser.

8.2.1. Determinação do pH do Solo e Misturas de Solo-Etringita

As análises de pH das amostras de solo puro e das mistura solo-cimento, solo-tringita e solo-cimento-tringita foram realizadas no Laboratório Rural de Maringá, seguindo como diretriz o Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O pH dos materiais envolvidos, assim como o pH do meio, pode interferir nos produtos finais das reações químicas do cimento e de formação de etringita no solo-cimento e consequentemente na resistência desse material. Como visto na pesquisa de Ouhadi e Yong, (2008), as alterações de pH auxiliam na formação de etringita no processo de estabilização do solo.

A determinação potenciométrica do pH foi feita por meio de eletrodo combinado, imerso em suspensão solo:líquido (água, KCl ou CaCl₂), 1:2,5. Para isso primeiramente as amostras de solo e das misturas (contendo 10 ml de material) foram colocadas em copos descartáveis, numerados, com capacidade de pelo menos 100 ml, sendo adicionados 25 ml de líquido (água, KCl 1N ou CaCl₂ - 0,01 M), sendo as soluções agitadas e deixadas em repouso por uma hora antes das leituras (Figura 8.11). O potenciômetro foi ligado 30 minutos antes de começar a ser usado (Figura 8.12), sendo calibrado o medidor de pH com as soluções-tampão para pH 4,0 e 7,0 (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Figura 8.11 – Soluções em repouso para ensaio de pH



Fonte: Autora (2022).

Figura 8.12 – Leitura do pH das soluções



Fonte: Autora (2022).

Conforme Camargo *et al.* (2009), eletrodo de vidro, ou a parte a ele correspondente num eletrodo combinado, deve estar em contato direto com o sedimento, enquanto o de referência, ou a parte correspondente a ele no eletrodo combinado, deve ficar no líquido sobrenadante.

8.2.2. Ensaio de DRX

O ensaio de Espectrometria de Difração de Raios-X (DRX) foi realizado no Laboratório COMCAP da UEM, sendo utilizado para determinar a composição mineralógica das amostras de solo, do cimento e da etringita. O Equipamento utilizado foi o difratômetro Shimadzu, com alvo de cobre, que possui emissão predominante no comprimento de onda de 1,5406 Å.

Conforme Oliveira (2005), o DRX consiste na incidência de uma radiação em uma amostra, sendo então detectados os fótons difratados, constituintes do feixe difratado. Por meio da realização do ensaio, são obtidas informações de cada pico, sendo elas a intensidade de difração do feixe pelos átomos presentes no cristal, a posição angular (2θ), a distância interplanar (d) e o perfil.

Conforme Albers *et al.* (2002) trata-se de um método simples, rápido e confiável, uma vez que fornece o perfil de difração característico para cada fase cristalina. Os autores ainda citam a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases como vantagens relacionadas ao ensaio.

A realização do ensaio fornece informações detalhadas da microestrutura cristalina das amostras, sendo esses dados importantes para compreender melhor as propriedades do material em estudo (FRANÇA, 2017).

8.2.3. Determinação de Presença de Matéria Orgânica no Solo

A Matéria orgânica do solo em estudo será determinada em um laboratório de análise de solos. “A determinação da quantidade de matéria orgânica em solos baseia-se na sua oxidação a CO₂ por ions dicromato, em meio fortemente ácido” (SILVA, 2009).

De forma geral, a presença de matéria orgânica em um solo na matriz solo-cimento pode interferir na hidratação do cimento, prejudicando a resistência a compressão simples do material final (SILVA, 2005).

O ensaio consiste em adicionar em uma amostra de 0,5 g, triturada em gral, passada na peneira de 80 mesh e colocada em uma erlenmeyer de 250ml, 10ml (pipetados) de uma solução de dicromato de potássio 0,4N, sendo incluso um branco com 10ml da solução de dicromato de potássio e anotado o volume de sulfato ferroso amoniacal gasto. Com um tubo de ensaio de 25 mm de diâmetro e 250 mm de altura cheio de água na boca do erlenmeyer, se realiza o aquecimento da solução com a amostra em placa elétrica até a fervura branda, durante 5 minutos. Após esfriar, coloca-se 80ml de água destilada, medida com proveta, 2ml de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador difenilamina, sendo realizado em seguida a titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1N até que a cor azul desapareça, cedendo lugar à verde. Anota-se o número de mililitros gastos e a matéria orgânica é determinada pelas Equações 8.1, 8.2 e 8.3 (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

$$C (g/kg) = (40 - \text{volume gasto}) \times f \times 6 \quad (8.1)$$

$$f = 40 / \text{volume sulfato ferroso gasto na prova em branco} \quad (8.2)$$

$$\text{Matéria orgânica (g/kg)} = C \left(\frac{g}{kg} \right) \times 1,724 \quad (8.3)$$

8.2.4. Distribuição Granulométrica a Laser da Etringita

Segundo Christofolletti e Moreno (2017), o método de análise consiste na dispersão de partículas em um fluido em movimento, o que causa descontinuidades no fluxo do fluido, que são detectadas por meio de uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula.

A análise granulométrica a laser da etringita foi realizada no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE - UFRJ) utilizando o equipamento Mastersizer 2000 da Malvern, onde a amostra de etringita foi colocada em álcool e obteve um obscurecimento de 14,94%. O equipamento tem alcance para medir partículas entre 0,02 e 2000 μm , sendo a distribuição do tamanho das partículas feita com a unidade de dispersão de amostras de grande volume (Hydro 2000MU).

8.2.5. Atividade Pozolânica da Etringita

Como visto, as pozolanas são materiais em que circunstâncias específicas reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, presente em no cimento e na cal, formando compostos com propriedades cimentícias (SILVA, 2005).

Existem diversos métodos utilizados para a determinação da atividade pozolânica em compostos. Nesse estudo o ensaio foi realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, em São Paulo-SP, utilizando o método de Chapelle modificado.

A ABNT NBR 15895/2010 estabelece o índice da atividade pozolânica de materiais por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) fixado, conhecido como método Chapelle modificado.

8.2.6. Dosagem Físico-Química de Misturas de Solo-cimento, Solo-tringita e Solo-cimento-tringita.

O ensaio consiste na determinação do teor mínimo de aglomerante requerido para a estabilização físico-química completa do solo, esse teor é obtido através de valores calculados e da plotagem de uma curva de %cimento versus $\Delta V(\%)$ teor (DNIT, 2019).

O ensaio seguiu o determinado pela norma DNIT 414/2019 – ME. Sendo utilizada água destilada e proveta de 250 ml para cada amostra.

Os ensaios foram realizados de acordo com o que mostra a Tabela 8.1 e 8.2, sendo o solo primeiramente seco ao ar, destorroado, passado na peneira de nº 10 e separado em quantidade de 20 gramas para cada traço.

Tabela 8.1 – Determinação das misturas solo-cimento e solo-etringita

Sigla	Misturas	Sigla	Misturas
S00	Solo puro	SE2	Solo com 2% de etringita
SC2	Solo com 2% de cimento	SE4	Solo com 4% de etringita
SC4	Solo com 4% de cimento	SE6	Solo com 6% de etringita
SC6	Solo com 6% de cimento	SE8	Solo com 8% de etringita
SC8	Solo com 8% de cimento	SE10	Solo com 10% de etringita
SC10	Solo com 10% de cimento	SE12	Solo com 12% de etringita
SC12	Solo com 12% de cimento		

Fonte: Autora (2021).

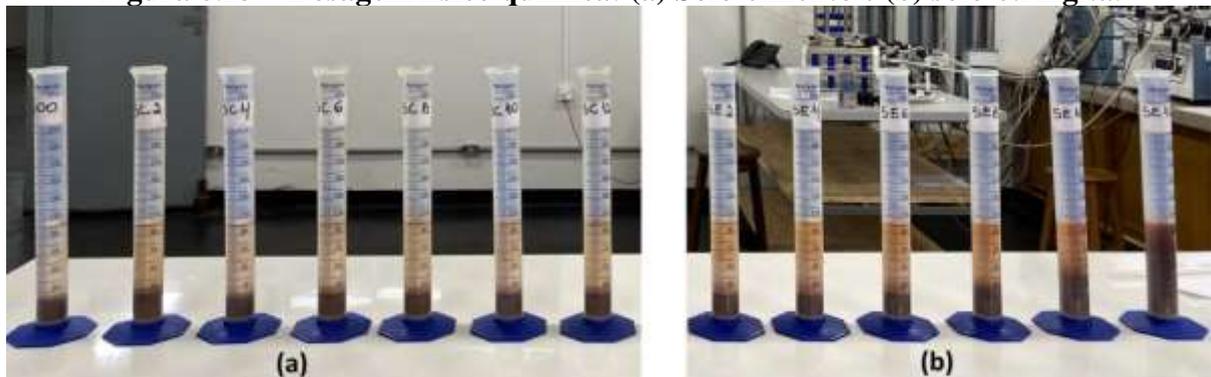
Tabela 8.2 – Determinação das misturas solo-cimento-etringita

Sigla	Misturas	Sigla	Misturas
S00	Solo puro	SCE10	Solo com 5% de cimento e 5% de Etringita
SCE2	Solo com 1% de cimento e 1% de Etringita	SCE12	Solo com 6% de cimento e 6% de Etringita
SCE4	Solo com 2% de cimento e 2% de Etringita	SCE14	Solo com 7% de cimento e 7% de Etringita
SCE6	Solo com 3% de cimento e 3% de Etringita	SCE16	Solo com 8% de cimento e 8% de Etringita
SCE8	Solo com 4% de cimento e 4% de Etringita		

Fonte: Autora (2021).

Após isso as provetas foram completadas com água destilada até a mistura chegar a 100 ml (Figura 8.13) e deixadas em repouso por 24 horas.

Figura 8.13 – Dosagem físico química: (a) Solo-cimento e (b) solo-etringita.



Fonte: Autora (2020).

No dia seguinte, seguindo o processo normativo, agitaram-se as misturas durante 30 segundos, em movimentos circulares, firmes e rápidos, sendo após esperado um repouso de 3 horas para efetuar a primeira leitura.

A leitura consiste no volume ocupado pelo sedimento em cada proveta e repetiu-se o processo até que os valores obtidos, em dois dias seguidos, apresentassem leituras constantes ou decrescentes, em cada proveta (DNIT, 2019). Para cada ensaio obtido, calculou-se a variação volumétrica ($\Delta V(\%)$) de cada proveta através da Equação 8.4.

$$\Delta V(\%) = \frac{V_{m\acute{a}x(teor)} - V_{m\acute{a}x(0\%)}}{V_{m\acute{a}x(0\%)}} \quad (8.4)$$

Onde $V_{m\acute{a}x(teor)}$ é o volume máximo lido na proveta para cada teor de cimento/etringita e $V_{m\acute{a}x(0\%)}$ é o volume máximo lido na proveta para o solo puro.

8.2.7. Determinação Da Curva De Compactação Na Energia Normal Em Função Do Teor De Etringita

No Brasil, o ensaio segue as diretrizes da ABNT NBR 12023/2012 e com ele é possível se determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca das misturas quando compactadas. A normativa especifica o preparo das amostras e o processo de moldagem dos corpos-de-prova (CP's).

O ensaio foi realizado por meio da moldagem de CP's, distribuídos em cinco para cada mistura, utilizando o cilindro pequeno (1.000cm^3 - Figura 8.14a) e soquete pequeno (aprox. 2,5 kg – Figura 8.14b). Nele foram feitas a compactação de 3 camadas por meio da queda de 26 golpes do soquete.

Figura 3.14 – Equipamento ensaio de compactação: (a) cilindro e (b) soquete.



Fonte: Autora (2021).

No final foi possível obter a umidade ótima e massa específica de cada mistura assim como a do traço de referência, permitindo um comparativo para verificar como a adição de cimento e da etringita afeta as curvas de compactação.

8.2.8. Determinação Da Resistência À Compressão De Misturas De Solo, Cimento E Etringita Moldadas Nas Condições Ótimas De Compactação.

Para a realização do ensaio são utilizadas às especificações contidas nas normas: NBR 12024/2012 e NBR 12025/2012. O solo utilizado foi seco ao ar, destorroado com uso de almofariz e mão de grau, homogeneizado e passado na peneira de 4,8 mm, sendo utilizados aproximadamente 0,5 Kg de solo para cada ensaio realizado.

Primeiramente, para cada ensaio, foram misturados os materiais secos de acordo com os traços estabelecidos com o resultado da dosagem físico-química, ou seja, foi mistura o solo e o aglomerante até que se obteve coloração uniforme em toda a massa. Posteriormente se adicionou água até que se atingiu a porcentagem de umidade ótima obtida pelas curvas de compactação.

O ensaio consiste na moldagem e ruptura a compressão de corpos-de-prova (CP) e para a pesquisa utilizou-se a adaptação para corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro e aproximadamente 10 cm de altura (Figura 8.15), distribuídos em 5 camadas, sendo utilizados equipamento próprio para esse tipo de moldagem (Figura 8.16).

Figura 8.15 – Desforma dos corpos-de-prova



Fonte: Autora (2021).

Figura 8.16 – Equipamento para moldagem de corpos de prova de 5x10 cm para ensaios de resistência.



Fonte: Autora (2021).

Após a determinação das matrizes foram moldados 5 corpos-de-prova para cada rompimento, um total de 15 CPs para cada matriz (excluída a matriz de solo puro que contou com um rompimento aos 3 dias), os quais ocorreram para os tempos de 3, 7 e 21 dias, sendo os corpos-de-prova das matrizes com cimento submersos em água em um período de 24 horas antes de sua realização (Figura 8.17). No ensaio de compressão simples, os CP's são colocados em pé na prensa do CBR (Figura 8.18), ou seja, com a face correspondente a altura na vertical.

Figura 8.17 – Corpos de prova em imersão



Fonte: Autora (2022).

Figura 8.18 – Prensa de CBR, utilizada para os ensaios de resistência.



Fonte: Autora (2021).

A ruptura ocorre pelo acréscimo de carga, sendo observados a carga na ruptura e feito o cálculo da tensão de ruptura (q_u) em função das especificações do equipamento. A velocidade de aplicação da carga na prensa é controlada e padronizada, geralmente de 1,00 mm/minuto.

O ensaio tem sido um dos métodos de investigação mais utilizados para a análise do efeito de diferentes variáveis na resistência do solo-cimento e na elaboração de metodologias de dosagem, além de servir para a verificação da efetividade da estabilização química do solo (DALLACORT *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2016; MOUSAVI, 2018).

8.2.9. Determinação Da Resistência À Tração Por Compressão Diametral De Misturas De Solo, Cimento E Etringita Moldadas Nas Condições Ótimas De Compactação.

O ensaio foi realizado conforme as especificações contidas nas normas NBR 12024/2012 e NBR 15087/2012. Devido a isso, o preparo, moldagem e cura dos corpos-de-prova, assim como as quantidades moldadas será o mesmo que o descrito para o ensaio de compressão simples, porém a disposição dos CP's na hora de executar o ensaio será de forma que a face correspondente à altura esteja disposta na horizontal, utilizando peça específica para seu posicionamento na prensa (Figura 8.19).

Figura 8.19 – Peça para posicionamento do corpo-de-prova para ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autora (2021).

9. RESULTADOS E ANÁLISES

9.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais e das matrizes foram obtidas a partir dos resultados da análise química e dos ensaios de granulometria, massa específica dos sólidos, limites de Atterberg, Difração de Raio-X (DRX) e das classificações HRB e Unificada.

9.1.1. Caracterização do solo

A análise química do solo (Tabela 9.1) apresenta algumas verificações importantes, tais como a quantidade de matéria orgânica a CTC (capacidade de troca de cátions).

Tabela 9.1 – Resumo da análise química realizada no Agrisolum

Item analisado	resultado	Item analisado	resultado
pH em KCl	3,9	Fósforo (P)	0,68 mg/dm ³
pH em H ₂ O	4,2	Enxofre (S)	ns
pH em CaCl ₂	3,8	Boro (B)	ns
Matéria orgânica	0,35%	Cobre (Cu)	1,8 mg/dm ³
CTC	3,59 cmol _c /Kg	Manganês (Mn)	8,58 mg/dm ³
Cálcio (Ca ²⁺)	0,1 cmol _c /dm ³	Zinco (Zn)	1,62 mg/dm ³
Magnésio (Mg ²⁺)	0,03 cmol _c /dm ³	Ferro (Fe)	50,34 mg/dm ³
Potássio (K ⁺)	0,01 cmol _c /dm ³		

Fonte: Adaptado de Agrisolum (2021).

Por meio dos dados apresentados percebe-se que o solo apresenta uma baixa porcentagem de matéria orgânica, o que é considerando excelente devido a interferência desse tipo de material na hidratação do cimento em matrizes de solo-cimento (SILVA, 2005).

Segundo Blücher (1995 apud. FRANÇA, 2017), o teor de matéria orgânica (MO) contida no solo utilizado em compósitos de solo-cimento deve ser baixo, considerando um limite de segurança de no máximo 2%, mesmo o autor verificando casos em que se houve estabilização de um solo com um teor de 5% e caso onde não foi possível a estabilização mesmo com 0,5% de MO.

Outro ponto que se pode destacar é CTC, que pode ser um indicativo da presença de argilominerais e também resultar em problemas na compactação do solo. Wooltorton (1955), por exemplo, relacionou valores da capacidade de troca catiônica com os três principais grupos de argilominerais. Neste caso o valor está baixo e de acordo com o verificado na pesquisa de Gonçalves *et al.* (2017), que apresentou uma CTC de 3,42 cmol_c/Kg para uma amostra de solo de Mandaguaçu-PR, sendo um indicativo da presença do argilomineral caulinita (CTC entre 3 e 15 m. e.).

A princípio não foi considerado a realização dos ensaios de CTC para as misturas, pois em tese se esperava outro comportamento do material, sendo verificado traços de argilominerais na sua composição, o que poderia justificar o comportamento apresentado e tornando necessário em estudos futuros a realização deste ensaio.

Se verifica também uma alta concentração de Ferro (Fe), típico de solos lateríticos. Conforme Oliveira (2019), os solos lateríticos são normalmente constituídos por uma camada profunda de solo poroso, rica em ferro e alumínio. Para Dias (2017) os latossolos apresentam a permanência da caulinita como argilomineral predominante, baixa atividade coloidal, além de um comportamento pouco plástico e não expansivo.

Quanto ao pH, o solo da cidade de Mandaguaçu-PR apresenta pH ácido, o que está de acordo com a pesquisa de Ladeira *et al.* (2019) que apresentou pH de 4,5 em H₂O e 3,8 em KCl e de Gonçalves *et al.* (2018) com pH de 3,8 para o solo da mesma cidade.

Para a caracterização do solo natural ainda foram realizados outros ensaios, os quais serviram de parâmetro de comparação para os resultados obtidos com as matrizes das misturas, sendo assim nessa seção foi discutido apenas os resultados obtidos pela massa específica dos sólidos e pela análise granulométrica.

Por meio de ensaio de duas amostras em picnômetro (Figura 9.1), chegou-se a uma massa específica dos sólidos (ρ_s) igual a 2,63 g/cm³. O que está de um pouco abaixo do obtido por Gonçalves *et al.* (2018), com ρ_s de 2,78 g/cm³ e por Ladeira *et al.* (2019), com 2,69 g/cm³ para solos do mesmo município. O resultado indica a predominância de quartzo, coerente com solos arenosos.

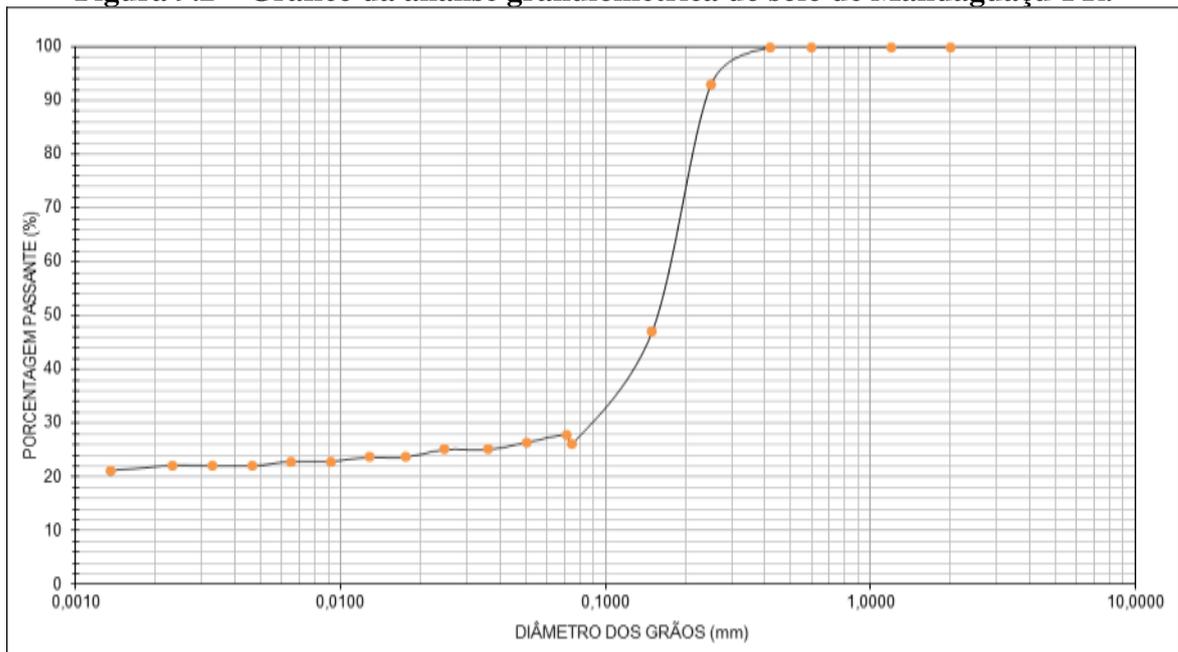
Figura 9.1 – Ensaio de Massa específica dos Sólidos em duas amostras



Fonte: Autora (2021).

Quanto a análise granulométrica do solo foi feita por meio dos ensaios de peneiramento e sedimentação, sendo os resultados apresentados em função do diâmetro das partículas x porcentagem de material passante, conforme mostra a Figura 9.2.

Figura 9.2 – Gráfico da análise granulométrica do solo de Mandaguaçu-PR.



Fonte: Autora (2021).

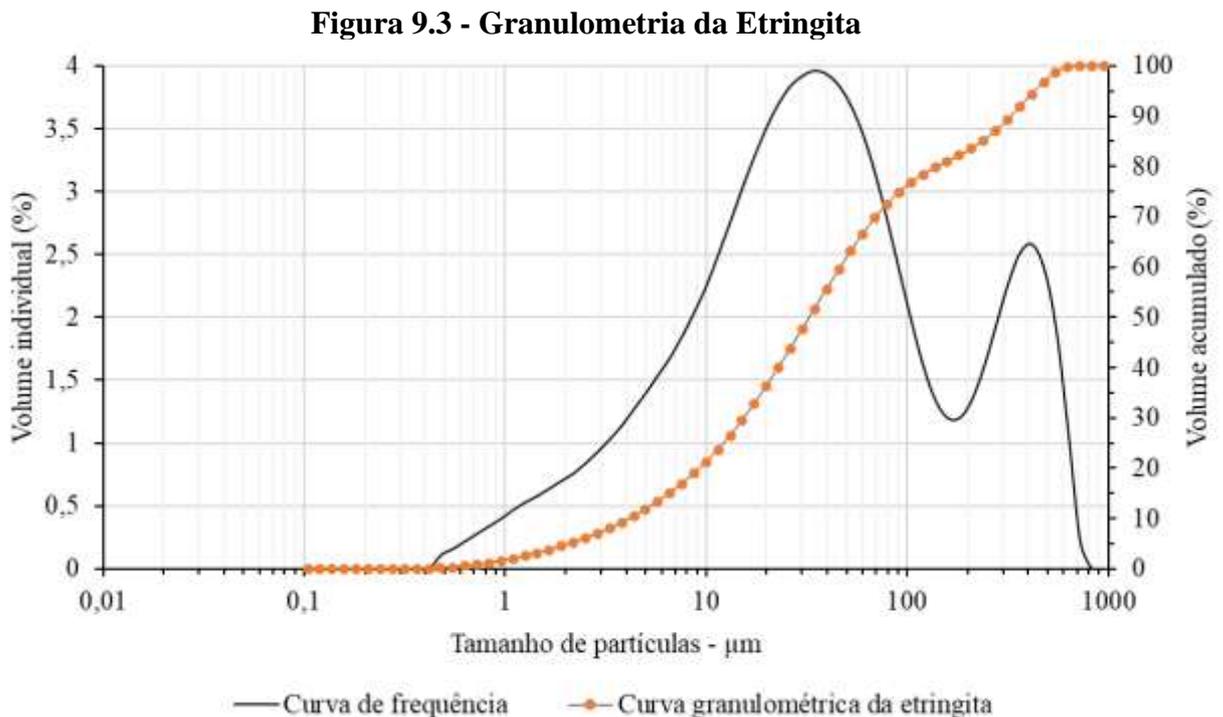
Por meio da análise do gráfico, pode-se afirmar que é um solo predominantemente arenoso, conforme visto anteriormente, composto por 72% de areia, 6% de silte e 22% de argila, o que está próximo das composições dos solos do município analisados por Lukiantchuki *et al.* (2019), com composição granulométrica de 76,5% de areia, 6% de silte e 17,5% de argila, ou seja, uma areia argilosa e por Ferreira *et al.* (2018), que também classifica o solo de Mandaguaçu como uma areia argilosa, contendo 73% de areia, 4,7% de silte e 22,3% de argila.

Além disso não foi possível determinar D10 e obteve-se um D30 e D60 respectivamente iguais a 0,09 e 0,18.

9.1.2. Distribuição Granulométrica A Laser Da Etringita

Para essa análise foi utilizado a classificação dos grãos de Udden-Wentworth, apresentada na pesquisa de Christofolletti e Moreno (2017). Segundo os autores esse tipo de classificação é o mais utilizado e difundido na área de geociências.

A análise granulométrica da etringita, realizada por meio do ensaio de difração a laser pode ser observada no gráfico da Figura 9.3, que mostra a curva com a distribuição do tamanho das partículas em relação ao volume acumulado (%).



Fonte: Autor (2021).

Separando em faixas de tamanho de: inferior a 1 μm , de 1 a 10 μm , de 10 a 100 μm , de 100 a 1000 μm e superior a 1000 μm , pode-se verificar mais facilmente as composições granulométricas. Além disso, se pode verificar a presença de dois picos de frequência (curva sem marcador).

Por meio do gráfico apresentado pode-se observar que não existem partículas com tamanho superior a 1000 μm . Para a faixa de 100 a 1000 μm , representando o pico de

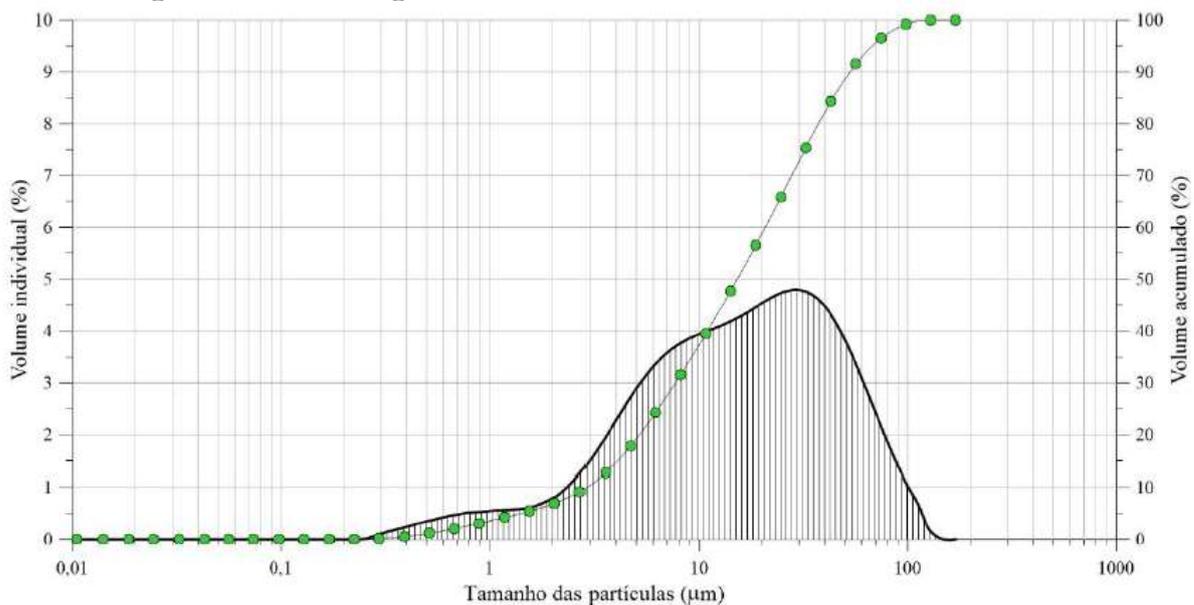
concentração menor a direita no gráfico, se tem uma concentração de partículas de 23,88%, classificadas como arenito muito fino a arenito grosso segundo a classificação de Udden-Wentworth (CHRISTOFOLETTI; MORENO, 2017).

No intervalo de tamanho de 10 a 100 μm , se encontra faixa de maior concentração de partículas, com um percentual de 54,96%, o que indica a classificação desse material como silto fino a arenito muito fino.

Na faixa entre 1 e 10 μm , se tem um percentual de 19,4% dessas partículas, sendo elas classificadas como argila a silto fino e na fração inferior a 1 μm , classificada como argila, se tem 1,76% da amostra.

Como pretende-se utilizar esse material como substituto parcial do cimento no processo de estabilização química do solo, é interessante realizar o mesmo processo de análise na curva granulométrica do cimento (CP II – Z- 32), que pode ser visualizada na Figura 9.4.

Figura 9.4 – Curva granulométrica do cimento Portland CP II – Z 32.



Fonte: Souza (2020).

Por meio do gráfico apresentado por Souza (2020), com a curva granulométrica do cimento CP II-Z 32 (marcador verde), fica evidente que não existem partículas com tamanho superior a 1000 μm . Na faixa de 100 a 1000 μm se tem uma concentração muito baixa e a maior concentração de partículas também, assim como na etringita, se encontra no intervalo de tamanho de 10 a 100 μm . Na faixa entre 1 e 10 μm se tem uma concentração maior de partículas do que para a mesma faixa de tamanhos na curva granulométrica da etringita.

9.1.3. Atividade Pozolânica Da Etringita

O ensaio foi realizado pelo IPT em uma amostra contendo 36 g de etringita, sendo o resultado do ensaio expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material “pozolânico”.

O laudo se encontra no Anexo A e apresentou um valor de 174 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de amostra, o que é relativamente baixo, pois, para que o material seja considerado pozolânico neste método, é necessário que ele apresente um índice de consumo mínimo de 750 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$.

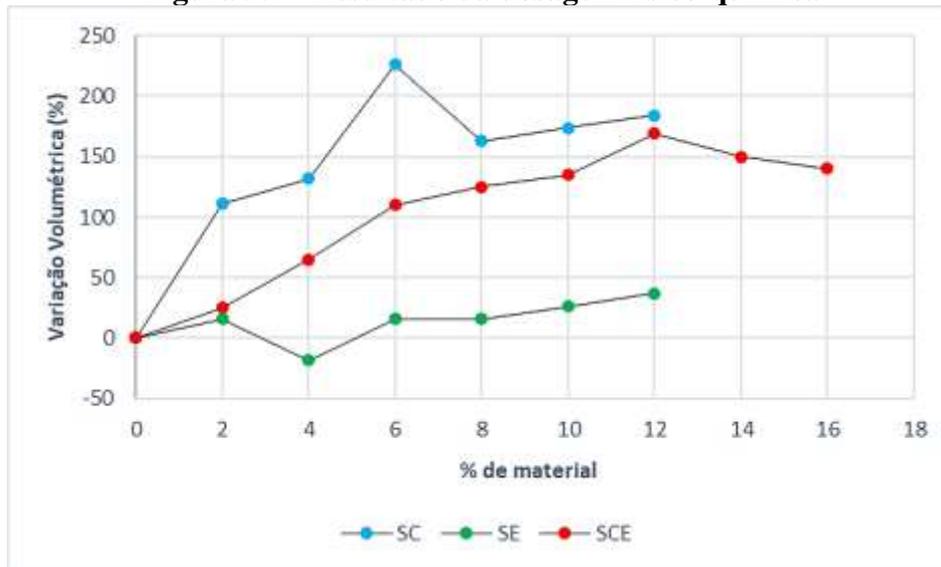
A atividade pozolânica é o resultado de uma instabilidade na reatividade da sílica e da alumina com o hidróxido de cálcio, no qual são geradas uma variedade de reações seguidas do endurecimento do conjunto (KIHARA, 1982 apud. DA COSTA, 2015).

O fato de não apresentar pozolanicidade pode ser justificado pela sua composição química que não apresentou muita reatividade com o hidróxido de cálcio, além disso, um material com baixa atividade pozolânica não infere na baixa resistência do produto final (concreto, argamassa, solo-cimento, etc), pois além dos efeitos químicos devem ser avaliados os efeitos físicos e mecânicos da adição ou substituição do cimento pelo material em questão, sendo necessário a avaliação dos resultados dos ensaios de resistência.

9.1.4. Dosagem Físico-Química De Misturas De Solo-Cimento Em Função Da Quantidade De Etringita Em Substituição Ao Cimento

Nessa etapa foram realizados ensaios de acordo com o descrito no item 8.2.7, sendo os resultados apresentados no gráfico da Figura 9.5 para o solo-cimento (SC), solo-tringita (SE) e solo-cimento-tringita (SCE).

Figura 9.5 - Resultado da dosagem físico-química



Fonte: Autora (2021).

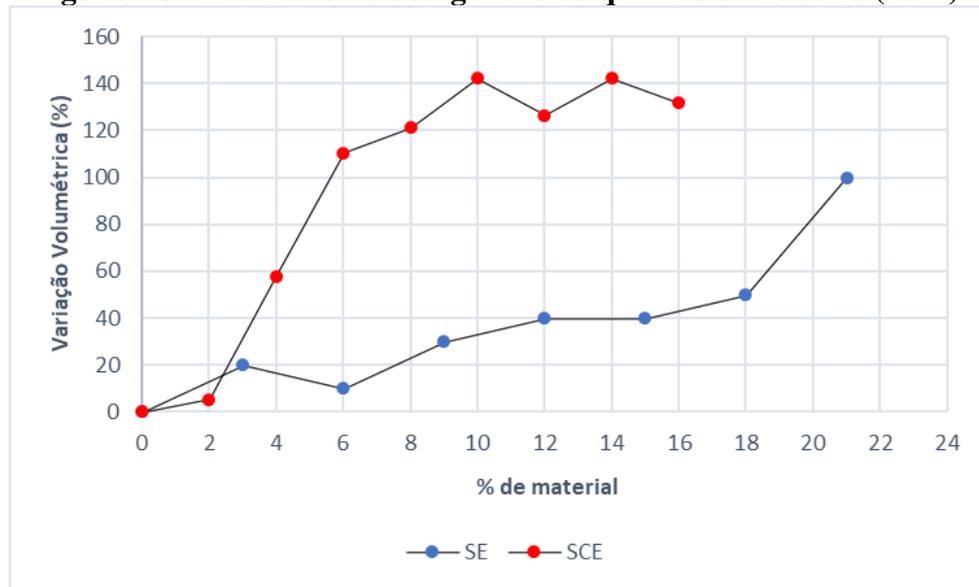
Pode-se observar que para o solo de Mandaguaçu, o teor mínimo de cimento necessário para a sua estabilização é de 6%, o que está de acordo com a pesquisa de Guideli *et al.* (2018).

Quanto ao uso da etringita, nos ensaios contendo apenas solo e etringita percebe-se um comportamento diferenciado, com variações de volume praticamente desprezíveis até a mistura contendo 8% do material, o que pode explicar o valor negativo obtido na curva para 4%. No entanto, embora seja perceptível uma maior variação volumétrica acima de 8% de material, essa variação ainda é sutil e não indica tendência à estabilização da variação volumétrica, até maior percentual observado (12%).

Para a mistura solo, cimento e etringita percebe-se um comportamento similar a curva de solo-cimento, se analisados apenas os percentuais de cimento, sendo indicado uma possível estabilização do volume para um percentual de 12%, sendo 6% de cimento e 6% de etringita.

Ladeira (2021) realizou em sua pesquisa ensaios de dosagem físico-química de misturas de solo-tringita, para percentuais maiores de etringita e misturas de solo-cimento- etringita, sendo utilizado o solo de Mandaguaçu-PR e percentuais de cimento e etringita variando 2% (1% de cimento e 1% de etringita).

Por meio dos resultados de Ladeira (2021), apresentados na Figura 9.6, pode-se observar que na curva referente a mistura solo-tringita se tem o mesmo comportamento observado na Figura 4.5, porém um aumento significativo na variação do volume conforme se tem um aumento do percentual de etringita, chegando a 100% para o uso de 21% do material, o que pode estar relacionado com as forças de atração/repulsão eletrostática entre as partículas de água e a superfície dos cristais de etringita.

Figura 9.6 - Resultado da dosagem físico-química de Ladeira (2021).

Fonte: Adaptado de Ladeira (2021).

Minerais como a etringita, em condições específicas são responsáveis por expansões de matrizes de solos estabilizados, seja pela absorção de água por parte dos cristais, ou então, devido um cristal impelir o outro (PUPPALA *et al.*, 2005).

Conforme Marín (2017), a formação e/ou a subsequente hidratação da etringita em solos sulfatados estabilizados leva a um aumento de volume considerável, sendo a adsorção de água por esses cristais o principal mecanismo de expansão relacionado a etringita. A etringita é um mineral que pode manter grandes quantidades de água, durante sua formação podem ocorrer altos níveis de tensão e um grande aumento de volume (BUENO, 2011).

Pelos dados da pesquisa atual, o percentual de cimento para estabilização do solo foi 6%, somado aos dados de Ladeira (2021), no qual pode-se verificar a estabilização do mesmo solo com um percentual de 10% de material, sendo 5% de cimento e 5% de etringita, a autora infere em uma possibilidade de estabilização com a substituição de 1% de cimento por 5% de etringita em matrizes de solo-cimento, simulando o mesmo comportamento da estabilização com 6% de cimento no solo, o que diverge dos dados observados na Figura 4.5.

Essa divergência entre os resultados da pesquisa atual e a de Ladeira (2021) pode estar relacionada a diversos fatores, entre eles a composição química do solo e da etringita, sendo necessário a análise dos outros ensaios envolvendo as matrizes contendo a etringita, para analisar o comportamento das misturas de solo-etringita e solo-cimento-etringita.

Devido a essa divergência considerou-se as matrizes delimitadas na Tabela 9.2 nos demais ensaios de caracterização e de resistência.

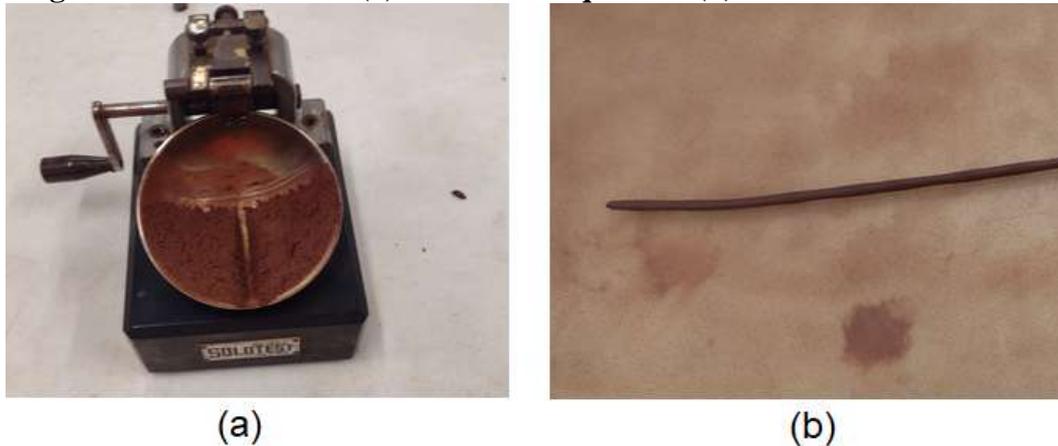
Tabela 9.2 – Matrizes adotadas

Sigla	Misturas	Sigla	Misturas
S	Solo puro	SE6	Solo com 6% de etringita
SC5	Solo com 5% de cimento	SCE10	Solo com 5% de cimento e 5% de etringita
SC6	Solo com 6% de cimento	SCE12	Solo com 6% de cimento e 6% de etringita
SE5	Solo com 5% de etringita		

Fonte: Autora (2021).

9.1.5. Limites de Atterberg

Como forma de caracterização, foram verificados os limites de Atterberg do solo puro e das misturas, ou seja, foram realizados os ensaios e limite de liquidez (Figura 9.7a) e de limite de plasticidade (Figura 9.7b) em todas as matrizes estudadas, sendo o resultado apresentado na Tabela 9.3.

Figura 9.7 – Ensaio de: (a) Limite de Liquidez e (b) Limite de Plasticidade

Fonte: Autora (2021).

Tabela 9.3 – Limites de Atterberg das Matrizes

Matriz	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	IP
S	25	13	12
SC5	22	14	8
SC6	23	15	8
SE5	20	12	8
SE6	20	12	8
SCE10	21	13	8
SCE12	21	13	8

Fonte: Autora (2022).

Quanto ao solo puro, os resultados estão próximos aos obtidos por Ladeira *et al.* (2019), Guideli *et al.* (2018), e Ferreira *et al.* (2018), para um solo evoluído de Mandaguáçu-PR, como mostra a Tabela 9.4.

Tabela 9.4 – Comparativo dos Limites de Atterberg para o solo de Mandaguáçu-PR

Autores	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	IP
Ladeira <i>et al.</i> (2019)	29	16	13
Guideli <i>et al.</i> (2018)	26	16	10
Ferreira <i>et al.</i> (2018)	31	15	16

Fonte: Autora (2022).

Já para as misturas, embora se obteve o mesmo IP para todas, inferior ao do solo puro, se tem a redução dos limites de liquidez e plasticidade, sendo essa diferença maior evidenciada nas misturas de solo-etringita.

Como se contém traço de argilo-mineral na etringita, observado no ensaio de DRX, se esperava um comportamento contrário, com aumento do índice de plasticidade. Essa situação deve ser melhor investigada e pode estar relacionada com o pH das misturas. Embora as matrizes contendo etringita apresentaram valores próximos de LP, durante a realização dos ensaios percebeu-se uma diferença tátil visual muito grande entre as amostras com as matrizes contendo solo puro ou solo-cimento, sendo a sensação tátil de manusear as misturas de solo-etringita mais próximo a sensação de se manusear uma amostra de solo argiloso.

Com o manuseio das amostras para os ensaios de LP, percebeu-se que os cilindros de solo-etringita e solo-cimento-etringita não apresentaram fissuras características aos solos arenosos e que ficaram em evidencia também durante a moldagem com misturas de solo-cimento, sendo os ensaios finalizados pela aparente paralização na perda de água das amostras sem que houvesse a quebra, além de já estarem com o diâmetro menor que o exigido pela norma.

Além disso, para a realização do ensaio de limite de liquidez no aparelho Casagrande percebeu-se uma descoloração da concha depois da utilização em amostras contendo etringita (Figura 9.8), mostrando uma possível reação química entre a mistura e o metal.

Figura 9.8 – Descoloração no equipamento logo após o uso



Fonte: Autora (2021).

Um outro comportamento observado, que pode ser indicio de uma reação química da etringita com metais, ocorreu durante o processo de produção do material, mais especificamente na etapa de secagem, no qual se verificou a opção de deixar o material em bandeja metálica secando ao ar em temperatura ambiente (Figura 9.9).

Figura 9.9 – Teste de secagem ao ar livre do lodo contendo etringita



Fonte: Autora (2021).

Após uma semana em repouso em bancada, além de não houver a secagem do material, se teve o aparecimento de bolhas características, sendo necessário a complementação da secagem levando o material a estufa. Uma possível justificativa para esse comportamento é que a etringita também é um composto mineral com grande capacidade de realizar trocas iônicas

com elementos que causam contaminação ao meio ambiente, tais como o arsênio, cromo e selênio (PERKINS; PALMER, 1999).

A etringita tem sido utilizada como um mecanismo viável para a imobilização de oxianions, no qual se tem o oxianion substituindo o sulfato (SO_4^-) na estrutura da etringita. Esse material também pode fazer trocas iônicas com alguns metais bivalentes e trivalentes, tais como Fe^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} e Pb^{2+} , os quais podem substituir os íons Ca^{+2} e Al^{+3} na estrutura da etringita (MANFROI, 2014). Pode-se inferir que as reações de troca iônica ocorrem no meio devido a própria instabilidade das partículas de etringita, o que ocorre após a diminuição da quantidade de sulfato dissolvido no meio (METHA; MONTEIRO, 2008).

9.1.6. Classificação HBR e Unificada do Solo

O solo-cimento é um material muito utilizado para bases de pavimentação, sendo interessante se realizar a classificação desse material pelo sistema Highway Research Board-HBR, classificação mais utilizada para esse uso, e pela Classificação Unificada do Solo - SUCS. Ambas as classificações levam em consideração além da distribuição textural do solo, mas também como os aspectos de comportamento desse material, como os limites de consistência.

Pela a classificação da HRB, o solo de Mandaguaçu-PR se enquadra como A-2-6 (LL de 25, LP de 12, IP de 13, %passante na #200 de 26,13%), contendo uma areia argilosa e sendo bom a excelente para o uso como subleito de pavimentos. Conforme Senço (2007), os solos do subgrupo A-2 contêm grande variedade de solos granulares misturados com solos finos, sendo uma das mais importantes faixas de solo, tanto pelo comportamento como subleito, quanto pela possibilidade de estabilização com ligantes, tais como o cimento.

O SUCS é um sistema de classificação de solos baseado na classificação de *Casagrande* pelo *U. S. Corps of Engineers*, em 1952, para sua utilização se tem o uso dos parâmetros de classificação textural e os limites de consistência, sendo a classificação dada como uma areia com argila (SC) (DAS, 2011).

9.1.7. Ensaio de pH

Outro aspecto analisado foi a alteração do pH das matrizes em relação ao solo puro, para isso foram feitas medições do pH das misturas em água e em KCl, além do valor de ΔpH que é a diferença entre os valores obtidos em água e KCl (Tabela 9.5).

Conforme Freitas (2018), o valor de ΔpH , determinado pela Equação 9.1, é utilizado como um indicativo da composição mineralógica predominante no solo, além de ser possível determinar o ponto de carga zero (PCZ), muito importante quando se trabalha com a incorporação de aditivos químicos ao solo susceptíveis de alterar o seu pH. Segundo o autor, o PCZ corresponde ao equilíbrio de cargas positivas e negativas e quando o pH aproxima do PCZ o solo fica mais suscetível aos fenômenos de desagregação e/ou defloculação. Para Baldotto e Velloso (2014), o PCZ indica a ausência de íons adsorvidos, movendo-se livremente na camada difusa e, portanto, tem papel importante no fenômeno de agregação e na retenção de íons adsorvidos.

$$\Delta\text{pH} = \text{pH} (\text{KCl}) - \text{pH} (\text{H}_2\text{O}) \quad (9.1)$$

Tabela 9.5 – Resultado dos ensaios de pH

Misturas	S	SC5%	SC6%	SE5%	SE6%	SCE10%	SCE12%
KCl	4,06	11,82	11,84	5,72	5,74	11,64	11,63
H₂O	4,66	11,61	11,61	6,13	6,14	11,60	11,62
ΔpH	-0,60	0,21	0,23	-0,41	-0,40	0,04	0,01
PCZ	3,46	12,03	12,07	5,31	5,34	11,68	11,64

Fonte: Autora (2022).

O solo puro, assim como os valores já apresentados na Tabela 9.1, possui um comportamento ácido com pH inferior a 5,0, além disso percebe-se um aumento relativo do pH de todas as matrizes, embora para as misturas contendo apenas etringita esse aumento seja pouco representativo e ainda se tenha um pH ácido. As matrizes contendo cimento apresentaram pH alcalino acima de 11, o que está de próximo ao verificado por Ladeira (2021) para um solo de Mandaguaçu-PR e o mesmo tipo de cimento.

A matriz S (solo puro), apresentou um valor em módulo de ΔpH superior as demais matrizes, o que indica uma maior presença de íons em solução que as demais matrizes, uma predominância de cargas negativas, que está associado a uma maior capacidade de troca catiônica (CTC).

Geralmente matrizes de solo estabilizadas com cimento ou cal possuem pH em torno de 12, pois as reações pozolânicas que a cal livre, a água e a sílica e/ou alumina tornam a mistura alcalina (SILVA, 2016).

Para as misturas variando apenas o percentual de material (SC, SE e SCE) se teve pouca variação entre as leituras, pois o acréscimo de cimento e/ou etringita foi muito pouco.

A leitura em KCl para as matrizes de solo-cimento-etringita (SCE) está um pouco inferior em relação as que contém apenas solo-cimento (SC), o que pode ser justificado pelos resultados em KCl serem pouco influenciados pelo efeito de suspensão, além de se eliminar o potencial de junção líquida, no qual se tem um resultado onde não há influência da variação de conteúdo de eletrólitos do solo (SILVA, 2018).

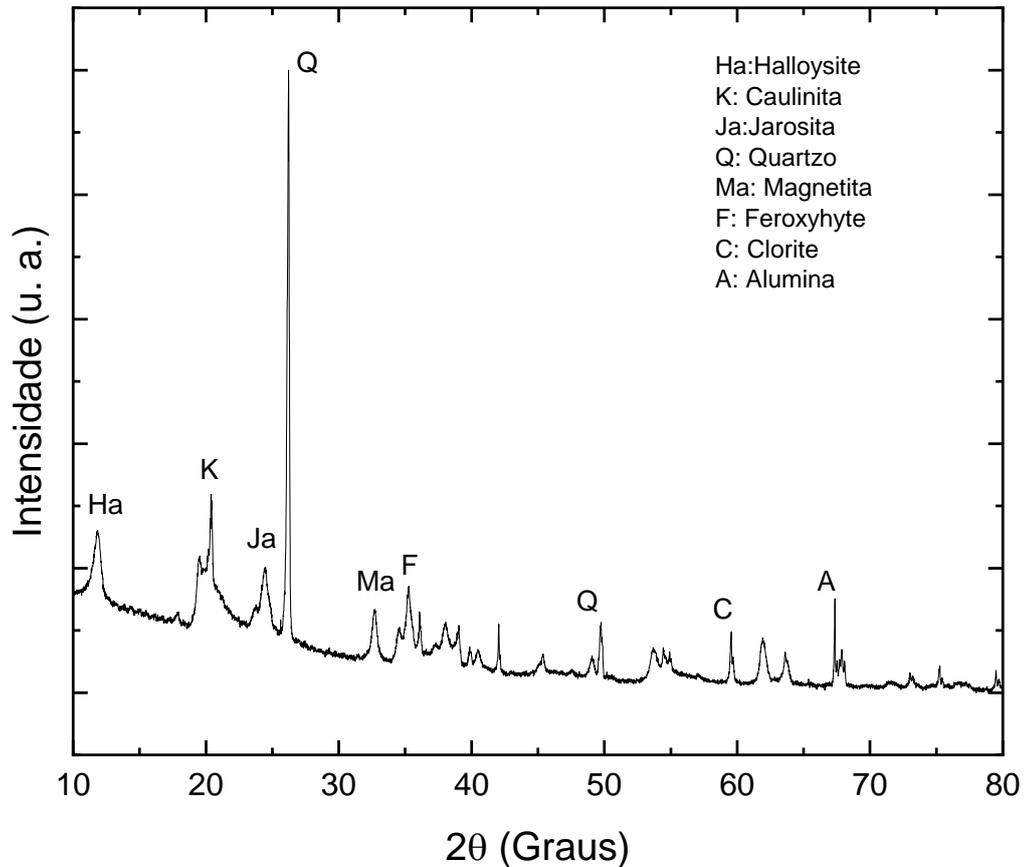
Para as misturas contendo SCE observou-se uma pequena diferença entre os valores obtidos nas leituras em KCl e água, o que resultou em um pH muito próximo do valor do PCZ, o que, Conforme Freitas (2018) indica que as matrizes contendo essas misturas ficam mais suscetível aos fenômenos de desagregação.

Outro aspecto observado pelos valores do PCZ é que o solo natural (S), assim como as misturas com etringita (SE) tem um balanço de cargas negativas, pois os valores são inferiores ao do pH obtido em água, diferentemente das misturas de solo-cimento e solo-cimento-etringita. Conforme Teodoro, Parabocz e Rocha (2020), em soluções cujo o pH (H₂O) está abaixo do PCZ, os argilominerais presentes irão atrair cargas negativas por atração eletrostática, assim, sendo mais eficaz na remoção de moléculas aniônicas.

9.1.8. Difração De Raio-X (DRX)

Para a caracterização dos materiais também foram realizados ensaios de DRX em amostras de solo (Figura 9.10), etringita (Figura 9.12) e cimento (Figura 9.13). Vale ressaltar que a pesquisa realizada procurou avaliar o comportamento de matrizes de solo e solo-cimento com a adição de etringita sintetizada em laboratório, proveniente do tratamento de efluentes de anodização, sendo sua caracterização primordial.

Figura 9.10 – DRX do solo de Mandaguaçu-PR

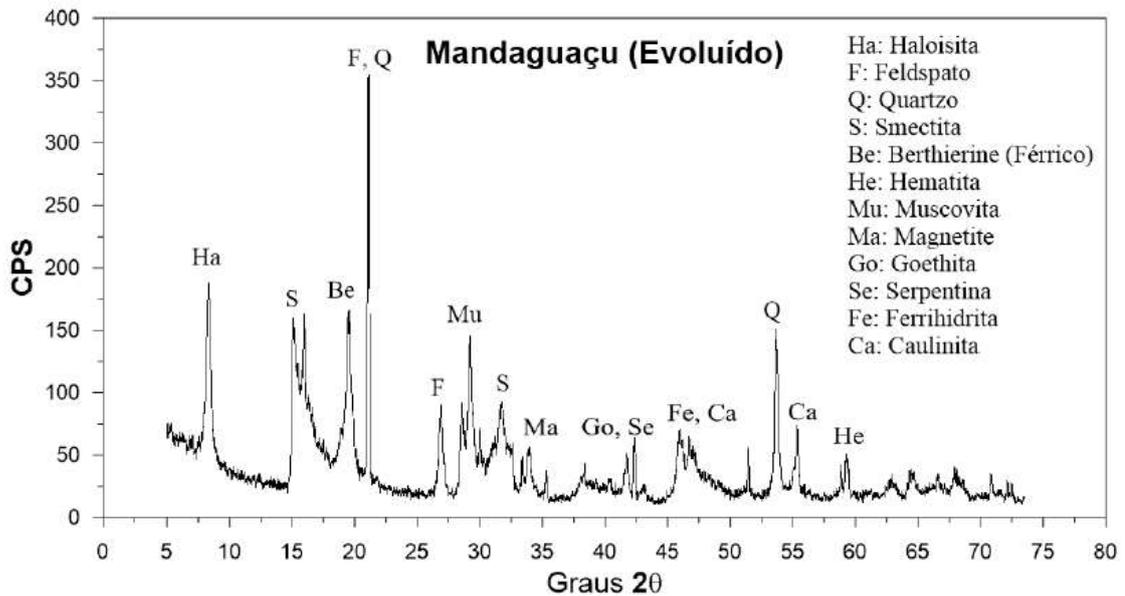


Fonte: Autora (2021).

Pode-se observar a presença de minerais como a halosita, quartzo, caulinita, jarosita, feroxyhyte e alumina, compostos principalmente por oxigênio, silício, ferro, alumínio e hidrogênio, além de potássio, ferro, entre outros. Como critério de comparação se tem o DRX realizado por Ladeira *et al.* (2019) na Figura 9.11.

Pode-se observar na Figura 9.11 outros de minerais presentes além dos apresentados na Figura 4.10, sendo observado também minerais iguais em ambas as análises, tais como a halosita, quartzo, caulinita e magnetita. Uma possível causa dessa divergência é a ocorrência de lixiviação no solo entre as coletas ou a presença de bolsões de solos diferenciados no local de coleta.

Figura 9.11 – DRX do solo de Mandaguaçu-PR por Ladeira *et al.* (2019)

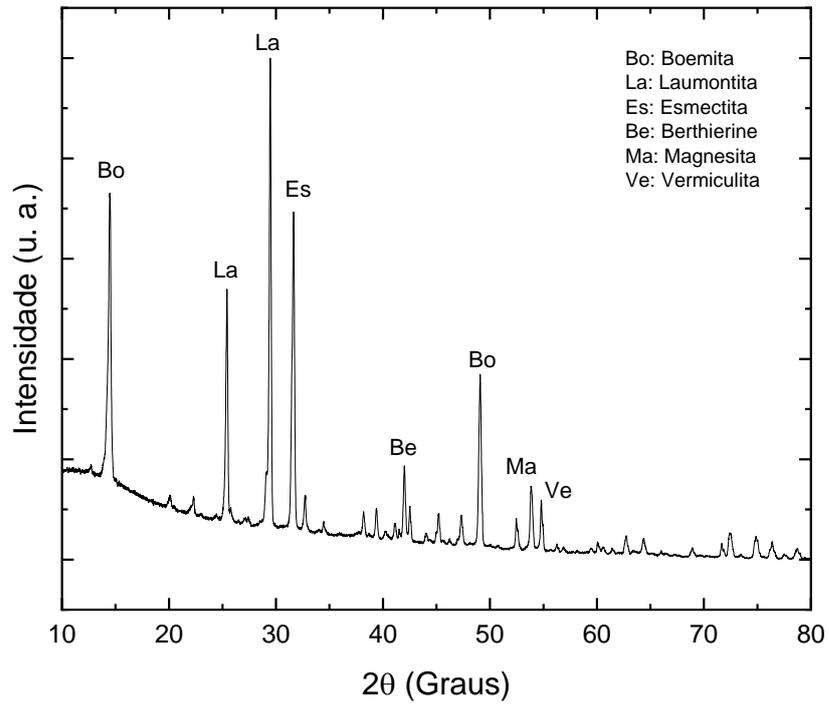


Fonte: Ladeira *et al.* (2019).

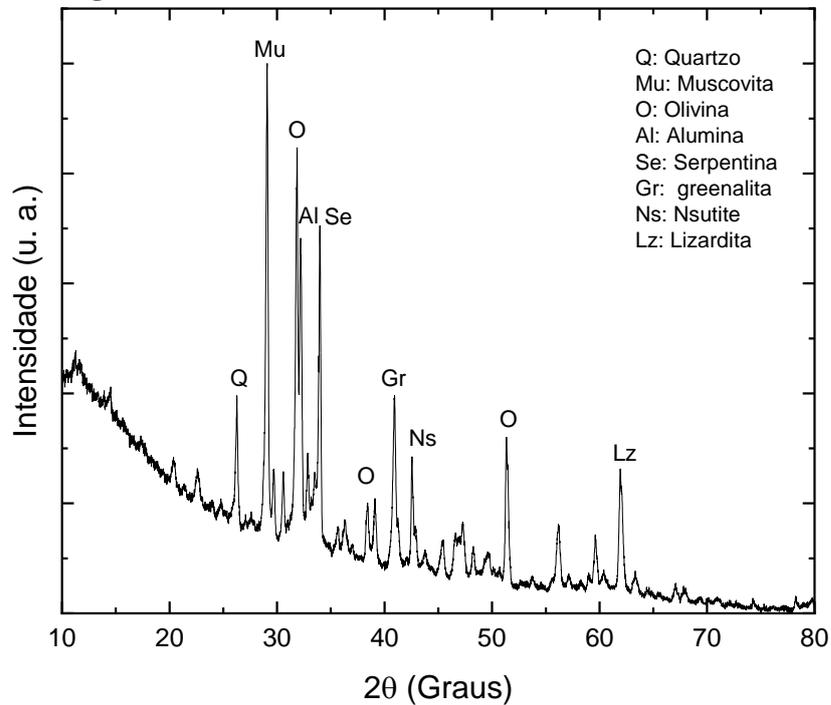
Conforme Ladeira (2021), diferente da amostra analisada, em sua pesquisa o solo de Mandaguaçu-PR apresentou a predominância de feldspato, além da presença de minerais férricos como hematita, goethita e magnetita. Em concordância com a pesquisa atual se tem a presença de argilominerais de baixa atividade como a caulinita e haloisita, o que é coerente com dados observados para solos lateríticos, que apresentam óxidos de ferro na sua constituição e argilominerais de baixa atividade. (LADEIRA *et al.*, 2019).

Por meio dos ensaios de DRX foi possível fazer um comparativo entre a composição do Cimento CP II – Z 32 e a etringita sintetizada, utilizados na pesquisa. Pelo comparativo das Figuras 9.12 e 9.13, percebe-se que não há minerais em comum entre esses dois materiais.

No cimento se tem a predominância de muscovita e olivina, diferente da amostra de etringita, no qual se teve a predominância da laumontita e boemita, sendo ainda identificado na etringita a presença de argilominerais. A esmectita e vermiculita, argilominerais ativos, na composição da etringita, além das forças de atração e repulsão entre a etringita e as partículas de água, podem estar relacionados com a absorção de água pelo material em outros ensaios.

Figura 9.12 – DRX da Etringita

Fonte: Autora (2021).

Figura 9.13 – DRX do Cimento Portland CII -Z -32

Fonte: Autora (2021).

As esmectitas são um grupo de argilominerais com partículas muito finas, de média a alta capacidade de troca catiônica, alta capacidade de absorção de água, alta viscosidade, baixa

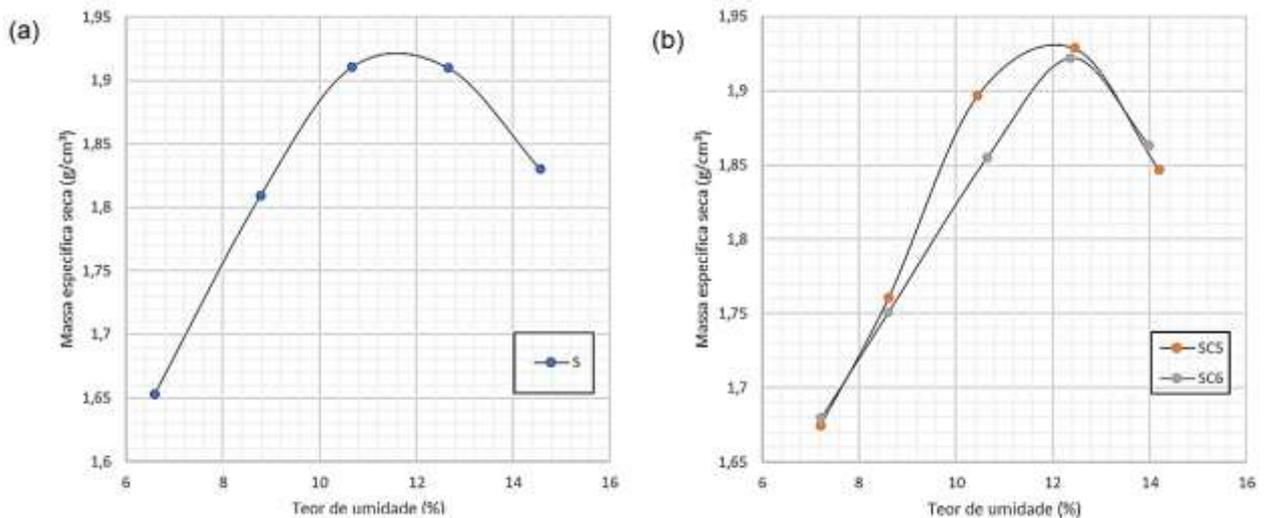
permeabilidade, de média a alta capacidade de inchamento, alta plasticidade e alta resistência à compressão (MURRAY, 2007).

No caso da vermiculita, o termo é utilizado para designar comercialmente um grupo de minerais micáceos constituído por cerca de dezenove variedades de silicatos hidratados de magnésio e alumínio, com ferro e outros elementos. Entre as características das vermiculitas, pode-se citar baixa elasticidade, baixa densidade e elevadas capacidades de adsorção e absorção (LUZ; LINS, 2008).

9.2. CURVAS DE COMPACTAÇÃO

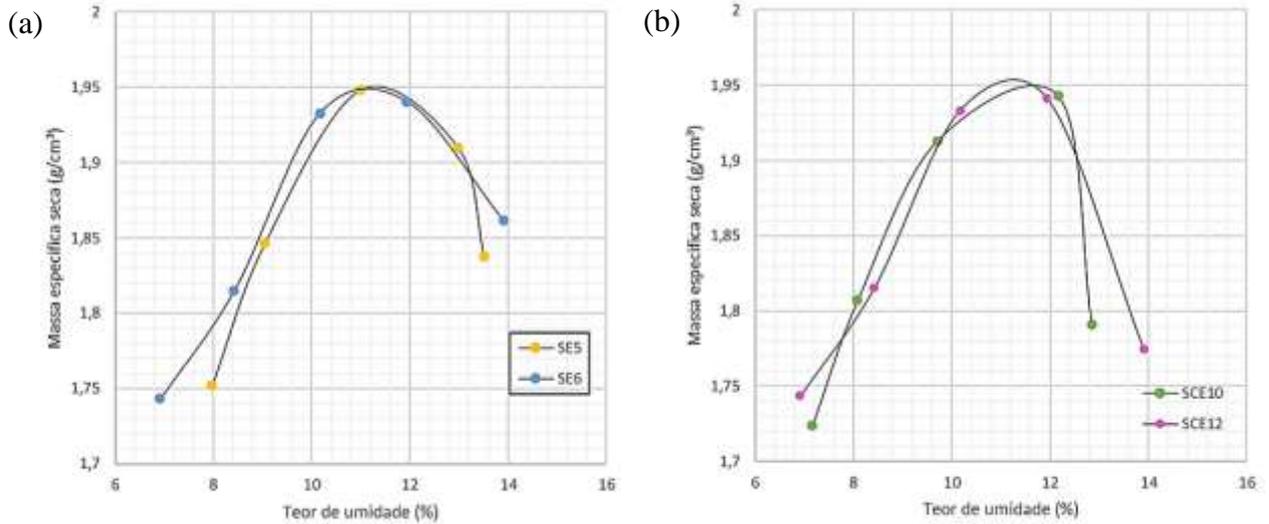
Para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência, primeiramente foi necessário determinar a umidade ótima e a massa específica seca máxima das misturas, apresentadas na Tabela 9.6, sendo os resultados plotados nos gráficos das Figuras 9.14 e 9.15.

Figura 9.14 – Curvas de compactação do (a) solo e (b) solo-cimento.



Fonte: Autora (2022).

Figura 9.15 – Curvas de compactação do (a) solo-etringita e (b) solo-cimento-etringita.



Fonte: Autora (2022).

Tabela 9.6 – Parâmetros de compactação

Matriz	ω_{otm} (%)	ρ_d máx (g/cm³)	Matriz	ω_{otm} (%)	ρ_d máx (g/cm³)
S	11,60	1,923	SE6	11,10	1,950
SC5	12,08	1,932	SCE10	11,80	1,950
SC6	12,25	1,924	SCE12	11,20	1,955
SE5	11,40	1,950			

Fonte: Autora (2022).

As matrizes de solo-cimento apresentaram valores muito próximos de massa específica seca obtida para o solo puro. Em termos de porcentagem, se teve um aumento de 0,47% para a matriz com 5% de cimento e 0,052% para a matriz com 6%, ou seja, uma alteração muito baixa. Conforme Souza (2019), essa alteração é devido ao cimento agir como filler e preencher alguns vazios da mistura. Já em termos de umidade se teve um aumento respectivamente de 0,48% e 0,65% na umidade ótima.

Para as misturas contendo etringita (SE e SCE) o aumento da massa específica seca já foi mais pronunciado do que o apresentado pelo solo-cimento, no qual quase todas as misturas contendo etringita apresentaram um aumento de 1,40%, exceto a matriz SCE12 que apresentou um aumento de 1,66% em relação a massa específica seca, o que ainda é considerado baixo. Tal resultado difere do esperado, uma vez que a etringita apresenta partículas de diâmetro maior que as do cimento CPII -Z 32, obtido pela granulometria a laser, o que pode estar relacionado

com a presença dos argilominerais encontrados na composição da etringita pela análise do DRX.

Quanto a alteração da umidade ótima das misturas (ω_{otm}) já se tem uma variação de forma mais aleatória, com um aumento para as misturas SC5, SC6 e SCE10 e uma redução para as demais misturas em relação ao solo puro.

Conforme Sales, Ribeiro e Nery (2017), quando se trabalha com a adição de materiais finos no solo se tem um aumento da umidade ótima na compactação, pois é necessária uma quantidade maior de água para envolver completamente todas as superfícies de contato e para realizar as reações de hidratação, o que está de acordo com as matrizes contendo somente cimento e a matriz SCE10. No caso das matrizes contendo etringita percebe-se que ao se aumentar o teor desse material na mistura se tem o efeito contrário, tendo uma redução da umidade ótima.

9.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Os corpos-de-prova para os ensaios de resistência a compressão simples e resistência a tração por compressão diametral foram moldados conforme os dados apresentados no Apêndice A, sendo os resultados expostos no Apêndice B e discutidos nos itens 9.3.1. O Apêndice C contém os índices físicos dos corpos-de-prova, sendo os valores médios apresentados na tabela 9.7.

Tabela 9.7 – Média dos valores dos índices físicos dos corpos-de-prova moldados

Matriz	Sr (%)	Sr_{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	ρ_{rupt} (g/cm³)	ρ_d (g/cm³)
S	83,44	83,38	0,36	0,27	-	2,15	1,923
SC5	87,03	87,33	0,36	0,26	0,30	2,17	1,937
SC6	85,68	88,54	0,36	0,27	0,59	2,17	1,934
SE5	85,48	87,80	0,35	0,26	-	2,17	1,951
SE6	83,70	87,45	0,35	0,26	-	2,18	1,952
SCE10	88,51	93,54	0,35	0,26	2,57	2,13	1,953
SCE12	85,07	93,57	0,35	0,26	3,27	2,12	1,953

Obs: - Sr_{rupt} (%) para as matrizes S, SE5 e SE6 foi obtido baseado nos valores após a cura dos corpos de prova;

- Sr_{rupt} (%) para as matrizes SC5, SC6, SCE10 e SCE12 foi obtido baseado nos valores após a cura e imersão por 24 horas dos corpos de prova;

Fonte: Autora (2022).

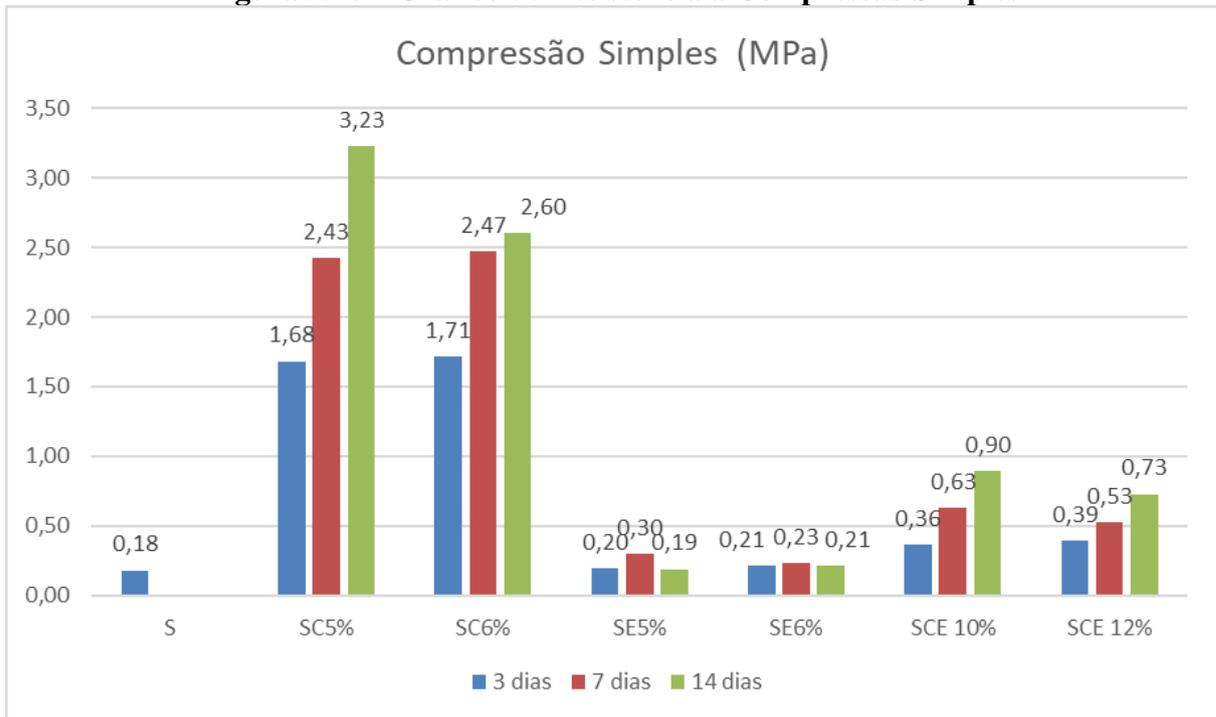
Quando se tem o aumento da massa específica seca máxima, geralmente se tem um material mais denso e conseqüentemente mais resistente, o que ocorre com as matrizes SC, porém nas demais misturas, que apresentaram massa específica seca máxima maior que o do solo puro, se verificou resistências menores que o solo puro, o que pode estar relacionado com o peso específico alto do cimento e com o da etringita (que precisa ser verificado), que pode ter aumentado o $\rho_{am\acute{a}x}$, mas que pode ter resultou em uma estrutura mais porosa, com índice de vazios e porosidade maiores.

As matrizes contendo apenas etringita, não puderam ser submersas, pois a mistura se desmanchava em água, porém percebe-se um aumento em torno de 3,75% na saturação dos CP's após período em câmara úmida, mostrando uma certa absorção da água do ambiente.

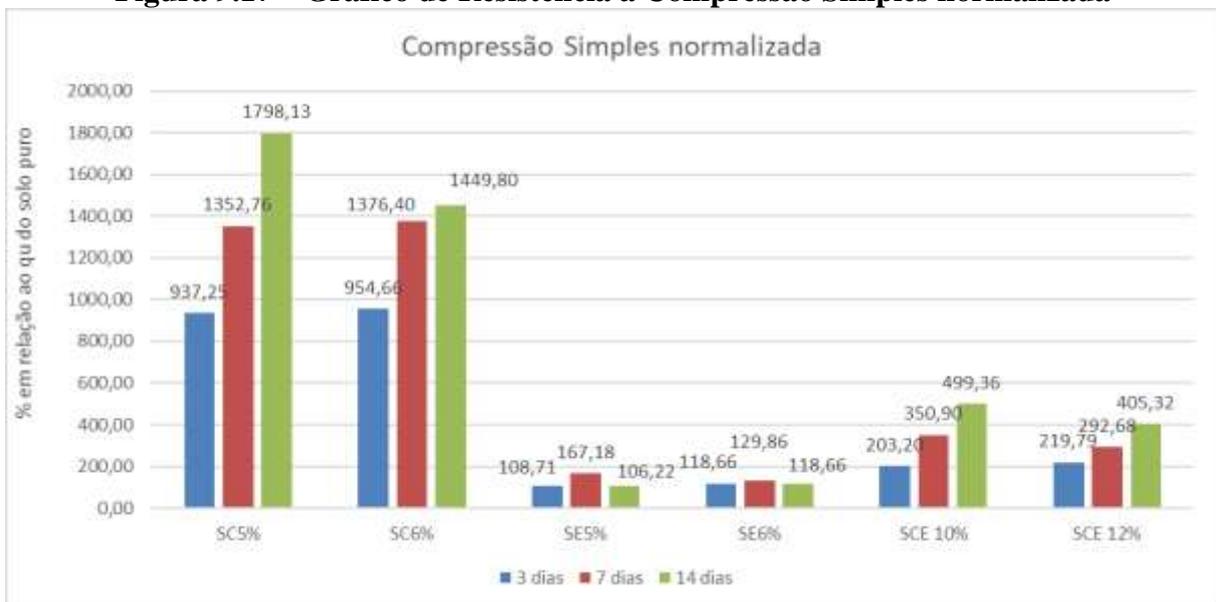
Quanto as matrizes contendo solo-cimento-etringita, percebe-se uma maior absorção de água em relação as matrizes de solo-cimento para um mesmo período de 24 horas de imersão, o que pode estar relacionado com os argilominerais presentes na composição da etringita. Além disso, as misturas SCE após a imersão apresentaram alterações significativas de altura e diâmetro, indicando possíveis problemas de expansão, necessitando uma maior investigação quanto a esse aspecto.

9.6.1. Resistência a Compressão Simples

Por meio dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) foi possível plotar os gráficos apresentados nas Figuras 9.16 e 9.17. Em conjunto com a Tabela 9.8, que apresenta os valores médios de resistência pode-se realizar uma análise comparativa.

Figura 9.16 – Gráfico de Resistência à Compressão Simples

Fonte: Autora (2022).

Figura 9.17 – Gráfico de Resistência à Compressão Simples normalizada

Fonte: Autora (2022).

Percebe-se que todas as matrizes das misturas apresentaram uma resistência a compressão superior à do solo natural. Outro aspecto bem nítido ao se observar as Figuras 9.16 e 9.17 é a discrepância entre as matrizes de solo-cimento e as demais.

Tabela 9.8 – Resultados da Resistência a Compressão Simples

Matriz	Tempo de cura	qu (MPa)	Dv (%)	Cv (%)
S	7 dias	0,18	14,55%	8,11%
SC5%	3 dias	1,68	35,83%	2,13%
	7 dias	2,42	75,87%	3,13%
	14 dias	3,23	62,85%	1,95%
SC6%	3 dias	1,71	56,59%	3,30%
	7 dias	2,47	119,45%	4,84%
	14 dias	2,60	97,12%	3,73%
SE5%	3 dias	0,20	4,99%	2,56%
	7 dias	0,30	21,76%	7,25%
	14 dias	0,19	19,97%	10,48%
SE6%	3 dias	0,21	24,20%	11,36%
	7 dias	0,23	12,73%	5,46%
	14 dias	0,21	37,36%	17,54%
SCE10%	3 dias	0,37	17,53%	4,81%
	7 dias	0,63	36,19%	5,75%
	14 dias	0,90	70,46%	7,86%
SCE12%	3 dias	0,39	12,69%	3,22%
	7 dias	0,53	19,81%	3,77%
	14 dias	0,73	57,94%	7,97%

Fonte: Autora (2022).

Verifica-se que as matrizes SC5% e SC6% apresentam padrões parecidos de incrementos de resistência, exceto pela resistência com 14 dias de cura do SC6%, o que pode ser justificado por algum problema na moldagem ou durante a cura em câmara úmida, sendo necessário uma melhor investigação ou mesmo refazer a moldagem e rompimento para essa matriz e tempo de cura. Percebe-se, ao analisar a Figura 9.17, que a adição de 1% de cimento na matriz (SC6%), se excluído o rompimento aos 14 dias de cura, trouxe ganhos de resistência respectivos de 17,41%, para uma cura de 3 dias e 23,64%, para 7 dias.

Outra análise possível é a das matrizes solo-cimento-etringita, no qual mesmo se mantendo o mesmo percentual de cimento das matrizes solo-cimento e acrescentando a etringita, a redução da resistência em relação ao solo-cimento foi muito evidenciada. Uma possível explicação para esse comportamento é a influência dos argilominerais presentes na etringita, percebe-se que a adição de etringita prejudicou as reações de hidratação do cimento. Logo, os resultados indicam que a junção de etringita com cimento não parece ser interessante, ao passo que as matrizes solo-etringita tiveram pouca alteração de resistência em relação ao solo puro, se comparado a alteração devida a adição do cimento, sendo o aumento não superior a 67,18%.

Outro ponto observado foi o padrão de ruptura. Nas matrizes contendo apenas cimento o rompimento foi bem marcado, com as fissuras bem aparentes, como mostra a Figura 4.18, já nas matrizes contendo etringita, o rompimento ocorreu depois de uma maior deformação do corpo-de-prova (Figura 9.19), com fissuras discretas, sendo o ensaio interrompido pelo decréscimo na leitura.

Figura 9.18 – Corpo-de-prova de matriz solo-cimento após ensaio de resistência a compressão simples



Fonte: Autora (2022).

Figura 9.19 – Corpo-de-prova de matriz solo-etringita após ensaio de resistência a compressão simples

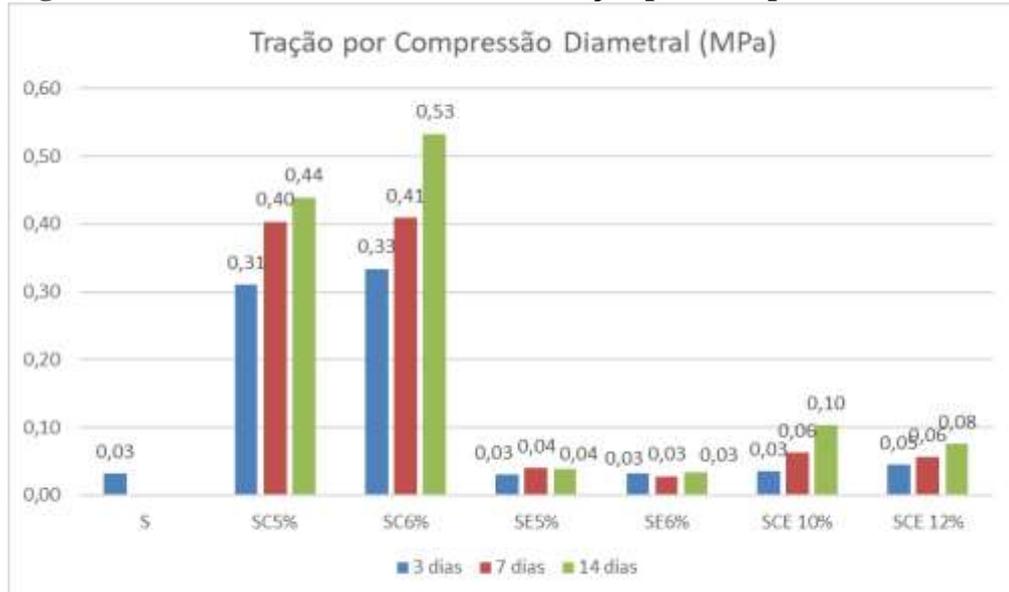


Fonte: Autora (2022).

9.6.2. Resistência a Tração por Compressão Diametral

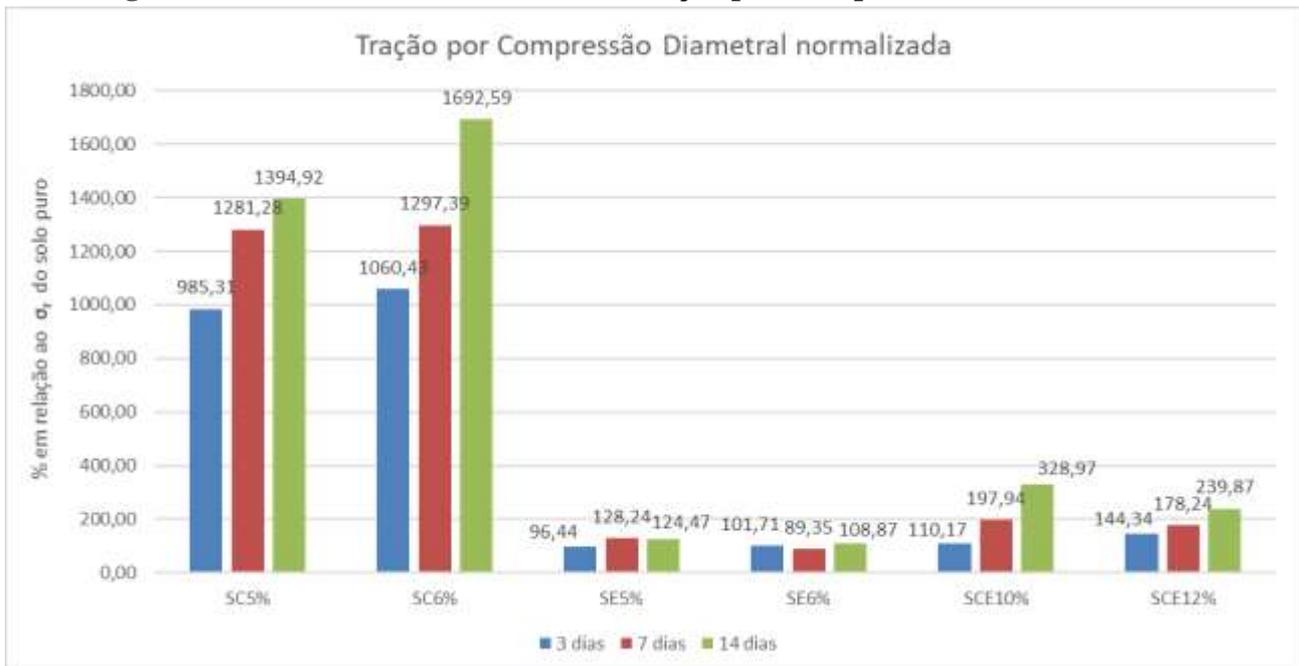
Faram realizados ensaios de resistência a tração (σ_r) em três tempos de cura (3, 7 e 14 dias), sendo as médias dos resultados apresentadas na Tabela 9.9 e plotada no gráfico da Figura 9.20. A Figura 9.21 apresenta o gráfico normalizado em relação ao solo puro.

Figura 9.20 – Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Autora (2022).

Figura 9.21 – Gráfico de Resistência à Tração por Compressão Diametral normalizada



Fonte: Autora (2022).

Tabela 9.9 – Resultados da Resistência a Tração por Compressão Diametral

Matriz	Tempo de cura	σ_r(MPa)	Dv (%)	Cv (%)
S	7 dias	0,03	1,93%	6,14%
SC5%	3 dias	0,31	9,16%	2,95%
	7 dias	0,40	7,84%	1,94%
	14 dias	0,44	14,78%	3,36%
SC6%	3 dias	0,33	13,22%	3,96%
	7 dias	0,41	14,10%	3,45%
	14 dias	0,53	16,27%	3,05%
SE5%	3 dias	0,03	1,53%	5,04%
	7 dias	0,04	3,68%	9,12%
	14 dias	0,04	3,06%	7,80%
SE6%	3 dias	0,03	3,61%	11,28%
	7 dias	0,03	2,37%	8,41%
	14 dias	0,03	5,15%	15,01%
SCE10%	3 dias	0,04	2,29%	6,59%
	7 dias	0,06	2,21%	3,55%
	14 dias	0,10	7,63%	7,37%
SCE12%	3 dias	0,05	4,65%	10,22%
	7 dias	0,06	2,46%	4,39%
	14 dias	0,08	8,91%	11,80%

Fonte: Autora (2022).

Os resultados apresentaram de forma geral um padrão parecido com o obtido nos ensaios de resistência a compressão simples, no qual se tem as misturas com cimento com valores mais evidenciados e as demais matrizes com valores bem inferiores. O que difere do padrão anteriormente apontado (item 4.3.1) é o valor de σ_r para os 14 dias de cura da matriz SC6% que possui um aumento da resistência mais significativo em relação aos 7 dias de cura da mesma mistura, além das misturas com apenas etringita, que também apresentaram pouca variação em relação ao solo puro e um padrão indefinido de aumento ou decréscimo com o aumento de tempo de cura, porém apresentou valores de σ_r inferiores ao do solo puro.

Pode-se observar que o valor obtido é reduzido em relação a resistência à compressão, sendo a resistência à tração por compressão diametral equivalente a um mínimo de 9,52% (SCE10% - 3 dias) da resistência à compressão e um máximo de 20,57% (SE5% - 14 dias).

10. CONCLUSÃO

Buscando a avaliação dos efeitos causados pela substituição parcial do cimento Portland por Etringita em matrizes de solo-cimento, além de uma destinação para um resíduo de tratamento de efluente, no decorrer da pesquisa observou-se diversos aspectos da caracterização dos materiais e do desempenho mecânico das misturas, no qual pode-se concluir:

1. O solo de Mandaguaçu-PR é considerado uma areia argilosa e é um solo favorável a estabilização química, pois tem baixo teor de matéria orgânica e predominância de argilominerais não expansivos.
2. Percebeu-se uma dificuldade na secagem da etringita ao ar livre, dificultando o trabalho em larga escala com o lodo produzido pelo tratamento do efluente. Outro aspecto negativo da síntese da etringita é o custo dos reagentes, sendo interessante a busca por reagentes mais viáveis.
3. A etringita, proveniente do tratamento de efluente de anodização, apresentou uma atividade pozolânica extremamente baixa, diâmetro superior ao cimento e possível presença de argilominerais ativos.
4. Embora a interpretação do difratograma (DRX) apontou a presença de argilominerais como a esmectita e a vermiculita, é necessária uma confirmação da composição mineralógica da etringita, sendo preciso realizar uma maior investigação por meio de mais ensaios de DRX, mudando a preparação da amostra, além de outros ensaios como o FRX, o método de adsorção de azul de metileno para determinação da CTC e de visualização por microscopia eletrônica de varredura.
5. Quanto a plasticidade do solo e das misturas, embora todas as matrizes apresentassem o mesmo valor do índice de plasticidade (IP), com redução dos limites de Atterberg em relação ao solo puro, a alteração tátil visual das misturas contendo etringita foi muito evidenciada no manuseio das amostras, sendo interessante realizar os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para a etringita pura.
6. Ficou evidente também durante os ensaios de consistência e na própria secagem do material uma possível reação com os metais dos recipientes e equipamentos, sendo necessário um cuidado ao manusear a etringita, o que pode estar relacionado com o efeito do pH nas reações químicas da etringita.

7. Quanto a dosagem-físico química essa foi utilizada como um parâmetro para a determinação das matrizes, por meio dela foi possível verificar um aumento do volume do conjunto contendo etringita com o aumento da porcentagem de material na mistura.
8. Aliado ao aumento expressivo do volume na dosagem físico-química das misturas contendo etringita, se tem o aumento expressivo de peso, altura e saturação dos corpos de prova contendo cimento e etringita após a imersão, sendo necessários estudos de expansão para verificar esse comportamento.
9. De acordo com os ensaios de pH, o solo puro apresentou um pH ácido inferior a 5,0, sendo que a adição de cimento e etringita alterou o pH o elevando. Porém, enquanto a adição de cimento elevou o pH para um pH alcalino superior a 11, o uso apenas da etringita elevou mais discretamente o pH da mistura, ainda a deixando numa faixa ácida, abaixo do pH 6.
10. Pelos ensaios de compactação observou-se que o uso da etringita contribui para a diminuição da umidade ótima e aumento da massa específica seca máxima, o que diverge do uso apenas do cimento nas misturas que aumenta a massa específica aparente, mas que também aumenta a umidade ótima.
11. As matrizes de solo-cimento apresentaram ganho evidente de resistência em relação ao solo puro, sendo o comportamento das matrizes contendo etringita completamente diferenciado. Enquanto as matrizes SE (solo-tringita) e SCE (solo-cimento-tringita) apresentaram ganhos de resistência, esses incrementos foram bem mais discretos, apresentando valores muito mais próximos a resistência do solo puro, o que pode estar associado ao fato de que a etringita possui esmectita e vermiculita na sua composição mineralógica, interferindo nas reações de hidratação do cimento.
12. Os ensaios de resistência a tração por compressão diametral apresentaram redução dos valores de resistência em relação à resistência a compressão simples, o que já era esperado. O comportamento das matrizes seguiu o comportamento do ensaio de compressão, com as matrizes de solo-cimento com ganhos mais evidentes de resistência.
13. O uso da etringita não foi benéfico ao comportamento mecânico das misturas analisadas.
14. Como verificou-se no item 6. da conclusão, se tem a etringita reagindo com metais, sendo assim uma possibilidade pesquisa futura o estudo da aplicação desse material seria para fins de retenção de metais pesados em solos, concretos e argamassas.

REFERÊNCIAS

ABIKO, Alex Kenya. **Tecnologias apropriadas: tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. 1980. 155 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

AKULA, P; LITTLE, D.N. Mineralogical characterization and thermodynamic modeling of synthesized ettringite from Ca-Al-SO₄ suspensions. **Construction and Building Materials**. V. 269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121304>.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. *Cerâmica*, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002.

ALMEIDA, Daniel Jardim. **Estabilização de solo tropical argiloso com cimento e zeólito sintético como solução em pavimentação no Amazonas**. 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

ALMEIDA, G. B. O.; CARDOSO, J. G. F. G.; CASAGRANDE, M. D. T. **Análise de Estabilização Química de Solo Argiloso com Cimento pra Uso na Pavimentação**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas (COBRAMSEG), 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5741: **Cimento Portland - Coleta e preparação de amostras para ensaios**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 6457: **Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 6502: **Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 12023: **Solo-cimento – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12024: **Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12025: **Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12653: **Materiais pozolânicos - Especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 15087: **Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15895: **Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.

BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 61, n.6, p. 1012-1021, 2014. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461060018>

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Ltda, 5 ed., v. 1, 2000.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

BRADY, Nyle C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 7 ed., 1989.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução CONAMA Nº 430 de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Publicado no DOU em 16 maio 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa Brasil**. 5. ed. Brasília, 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União (D. O. U.), edição 85, seção 1, página 127.

BUDHU, Muni. **Soil mechanics and foundations**. New York, NY (EUA): JOHN WILEY & SONS, INC, 3ª ed, 2010.

BUENO, Eduardo Suliman. **Estudo de alguns fatores que podem afetar a durabilidade de misturas solo-cal**. 2011. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações – Fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Ltda, 6 ed., v. 1, 1988.

CHRISTOFOLETTI, S. R. MORENO, M. M. T. Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí - SP. **Cerâmica**, 63. 303 -310, 2017.

DA COSTA, Andressa Bianca. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento**. 2015. 75 f. Monografia (Graduação) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379

DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.511-518, 2002.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Cengage Learning, tradução da 7ª ed americana, 2011.

DELGADO, Anna Karina Chaves. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária.** 2007. 392 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT 414/2019 – ME: **Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físicoquímica de solo-cimento – Método de ensaio**, 2019.

FERREIRA, J. W. S.; GOMES, V. H.; CANCIAN, V. A.; ZANIN, R. F. B.; DE OLIVEIRA, A. D.; GONÇALVES, F.; BRANCO, C. J. M. C.; TEIXEIRA, R. S. **Aplicabilidade de solo arenoso compactado e melhorado com cimento em pavimentos flexíveis.** XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Geotecnia e Desenvolvimento Urbano (COBRAMSEG), 2018.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia Da Fração Argila E Estrutura De Latossolos Da Região Sudeste Do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 23, p. 507-514, 1999.

FERREIRA, B. C. S.; LIMA, R. M. F.; LEÃO, V. A. Remoção de sulfato de efluentes industriais por precipitação. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro , v. 16, n. 4, p. 361-368, 2011.

FRANÇA, Bruno Rangel. **Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo calcário do beneficiamento do mármore em blocos de encaixe de solo-cimento.** 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos Dos Goytacazes – RJ, 2017.

FREIRE, Wesley Jorge; BERALDO, Antonio Ludovico. **Tecnologias e materiais alternativos de construção.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

FREITAS, Jogério Evangelista De. **Uso de cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário.** 2018, 114f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil, BRASÍLIA – DF, 2018.

GARCIA, Dayana Cristina Silva. **Análise da microestrutura de pasta de cimento Portland com tratamento térmico por meio de segmentação de imagens e ensaio de ultra-**

microdureza. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, F.; DE SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, 2017, ed. 205, p. 5-14. doi: 10.4322/dae.2016.018

GONÇALVES, F.; ZANIN, R. F. B.; SOMERA, L. F.; DE OLIVEIRA, A. D.; FERREIRA, J. W. S.; BRANCO, C. J. M. C.; TEIXEIRA, R. S. **Caracterização Físico-Química e Mineralógica de Três Solos do Estado do Paraná**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Geotecnia e Desenvolvimento Urbano (COBRAMSEG), 2018.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 83-94, 2006.

GOULART, João Felipe Mendes. **Estudo comparativo da incorporação de lodo de anodização de alumínio e nanopartícula de óxido de alumínio aplicadas no concreto**. 2021. 75 f. Monografia (Graduação) - Universidade Do Sul De Santa Catarina, Tubarão, 2021.

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

GUIDELI, L. C.; PERES, C. V. R. ILDEFONSO, J. S.; LUKIANTCHUKI, J. A. **Avaliação do Comportamento de Misturas Alternativas de Solo, Cimento e Pó de Pedra para Aplicação em Pavimentação**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, COBRAMSEG 2018.

GUTIERREZ, Nelcí Helena Maia. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná**. 2005. 311 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2005.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.7.3, p. 185 –191, 2012.

LADEIRA, Aléxia Trípodí. **Avaliação da estabilização química de solo com cimento e etringita por meio do método de dosagem físico-químico**. 2021. 59 f. Monografia (Graduação) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

LADEIRA, A. T.; SANDOLI, M. A. M.; LUKIANTCHUKI, J. A.; OLIVEIRA, J. R.; ILDEFONSO, J. S. **Caracterização física, química e mineralógica de solos típicos do Noroeste do Paraná para fins de aplicação prática em obras geotécnicas**. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL, 2019

LE-COMPTOIR-GEOLOGIQUE. Disponível em: < <https://www.le-comptoir-geologique.com/ettringite-encyclopedia.html>> Acesso: 10 mar. 2021.

LIMA, G. L.; SILVA, K. S. O; COELHO, P. B.; SILVA JUNIOR, A. C. **Influência da Granulometria no Comportamento de Solos Tropicais Compactados**. In: GEOCENTRO 2019, Brasília/DF, Brasil.

LUKIANCHUKI, J. A.; OLIVEIRA, J. R. M. S.; ALMEIDA, M. S. S.; SILVA, T. B.; GUIDELI, L. C. **Construction and demolition waste (CDW) used in reinforced soil mixtures for pavement applications**. In: XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ECSMGE, 2019.

LUZ, A. B. (Ed.); LINS, F. A. F. (Ed). **Rochas & minerais Industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2ª ed., 2008. 990p.

MACÊDO, Mirtes Maria de. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. 2004. 289 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MANFROI, Eliz Paula. **Desenvolvimento de aglomerantes ecoeficientes com encapsulamento de metais pesados**. 2014. 305 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MARÍN, Eduardo José Bittar. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal**. 2017. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MATTOS, Phelipe Marconi Freitas. **Durabilidade do betão auto-compactável de elevado desempenho face ao ataque químico**. 2017. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2017. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/56601/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_30445_Phelipe%2BMattos.pdf> Acesso: 20 fev 2021.

MENEGHESSO, Adeval Antônio. **Noções Básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas Ligas – Parte 14. Artigo Técnico, C & P, edição 29, 2009**. Disponível em:<<http://www.italteco.com.br/imagens/artigos-tec-aba/parte-14/edicao-29.pdf>> Acesso: 20 set 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais- 3ª Edição**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, Sandra Kurotus de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; WILLIS, J.A. & ROSA, D.P. 2006. Compactação de diferentes solos pelo ensaio de Proctor. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16, Aracaju, 2006, Resumos... Aracaju: SBCS, 2006. Disponível em:<https://www.researchgate.net/profile/Dalvan-Reinert/publication/268258563_Compactacao_de_diferentes_solos_pelo_ensaio_de_Proctor/links/54ddf18b0cf22a26721d638d/Compactacao-de-diferentes-solos-pelo-ensaio-de-Proctor.pdf> Acesso: 10 out 2021.

MIGUEL, Gustavo Dias. **Desempenho e Comportamento Mecânico de Um Solo Dispersivo e Sulfatado Tratado com uma Pozolana Artificial, Cal de Carbureto e Reforçado com Fibras de Vidro**. 2020. 282 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MOLKE, Ariane Soares. **Remoção de sulfato a partir de efluente industrial, por meio de precipitação química**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2019.

MORETI, Geraldo Vanzolni. **Comportamento à compressão de solo estabilizado com cimento utilizado em colunas de deep soil mixing**. 2012. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MOUSAVI, Seyed Esmail. Utilization of Silica Fume to Maximize the Filler and Pozzolanic Effects of Stabilized Soil with Cement. **Geotech. Geol. Eng.** V.36, p. 77–87, 2018.

MURRAY, Haydn H. **Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite- Sepiolite, and Common Clays**. Amsterdam: Elsevier, v. 2, p. 180, 2007.

NASCIMENTO, Gerson Flôres. **Construção e mapeamento de índice de qualidade de águas subterrâneas em Porto Velho**. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Belém, 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2ª ed., 2013.

NUERNBERG, Natassia Bratti da Silva. **Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros a partir da cinza de casca de arroz e do lodo de anodização de alumínio**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2018.

OJEDA FARÍAS, O. F.; BALTAZAR ZAMORA, M. ÁNGEL; MENDOZA RANGEL, J. M. Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 2, p. 194-208, 30 Apr. 2018.

OLIVEIRA, Andressa de. **Resistência e compressibilidade de solo argiloso tropical residual evoluído de basalto**. 2019. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

OLIVEIRA, Terezinha Ferreira de. **Análises das incertezas da quantificação de fase pelo método de Rietveld em análise de pó por difração de raios X**. 2005. 161 f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OUHADI, V. R.; YONG, R. N. Ettringite formation and behaviour in clayey soils. **Applied Clay Science**, n. 42, p.258–265, 2008.

PADOIN, Eduardo Búriço. **Estudo do resíduo gerado por ETE do processo de anodização do alumínio em cerâmica vermelha**. 2011. 83 f. Monografia (Graduação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2011.

PAULON, V. A. **A Microestrutura do Concreto Convencional**. In: **ISAIA, G. C. Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. V. 1, 2005. Cap. 19, p. p. 583-604.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. **Revista Concreto & Construções**, n. 53, São Paulo, 2009.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

PEREIRA, Sibely Vargas. **Avaliação de método de reutilização do resíduo do processo de anodização**. 2008. 40 f. Relatório de Estágio Supervisionado (Graduação) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2008.

PERKINS, R. B.; PALMER, C. D. Solubility of ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)^3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) at 5–75°C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 63, n. 13/14, p. 1969–1980, 1999.

PINA, P. S.; DE SOUZA, A. D.; RUTKOWSKI, E. S.; DE MAGALHÃES, J. A. **Avaliação de tecnologias para remoção de sulfato presente em efluente da Votorantim Metais Zinco Três Marias**. In :XXIV Encontro Nacional de tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME) - Salvador, 2011.

PIZONI, Bianca Bussolo. **Estabilização de um solo colúvio aluvionar com cimento e lodo de esgoto calcinado para aplicação em camadas de pavimento**. 2019. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, 2019.

PUPPALA, A. J.; INTHARASOMBAT, N.; VEMPATI, R. K. Experimental Studies on Ettringite-Induced Heaving in Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 3, p. 325-337, 2005.

PUPPALA, A.J.; TALLURI, N.; CONGRESS, S.S.C; GAILY, A. Ettringite induced heaving in stabilized high sulfate soils. **Innov. Infrastruct. Solut.** v. 3, n. 72, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0179-7>

RESCHETTI JUNIOR, Paulo Roberto. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentos**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2008.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Matéria (Rio J)**, Rio de Janeiro, v. 22, n.4, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000400418&lng=en&nrm=iso>. Acesso: 15 Mar. 2020

ROHLFES JUNIOR, José Antônio. **Estudo do comportamento de um solo residual melhorado através de técnicas mecânicas e físico-químicas e sua aplicação à análise de fundações superficiais**. 1996. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1996.

SALES, A. W.; RIBEIRO, D. D.; NERY, K. D. **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação**. 2017. 91 f. Monografia (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2017.

SALOMÃO, P. E. A.; SILVA, B. A.; BARBOSA, F. A. Chemical stabilization of franco texture soil: addition of lime and cement. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 8, n. 5, p. e50851019, 2019.

SANTOS, A. P. S. **Comportamento de mistura solo-cimento-fibra sob pressão confinada com medição de tensão lateral**. 2004. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SANTOS, G. M. R.; SYLLOS, R. S.; BENATTI, C. T. Estudo da precipitação química para remoção de sulfato de efluente de anodização. In: Encontro Anual de Iniciação Científica da UEM, 28., 2019, Maringá. Anais eletrônicos...Maringá: UEM, 2019. p.36. Disponível em: <<http://www.eaic.uem.br/eaic2019/anais/artigos/3442.pdf>> Acesso: 20 out. 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 3 ed., 2013.

SARTOR, Morgana Nuernberg. **Utilização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos**. 2006. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SENÇO, Wíastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1ª ed, v. 2, 2001.

SENÇO, Wíastermiler. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 2ª ed, v. 1, 2007.

SENFF, L.; FOLGUERAS, M. V.; HOTZA, D. **Hidratação do Cimento CP V ARI – RS: Influência da água nas reações de hidratação**. In: 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro – SP, 2005.

SILVA, A. M. S.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; CARVALHO, J. C.; MARINHO FILHO, P. G. T. Estudo de parâmetros de compactação de solo para uso em pavimentos rodoviários. Revista **TRANSPORTES**, v. 24, n. 4, p. 95-103, 2016.

SILVA, Fábio Cesar da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2 ed., 2009.

SILVA, F. M.; CHAVES, M. S.; LIMA, Z. M. C. **Geografia Física II**. Natal, RN: EDUFRN, 2009.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. **Estudo do comportamento do concreto de cimento portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, Matheus Francisco da. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, M. J.; PUTON, E. F.; BECKER, F. L.; STOLF, D. O. Adição de cimento ao solo da região de chapecó – sc para estabilização do subleito na pavimentação. **Anais da Engenharia Civil**, v. 1, n. 1, p. 1 - 23, apr. 2018. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGCIVIL/article/view/146>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

SILVA, S. B. **Análise de solos para ciências agrárias**. Universidade Federal Rural da Amazônia. 2ª edição. Edufra. Belém, 2018.

SOUZA, Juliana Maria de. **Análise experimental da estabilização de um solo argiloso através da incorporação de cimento Portland, resíduo de construção civil (RCC) e resíduo de pó de pedra**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.

SOUZA, Marcia Ikarugi Bomfim de. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento**. 2006. 117 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2006.

SPRICIGO, Luís Philipe. **Valorização de resíduos de vidro plano e de anodização de alumínio para síntese de geopolímero**. 2017. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, SC, 2017.

STEPHAN WOLFSRIED. Imagem Etringita (Copyright © Stephan Wolfsried 09/2006). Disponível em: <<https://www.mindat.org/photo-74372.html>>. Acesso: 10 mar. 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for drinking-water quality**. Genebra, 2008. Disponível em: <https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf>. Acesso: 20 jan. 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Editores técnicos). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 3ª ed. Revista e ampliada, 2017.

TEODORO, L.; PARABOCZ, C. R. B.; ROCHA, R. D. C. Caracterização da argila vermiculita expandida: avaliação dos padrões físico-químicos e mineralógicos para aplicação como adsorvente. **Matéria (Rio de Janeiro) [online]**, v. 25, n. 04, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1151>

TERRA EM TRANSFORMAÇÃO (Blog). Constituição dos solos, 2009. Disponível em:<<http://terratransformacao.blogspot.com/2009/09/constituicao-dos-solos.html>>. Acesso: 20 mar. 2021.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. New York, NY (EUA): JOHN WILEY & SONS, INC, 3^a ed, 1996.

WINNEFELD, F.; ZINGG, A.; HOLZER, L.; PAKUSCH, J.; BECKER, S. **Ettringite-superplasticizer interaction and its impact on the ettringite distribution in cement suspensions**. In: Ninth ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Sevilla, Spain, 2009.

WOOLTORTON, F. L. D. Engineering Pedology and Soil Stabilization. **Highway Research Board**, Washington, v. 107, p. 29-57, 1955.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050. Paris, 2010.

ANEXO A

LAUDO DA AGRISOLUM



AgriSolum
ANÁLISES LABORATORIAIS

Avenida Dr. Mario Cláudio Urbinatti, 1181 | Jardim Canaleta
CEP 87.040-120 | Maringá - PR | Tel: (41)322-9585
E-mail: contato@agrisolum.com.br | www.agrisolum.com.br

CHAVE DE ACESSO
1fcbf99aa1

SOLICITANTE	ANGÉLICA VINCI DO N. G. RIOS	N.º AMOSTRA	1813	N.º DO LAUDO	1128/2021
PROPRIETÁRIO	ANGÉLICA VINCI DO NASCIMENTO GIMENES RIOS				
PROPRIEDADE	MANDAGUAÇU - UEM				
MUNICÍPIO / UF	Mandaguçu - PR	DATA ENTRADA	12/05/2021	DATA SAÍDA	18/05/2021
MATRÍCULA		ÁREA	0 ha		
DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	Amostra 1	PROFUNDIDADE	170 - 200		

ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	RESULTADO	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
pH em CaCl ₂	3,80					
pH em H ₂ O	4,20					
C (g dm ⁻³)	2,01					
MO (%)	0,35					

ATRIBUTOS QUÍMICOS

DETERMINAÇÃO	cmol dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
SB	0,14					
CTC	3,59					
CTC efetiva	1,12					
Acidez Potencial (H + Al)	3,45					
Acidez Não Trocável (H)	2,47					
Acidez Trocável (Al ³⁺)	0,98					

MACRONUTRIENTES

ELEMENTOS	cmol dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Cálcio (Ca ²⁺)	0,10					
Magnésio (Mg ²⁺)	0,03					
Potássio (K ⁺)	0,01					
	mg dm ⁻³					
Fósforo (P)	0,68					
Enxofre (S)	ns					

ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Ca %	2,79
Mg %	0,84
K %	0,28
H %	68,80
Al %	87,50
P %	3,90



LEGENDA

- SOLA (IDEAL)
- LIMITE DE SUFICIÊNCIA
- INSUBSTITUÍVEL
- EXCESSIVO

MICRONUTRIENTES

ELEMENTOS	mg dm ⁻³	NÍVEL DE SUFICIÊNCIA				
		MB	B	M	A	MA
Boro (B)	ns					
Cobre (Cu)	1,08					
Ferro (Fe)	50,34					
Manganês (Mn)	8,56					
Zinco (Zn)	1,62					

FÓSFORO REMANESCENTE E NÍVEL CRÍTICO

mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
ns	ns	ns	ns
P-rem	P-árido	Enxofre	Zinco

ASSINATURA



Eng. Agr. Sílvio Lopes de Souza
Responsável Técnico

OBSERVAÇÃO

MB= Muito Baixo; B= Baixo; M= Médio; A= Alto e MA= Muito Alto.
 - Determinações Analíticas: Mehlich I K, P, Cu, Fe, Mn e Zn; KCl 1 M: Al, Ca e Mg; SMP: H + Al; Água quente: B, Fosfato de Cálcio Monobásico; S, Walkley-Black; C. - Os valores analíticos referem-se a amostra disponibilizada pelo interessado.



APÊNDICE A

Tabela A.1 – Dados da moldagem para a matriz solo puro.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	GC (%)	Δw
17/dez	CP 6	7 dias	24/dez	421,13	9,97	11,83%	195,83	2,151	1,923	100,00%	-0,23%
17/dez	CP 7	7 dias	24/dez	421,31	9,97	11,38%	195,83	2,151	1,932	100,45%	0,22%
17/dez	CP 8	7 dias	24/dez	420,63	9,97	11,68%	195,76	2,149	1,924	100,05%	-0,08%
17/dez	CP 9	7 dias	24/dez	421,13	9,96	11,35%	195,63	2,153	1,933	100,53%	0,25%
17/dez	CP 10	7 dias	24/dez	421,44	9,98	11,69%	195,89	2,151	1,926	100,17%	-0,09%
17/dez	CP 11	7 dias	24/dez	421,35	9,96	11,46%	195,56	2,155	1,933	100,52%	0,14%
17/dez	CP 12	7 dias	24/dez	420,62	9,96	11,63%	195,56	2,151	1,927	100,19%	-0,03%
17/dez	CP 13	7 dias	24/dez	422,17	10,01	11,57%	196,48	2,149	1,926	100,15%	0,03%
17/dez	CP 14	7 dias	24/dez	422,15	10,01	11,55%	196,48	2,149	1,926	100,16%	0,05%
17/dez	CP 15	7 dias	24/dez	422,02	10,01	11,46%	196,48	2,148	1,927	100,21%	0,14%
Média ρ_d		1,928 g/cm ³		DV(%)		0,35	CV(%)		0,18		

Fonte: Autora (2022).

Tabela A.2 – Dados da moldagem para a matriz SC5%.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	GC (%)	Δw
20/dez	CP 21	14 dias	03/jan	423,58	9,96	11,81%	195,63	2,165	1,937	100,24%	0,27%
20/dez	CP 22	14 dias	03/jan	424,72	9,98	11,91%	195,89	2,168	1,937	100,28%	0,17%
20/dez	CP 23	14 dias	03/jan	426,32	10,02	11,76%	196,68	2,168	1,939	100,39%	0,32%
20/dez	CP 24	14 dias	03/jan	425,05	10,00	11,89%	196,35	2,165	1,935	100,14%	0,19%
20/dez	CP 25	14 dias	03/jan	425,11	10,00	11,87%	196,28	2,166	1,936	100,21%	0,21%
20/dez	CP 26	14 dias	03/jan	425,50	10,00	11,86%	196,41	2,166	1,937	100,24%	0,22%
20/dez	CP 27	14 dias	03/jan	425,00	10,00	11,53%	196,28	2,165	1,941	100,49%	0,55%
20/dez	CP 28	14 dias	03/jan	424,68	9,98	11,85%	195,89	2,168	1,938	100,33%	0,23%
20/dez	CP 29	14 dias	03/jan	425,21	10,00	11,74%	196,41	2,165	1,937	100,28%	0,34%
21/dez	CP 30	14 dias	04/jan	425,41	10,01	11,79%	196,48	2,165	1,937	100,25%	0,29%
21/dez	CP 31	7 dias	28/dez	424,89	9,98	11,77%	196,02	2,168	1,939	100,38%	0,31%
21/dez	CP 32	7 dias	28/dez	424,82	9,99	11,79%	196,09	2,166	1,938	100,31%	0,29%
21/dez	CP 33	7 dias	28/dez	425,00	10,00	11,91%	196,28	2,165	1,935	100,14%	0,17%
21/dez	CP 34	7 dias	28/dez	424,44	9,98	11,74%	195,89	2,167	1,939	100,37%	0,34%
21/dez	CP 35	7 dias	28/dez	424,90	9,98	11,72%	196,02	2,168	1,940	100,42%	0,36%
24/dez	CP 36	7 dias	31/dez	424,77	9,98	12,03%	195,89	2,168	1,936	100,18%	0,05%
24/dez	CP 37	7 dias	31/dez	424,82	9,99	11,68%	196,09	2,166	1,940	100,41%	0,40%
24/dez	CP 38	7 dias	31/dez	428,13	10,06	11,57%	197,46	2,168	1,943	100,59%	0,51%
24/dez	CP 39	7 dias	31/dez	428,05	10,05	11,60%	197,40	2,168	1,943	100,58%	0,48%
24/dez	CP 40	7 dias	31/dez	427,16	10,04	11,74%	197,07	2,168	1,940	100,41%	0,34%
20/jan	CP 41	3 dias	23/jan	427,48	10,04	11,82%	197,07	2,169	1,940	100,41%	0,26%
20/jan	CP 42	3 dias	23/jan	425,67	10,01	12,03%	196,48	2,166	1,934	100,10%	0,05%
20/jan	CP 43	3 dias	23/jan	426,63	10,03	12,12%	196,87	2,167	1,933	100,04%	-0,04%
20/jan	CP 44	3 dias	23/jan	425,33	10,01	12,10%	196,55	2,164	1,930	99,92%	-0,02%
20/jan	CP 45	3 dias	23/jan	428,33	10,06	12,08%	197,46	2,169	1,935	100,17%	0,00%
20/jan	CP 46	3 dias	23/jan	428,41	10,06	12,05%	197,46	2,170	1,936	100,22%	0,03%
20/jan	CP 47	3 dias	23/jan	424,06	9,98	11,85%	196,02	2,163	1,934	100,11%	0,23%
20/jan	CP 48	3 dias	23/jan	424,33	9,98	11,90%	196,02	2,165	1,934	100,13%	0,18%
20/jan	CP 49	3 dias	23/jan	424,04	9,98	11,94%	195,89	2,165	1,934	100,09%	0,14%
20/jan	CP 50	3 dias	23/jan	424,50	9,98	11,48%	195,96	2,166	1,943	100,58%	0,60%
Média ρ_a		1,934 g/cm ³		DV(%)		0,31		CV(%)		0,16	

Fonte: Autora (2022).

Tabela A.3 – Dados da moldagem para a matriz SC6%.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	GC (%)	Δw
29/dez	CP 51	14 dias	12/jan	424,55	10,01	11,83%	195,83	2,151	1,923	100,00%	-0,23%
29/dez	CP 52	14 dias	12/jan	424,83	10,01	11,38%	195,83	2,151	1,932	100,45%	0,22%
29/dez	CP 53	14 dias	12/jan	424,43	10,01	11,68%	195,76	2,149	1,924	100,05%	-0,08%
29/dez	CP 54	14 dias	12/jan	424,92	10,02	11,35%	195,63	2,153	1,933	100,53%	0,25%
29/dez	CP 55	14 dias	12/jan	425,83	10,04	11,69%	195,89	2,151	1,926	100,17%	-0,09%
29/dez	CP 56	14 dias	12/jan	423,47	9,99	11,46%	195,56	2,155	1,933	100,52%	0,14%
29/dez	CP 57	14 dias	12/jan	425,27	10,03	11,63%	195,56	2,151	1,927	100,19%	-0,03%
29/dez	CP 58	14 dias	12/jan	425,94	10,04	11,57%	196,48	2,149	1,926	100,15%	0,03%
29/dez	CP 59	14 dias	12/jan	425,78	10,03	11,55%	196,48	2,149	1,926	100,16%	0,05%
29/dez	CP 60	14 dias	12/jan	423,90	9,99	11,46%	196,48	2,148	1,927	100,21%	0,14%
27/dez	CP 61	7 dias	03/jan	425,92	10,04	11,58%	196,48	2,161	1,937	100,65%	0,67%
27/dez	CP 62	7 dias	03/jan	424,51	10,01	11,61%	196,61	2,161	1,936	100,62%	0,64%
27/dez	CP 63	7 dias	03/jan	424,34	10,01	11,56%	196,55	2,159	1,936	100,60%	0,69%
27/dez	CP 64	7 dias	03/jan	425,49	10,03	11,75%	196,68	2,160	1,933	100,48%	0,50%
27/dez	CP 65	7 dias	03/jan	424,58	10,00	11,63%	197,07	2,161	1,936	100,61%	0,62%
27/dez	CP 66	7 dias	03/jan	425,77	10,03	11,95%	196,15	2,159	1,928	100,23%	0,30%
27/dez	CP 67	7 dias	03/jan	425,29	10,02	11,76%	196,94	2,159	1,932	100,42%	0,49%
27/dez	CP 68	7 dias	03/jan	425,88	10,04	11,80%	197,20	2,160	1,932	100,41%	0,45%
27/dez	CP 69	7 dias	03/jan	425,64	10,03	11,73%	197,00	2,161	1,934	100,54%	0,52%
27/dez	CP 70	7 dias	03/jan	425,89	10,04	11,69%	196,09	2,162	1,935	100,59%	0,56%
22/jan	CP 71	3 dias	25/jan	424,20	10,01	11,57%	197,07	2,161	1,937	100,69%	0,68%
22/jan	CP 72	3 dias	25/jan	423,40	9,99	11,59%	196,48	2,161	1,936	100,64%	0,66%
22/jan	CP 73	3 dias	25/jan	425,84	10,03	11,58%	196,48	2,160	1,936	100,60%	0,67%
22/jan	CP 74	3 dias	25/jan	425,39	10,02	11,61%	196,87	2,161	1,936	100,64%	0,64%
22/jan	CP 75	3 dias	25/jan	426,19	10,05	11,86%	196,41	2,162	1,932	100,44%	0,39%
22/jan	CP 76	3 dias	25/jan	424,25	10,01	11,83%	196,94	2,162	1,933	100,48%	0,42%
22/jan	CP 77	3 dias	25/jan	423,00	9,98	11,90%	196,68	2,162	1,932	100,44%	0,35%
22/jan	CP 78	3 dias	25/jan	423,89	9,99	11,74%	197,07	2,161	1,934	100,52%	0,51%
22/jan	CP 79	3 dias	25/jan	423,35	9,98	11,60%	197,00	2,161	1,936	100,62%	0,65%
22/jan	CP 80	3 dias	25/jan	423,52	9,99	11,50%	197,07	2,161	1,938	100,74%	0,75%
Média ρ_a		1,934 g/cm ³		DV(%)		0,31		CV(%)		0,16	

Fonte: Autora (2022).

Tabela A.4 – Dados da moldagem para a matriz SE5%.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	GC (%)	Δw
30/dez	CP 81	14 dias	13/jan	427,64	10,02	11,24%	196,81	2,173	1,953	100,17%	0,16%
30/dez	CP 82	14 dias	13/jan	428,12	10,04	11,26%	197,07	2,172	1,953	100,13%	0,14%
30/dez	CP 83	14 dias	13/jan	425,88	9,98	11,23%	196,02	2,173	1,953	100,17%	0,17%
30/dez	CP 84	14 dias	13/jan	426,42	10,00	11,32%	196,35	2,172	1,951	100,05%	0,08%
30/dez	CP 85	14 dias	13/jan	426,88	10,01	11,28%	196,48	2,173	1,952	100,13%	0,12%
30/dez	CP 86	14 dias	13/jan	427,37	10,02	11,26%	196,68	2,173	1,953	100,16%	0,14%
30/dez	CP 87	14 dias	13/jan	428,63	10,03	11,12%	197,00	2,176	1,958	100,41%	0,28%
31/dez	CP 88	14 dias	14/jan	427,22	10,02	11,27%	196,68	2,172	1,952	100,11%	0,13%
31/dez	CP 89	14 dias	14/jan	427,53	10,02	11,15%	196,74	2,173	1,955	100,26%	0,25%
31/dez	CP 90	14 dias	14/jan	427,02	10,01	11,16%	196,61	2,172	1,954	100,20%	0,24%
31/dez	CP 91	7 dias	07/jan	426,87	10,01	11,16%	196,48	2,173	1,954	100,23%	0,24%
31/dez	CP 92	7 dias	07/jan	424,28	9,97	11,35%	195,83	2,167	1,946	99,78%	0,05%
31/dez	CP 93	7 dias	07/jan	426,36	10,00	11,17%	196,28	2,172	1,954	100,20%	0,23%
31/dez	CP 94	7 dias	07/jan	427,65	10,01	11,29%	196,61	2,175	1,954	100,23%	0,11%
31/dez	CP 95	7 dias	07/jan	427,43	10,01	11,26%	196,55	2,175	1,955	100,23%	0,14%
31/dez	CP 96	7 dias	07/jan	427,78	10,02	11,27%	196,68	2,175	1,955	100,24%	0,13%
31/dez	CP 97	7 dias	07/jan	427,91	10,02	11,27%	196,81	2,174	1,954	100,21%	0,13%
31/dez	CP 98	7 dias	07/jan	424,98	9,98	11,30%	195,96	2,169	1,949	99,93%	0,10%
31/dez	CP 99	7 dias	07/jan	424,84	9,97	11,33%	195,83	2,169	1,949	99,94%	0,07%
31/dez	CP 100	7 dias	07/jan	427,72	10,02	11,40%	196,81	2,173	1,951	100,04%	0,00%
22/jan	CP 101	3 dias	25/jan	423,44	9,95	11,54%	195,30	2,168	1,944	99,69%	-0,14%
22/jan	CP 102	3 dias	25/jan	425,78	9,98	11,51%	196,02	2,172	1,948	99,90%	-0,11%
22/jan	CP 103	3 dias	25/jan	426,53	10,00	11,53%	196,35	2,172	1,948	99,88%	-0,13%
22/jan	CP 104	3 dias	25/jan	426,15	10,00	11,26%	196,28	2,171	1,951	100,07%	0,14%
22/jan	CP 105	3 dias	25/jan	426,18	10,00	11,47%	196,28	2,171	1,948	99,89%	-0,07%
22/jan	CP 106	3 dias	25/jan	426,93	10,01	11,55%	196,48	2,173	1,948	99,90%	-0,15%
22/jan	CP 107	3 dias	25/jan	424,38	9,97	11,19%	195,83	2,167	1,949	99,95%	0,21%
22/jan	CP 108	3 dias	25/jan	425,96	10,01	11,41%	196,48	2,168	1,946	99,79%	-0,01%
22/jan	CP 109	3 dias	25/jan	425,12	9,98	11,18%	195,96	2,169	1,951	100,06%	0,22%
22/jan	CP 110	3 dias	25/jan	425,63	9,98	11,49%	195,96	2,172	1,948	99,90%	-0,09%
Média ρ_a		1,951 g/cm ³		DV(%)		0,33		CV(%)		0,17	

Fonte: Autora (2022).

Tabela A.5 – Dados da moldagem para a matriz SE6%.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	GC (%)	Δw
04/jan	CP 111	14 dias	18/jan	425,40	10,00	10,99%	196,28	2,167	1,953	100,14%	0,11%
04/jan	CP 112	14 dias	18/jan	423,68	9,95	11,11%	195,30	2,169	1,952	100,12%	-0,01%
04/jan	CP 113	14 dias	18/jan	422,60	9,94	11,07%	195,11	2,166	1,950	100,01%	0,03%
04/jan	CP 114	14 dias	18/jan	427,07	10,04	10,92%	197,07	2,167	1,954	100,20%	0,18%
04/jan	CP 115	14 dias	18/jan	424,02	9,98	11,03%	195,89	2,165	1,949	99,97%	0,07%
04/jan	CP 116	14 dias	18/jan	427,38	10,03	10,99%	196,87	2,171	1,956	100,31%	0,11%
04/jan	CP 117	14 dias	18/jan	423,11	9,95	11,10%	195,30	2,166	1,950	100,00%	0,00%
04/jan	CP 118	14 dias	18/jan	424,41	9,96	10,88%	195,63	2,169	1,957	100,34%	0,22%
04/jan	CP 119	14 dias	18/jan	425,67	10,00	10,93%	196,28	2,169	1,955	100,25%	0,17%
04/jan	CP 120	14 dias	18/jan	425,54	10,00	11,00%	196,35	2,167	1,952	100,13%	0,10%
18/jan	CP 121	7 dias	25/jan	425,72	10,01	11,04%	196,48	2,167	1,951	100,06%	0,06%
18/jan	CP 122	7 dias	25/jan	426,10	10,01	11,07%	196,61	2,167	1,951	100,06%	0,03%
18/jan	CP 123	7 dias	25/jan	426,22	10,02	10,98%	196,68	2,167	1,953	100,14%	0,12%
18/jan	CP 124	7 dias	25/jan	427,00	10,02	11,10%	196,81	2,170	1,953	100,14%	0,00%
18/jan	CP 125	7 dias	25/jan	424,84	9,97	10,95%	195,70	2,171	1,957	100,34%	0,15%
18/jan	CP 126	7 dias	25/jan	425,23	10,00	10,96%	196,35	2,166	1,952	100,09%	0,14%
18/jan	CP 127	7 dias	25/jan	425,79	10,01	10,89%	196,48	2,167	1,954	100,22%	0,21%
18/jan	CP 128	7 dias	25/jan	424,47	9,95	11,09%	195,43	2,172	1,955	100,26%	0,01%
18/jan	CP 129	7 dias	25/jan	427,12	10,03	11,14%	196,87	2,170	1,952	100,11%	-0,04%
18/jan	CP 130	7 dias	25/jan	424,65	9,97	11,10%	195,70	2,170	1,953	100,16%	0,00%
23/jan	CP 131	3 dias	26/jan	423,60	9,96	11,15%	195,50	2,167	1,949	99,97%	-0,05%
23/jan	CP 132	3 dias	26/jan	427,56	10,03	11,15%	196,87	2,172	1,954	100,20%	-0,05%
23/jan	CP 133	3 dias	26/jan	425,34	10,00	11,14%	196,28	2,167	1,950	99,99%	-0,04%
23/jan	CP 134	3 dias	26/jan	426,08	10,01	11,07%	196,48	2,169	1,952	100,12%	0,03%
23/jan	CP 135	3 dias	26/jan	425,48	10,00	11,10%	196,35	2,167	1,950	100,02%	0,00%
23/jan	CP 136	3 dias	26/jan	425,30	10,00	11,08%	196,28	2,167	1,951	100,03%	0,02%
23/jan	CP 137	3 dias	26/jan	425,14	10,00	11,18%	196,28	2,166	1,948	99,90%	-0,08%
23/jan	CP 138	3 dias	26/jan	424,91	9,97	11,17%	195,83	2,170	1,952	100,09%	-0,07%
23/jan	CP 139	3 dias	26/jan	425,67	10,01	10,98%	196,48	2,166	1,952	100,11%	0,12%
23/jan	CP 140	3 dias	26/jan	425,18	10,00	11,12%	196,35	2,165	1,949	99,93%	-0,02%
Média ρ_a		1,952 g/cm ³		DV(%)		0,22		CV(%)		0,11	

Fonte: Autora (2022).

Tabela A.6 – Dados da moldagem para a matriz SCE10%.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	GC (%)	Δw
11/jan	CP 141	14 dias	25/jan	426,94	9,96	11,64%	195,56	2,183	1,956	100,29%	0,16%
11/jan	CP 142	14 dias	25/jan	427,01	9,99	11,59%	196,22	2,176	1,950	100,01%	0,21%
11/jan	CP 143	14 dias	25/jan	428,49	10,01	11,66%	196,48	2,181	1,953	100,16%	0,14%
11/jan	CP 144	14 dias	25/jan	429,65	10,02	11,54%	196,74	2,184	1,958	100,41%	0,26%
11/jan	CP 145	14 dias	25/jan	428,05	10,00	11,57%	196,28	2,181	1,955	100,24%	0,23%
12/jan	CP 146	14 dias	26/jan	428,10	10,00	11,74%	196,28	2,181	1,952	100,10%	0,06%
12/jan	CP 147	14 dias	26/jan	427,83	9,99	11,77%	196,09	2,182	1,952	100,11%	0,03%
12/jan	CP 148	14 dias	26/jan	427,08	9,98	11,57%	195,89	2,180	1,954	100,21%	0,23%
12/jan	CP 149	14 dias	26/jan	427,87	9,99	11,62%	196,09	2,182	1,955	100,25%	0,18%
12/jan	CP 150	14 dias	26/jan	427,76	9,99	11,53%	196,09	2,181	1,956	100,31%	0,27%
17/jan	CP 151	7 dias	24/jan	427,90	9,99	11,82%	196,22	2,181	1,950	100,01%	-0,02%
17/jan	CP 152	7 dias	24/jan	428,21	10,01	11,74%	196,48	2,179	1,950	100,02%	0,06%
17/jan	CP 153	7 dias	24/jan	425,53	9,94	11,77%	195,17	2,180	1,951	100,03%	0,03%
17/jan	CP 154	7 dias	24/jan	426,50	9,96	11,59%	195,50	2,182	1,955	100,26%	0,21%
17/jan	CP 155	7 dias	24/jan	428,16	10,00	11,41%	196,35	2,181	1,957	100,38%	0,39%
17/jan	CP 156	7 dias	24/jan	428,08	10,00	11,94%	196,41	2,179	1,947	99,85%	-0,14%
17/jan	CP 157	7 dias	24/jan	427,36	9,98	11,82%	195,96	2,181	1,950	100,02%	-0,02%
17/jan	CP 158	7 dias	24/jan	427,80	9,98	11,73%	196,02	2,182	1,953	100,17%	0,07%
17/jan	CP 159	7 dias	24/jan	428,60	10,01	11,58%	196,48	2,181	1,955	100,25%	0,22%
17/jan	CP 160	7 dias	24/jan	428,73	10,01	11,64%	196,61	2,181	1,953	100,17%	0,16%
24/jan	CP 161	3 dias	27/jan	426,12	9,96	11,68%	195,56	2,179	1,951	100,05%	0,12%
24/jan	CP 162	3 dias	27/jan	428,76	10,01	11,61%	196,48	2,182	1,955	100,27%	0,19%
24/jan	CP 163	3 dias	27/jan	427,49	9,98	11,73%	196,02	2,181	1,952	100,10%	0,07%
24/jan	CP 164	3 dias	27/jan	427,00	9,98	11,68%	195,89	2,180	1,952	100,10%	0,12%
24/jan	CP 165	3 dias	27/jan	427,98	9,99	11,79%	196,09	2,183	1,952	100,12%	0,01%
24/jan	CP 166	3 dias	27/jan	428,06	10,00	11,50%	196,35	2,180	1,955	100,27%	0,30%
24/jan	CP 167	3 dias	27/jan	428,09	10,00	11,56%	196,35	2,180	1,954	100,22%	0,24%
24/jan	CP 168	3 dias	27/jan	427,08	9,98	11,78%	196,02	2,179	1,949	99,96%	0,02%
24/jan	CP 169	3 dias	27/jan	428,76	10,00	11,53%	196,28	2,184	1,959	100,44%	0,27%
24/jan	CP 170	3 dias	27/jan	428,15	10,00	11,79%	196,35	2,181	1,951	100,03%	0,01%
Média ρ_a		1,953 g/cm ³		DV(%)		0,27		CV(%)		0,14	

Fonte: Autora (2022).

Tabela A.7 – Dados da moldagem para a matriz SCE12%.

DATA	CP	Tempo de cura (dias)	DATA (rup.)	M (g)	h (cm)	W (%)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_a (g/cm ³)	GC (%)	Δw
13/jan	CP 171	14 dias	27/jan	426,10	9,99	11,18%	196,22	2,172	1,953	99,91%	0,02%
13/jan	CP 172	14 dias	27/jan	425,06	9,98	11,07%	195,89	2,170	1,954	99,93%	0,13%
13/jan	CP 173	14 dias	27/jan	428,00	10,03	11,12%	197,00	2,173	1,955	100,01%	0,08%
13/jan	CP 174	14 dias	27/jan	426,77	10,00	11,00%	196,35	2,174	1,958	100,16%	0,20%
13/jan	CP 175	14 dias	27/jan	426,43	10,00	11,10%	196,28	2,173	1,955	100,02%	0,10%
13/jan	CP 176	14 dias	27/jan	426,05	9,99	11,16%	196,09	2,173	1,955	99,98%	0,04%
13/jan	CP 177	14 dias	27/jan	427,01	10,01	11,02%	196,55	2,173	1,957	100,10%	0,18%
13/jan	CP 178	14 dias	27/jan	427,24	10,01	11,17%	196,55	2,174	1,955	100,02%	0,03%
13/jan	CP 179	14 dias	27/jan	425,87	9,96	11,24%	195,63	2,177	1,957	100,10%	-0,04%
13/jan	CP 180	14 dias	27/jan	426,38	9,98	11,28%	196,02	2,175	1,955	99,99%	-0,08%
15/jan	CP 181	7 dias	22/jan	426,62	10,00	11,24%	196,41	2,172	1,953	99,88%	-0,04%
15/jan	CP 182	7 dias	22/jan	426,20	9,99	11,31%	196,15	2,173	1,952	99,85%	-0,11%
15/jan	CP 183	7 dias	22/jan	426,29	9,99	11,25%	196,15	2,173	1,953	99,92%	-0,05%
15/jan	CP 184	7 dias	22/jan	425,44	9,97	11,21%	195,76	2,173	1,954	99,96%	-0,01%
15/jan	CP 185	7 dias	22/jan	423,08	9,94	11,21%	195,17	2,168	1,949	99,71%	-0,01%
15/jan	CP 186	7 dias	22/jan	425,15	9,97	11,06%	195,76	2,172	1,955	100,03%	0,14%
15/jan	CP 187	7 dias	22/jan	424,16	9,96	11,21%	195,56	2,169	1,950	99,76%	-0,01%
15/jan	CP 188	7 dias	22/jan	425,09	9,98	11,29%	196,02	2,169	1,949	99,67%	-0,09%
15/jan	CP 189	7 dias	22/jan	426,14	10,00	11,28%	196,35	2,170	1,950	99,76%	-0,08%
15/jan	CP 190	7 dias	22/jan	424,81	9,96	11,21%	195,56	2,172	1,953	99,92%	-0,01%
24/jan	CP 191	3 dias	27/jan	427,64	10,03	11,33%	196,94	2,171	1,950	99,77%	-0,13%
24/jan	CP 192	3 dias	27/jan	425,68	10,03	11,21%	196,87	2,162	1,944	99,45%	-0,01%
24/jan	CP 193	3 dias	27/jan	427,54	10,01	11,33%	196,48	2,176	1,955	99,98%	-0,13%
24/jan	CP 194	3 dias	27/jan	427,18	10,01	11,27%	196,55	2,173	1,953	99,91%	-0,07%
24/jan	CP 195	3 dias	27/jan	426,59	10,00	11,23%	196,35	2,173	1,953	99,91%	-0,03%
24/jan	CP 196	3 dias	27/jan	425,53	9,98	11,39%	196,02	2,171	1,949	99,68%	-0,19%
24/jan	CP 197	3 dias	27/jan	427,21	10,01	11,27%	196,55	2,174	1,953	99,92%	-0,07%
24/jan	CP 198	3 dias	27/jan	425,38	9,98	11,36%	195,96	2,171	1,949	99,71%	-0,16%
24/jan	CP 199	3 dias	27/jan	427,02	10,01	11,18%	196,55	2,173	1,954	99,96%	0,02%
24/jan	CP 200	3 dias	27/jan	427,09	10,01	11,25%	196,55	2,173	1,953	99,91%	-0,05%
Média ρ_a		1,953 g/cm ³		DV(%)		0,29		CV(%)		0,15	

Fonte: Autora (2022).

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Dados da ruptura para a matriz solo puro.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 6	CS	420,63	9,97	5,00	-	-	-	11,33%	1,93
CP 7	CS	422,78	9,98	5,00	-	-	-	11,67%	1,93
CP 8	CS	424,95	9,98	5,00	-	-	-	11,98%	1,59
CP 9	CS	423,37	9,96	5,00	-	-	-	11,91%	1,71
CP 10	CS	423,38	9,98	5,00	-	-	-	11,62%	1,82
CP 11	TCD	420,78	9,97	5,00	-	-	-	11,39%	0,32
CP 12	TCD	420,30	9,96	5,00	-	-	-	11,41%	0,29
CP 13	TCD	421,82	10,01	5,00	-	-	-	11,43%	0,31
CP 14	TCD	421,59	10,00	5,00	-	-	-	11,42%	0,31
CP 15	TCD	421,10	10,00	5,00	-	-	-	11,34%	0,34

CS – Compressão simples

TCD – Tração por compressão diametral

Fonte: Autora (2022).

Tabela B.2 – Dados da ruptura para a matriz SC5%.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 21	CS	423,20	9,97	5,00	423,95	9,97	5,00	11,73%	33,18
CP 22	CS	424,53	9,98	5,00	425,41	9,98	5,00	11,83%	31,73
CP 23	CS	426,16	10,02	5,00	427,16	10,02	5,00	11,71%	32,07
CP 24	CS	424,83	9,99	5,00	425,89	10,00	5,00	11,78%	32,63
CP 25	CS	424,94	10,00	5,00	425,78	10,00	5,00	11,72%	31,73
CP 26	TCD	425,39	9,99	5,00	426,61	10,00	5,00	11,73%	4,56
CP 27	TCD	424,90	10,00	5,00	425,86	10,00	5,00	11,47%	4,53
CP 28	TCD	424,47	9,98	5,00	425,24	9,99	5,00	11,67%	4,23
CP 29	TCD	424,85	10,00	5,00	426,01	10,00	5,00	11,63%	4,39
CP 30	TCD	425,01	10,01	5,00	426,18	10,01	5,00	11,77%	4,27
CP 31	CS	425,49	10,02	5,00	426,61	10,02	5,00	11,62%	23,47
CP 32	CS	424,95	9,99	5,00	426,20	9,99	5,00	11,73%	24,92
CP 33	CS	424,73	10,00	5,00	426,11	10,00	5,00	11,83%	24,25
CP 34	CS	424,11	9,98	5,00	425,58	9,97	5,00	11,68%	25,15
CP 35	CS	424,78	9,98	5,00	426,27	9,97	5,00	11,65%	23,58
CP 36	TCD	424,56	9,98	5,00	425,53	9,97	5,00	11,97%	4,15
CP 37	TCD	424,60	9,99	5,00	426,08	9,98	5,00	11,52%	3,95
CP 38	TCD	428,84	10,05	5,00	430,42	10,05	5,00	11,45%	3,98
CP 39	TCD	427,86	10,05	5,00	428,98	10,04	5,00	11,54%	4,04
CP 40	TCD	427,27	10,04	5,00	428,40	10,04	5,00	11,64%	4,07
CP 41	CS	426,95	10,04	5,00	428,63	10,03	5,00	11,70%	16,89
CP 42	CS	425,35	10,00	5,00	427,18	9,99	5,00	11,88%	16,77
CP 43	CS	426,35	10,03	5,00	428,03	10,02	5,00	11,89%	16,77
CP 44	CS	424,94	10,01	5,00	426,63	10,00	5,00	11,97%	16,33
CP 45	CS	427,82	10,05	5,00	429,34	10,05	5,00	11,64%	17,33
CP 46	TCD	427,89	10,06	5,00	429,60	10,05	5,00	11,82%	3,06
CP 47	TCD	423,62	9,98	5,00	425,35	9,97	5,00	11,71%	3,00
CP 48	TCD	423,88	9,98	5,00	425,67	9,97	5,00	11,39%	3,23
CP 49	TCD	423,61	9,98	5,00	425,38	9,97	5,00	11,53%	3,17
CP 50	TCD	423,77	9,98	5,00	424,49	9,97	5,00	11,48%	3,06
CS – Compressão simples				TCD – Tração por compressão diametral					

Fonte: Autora (2022).

Tabela B.3 – Dados da ruptura para a matriz SC6%.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 51	CS	424,35	10,00	5,00	425,40	9,99	5,00	11,68%	26,04
CP 52	CS	424,61	10,01	5,00	426,13	10,01	5,00	11,76%	26,60
CP 53	CS	424,20	10,01	5,00	425,59	10,01	5,00	11,51%	25,71
CP 54	CS	424,58	10,02	5,00	425,98	10,01	5,00	11,74%	24,59
CP 55	CS	425,59	10,04	5,00	426,38	10,03	5,00	11,61%	27,16
CP 56	TCD	423,20	9,99	5,00	424,59	9,99	5,00	12,06%	5,12
CP 57	TCD	425,03	10,02	5,00	426,61	10,02	5,00	11,95%	5,33
CP 58	TCD	425,66	10,03	5,00	426,91	10,03	5,00	11,99%	5,32
CP 59	TCD	425,55	10,03	5,00	426,99	10,02	5,00	11,82%	5,58
CP 60	TCD	423,56	9,99	5,00	425,01	9,99	5,00	11,65%	5,32
CP 61	CS	425,64	10,03	5,00	427,52	10,03	5,00	11,58%	26,04
CP 62	CS	424,20	10,01	5,00	425,39	10,01	5,00	11,76%	24,59
CP 63	CS	425,20	10,01	5,00	427,13	10,00	5,00	11,72%	24,03
CP 64	CS	424,42	10,03	5,00	426,97	10,02	5,00	11,80%	25,71
CP 65	CS	425,42	10,00	5,00	429,02	9,99	5,00	11,91%	23,14
CP 66	TCD	425,11	10,03	5,00	427,27	10,03	5,00	11,88%	4,07
CP 67	TCD	425,61	10,02	5,00	427,26	10,01	5,00	12,05%	4,02
CP 68	TCD	425,44	10,04	5,00	429,16	10,04	5,00	11,80%	3,90
CP 69	TCD	425,58	10,03	5,00	427,99	10,02	5,00	11,69%	4,19
CP 70	TCD	424,00	10,04	5,00	426,31	10,04	5,00	11,69%	4,26
CP 71	CS	423,21	10,01	5,00	426,99	10,00	5,00	12,30%	16,89
CP 72	CS	425,72	9,99	5,00	428,28	9,99	5,00	12,22%	17,56
CP 73	CS	425,32	10,03	5,00	429,42	10,03	5,00	12,42%	16,55
CP 74	CS	426,10	10,02	5,00	429,56	10,02	5,00	12,78%	17,89
CP 75	CS	424,22	10,05	5,00	428,47	10,04	5,00	12,51%	16,77
CP 76	TCD	422,95	10,01	5,00	427,10	10,00	5,00	12,27%	3,33
CP 77	TCD	422,98	9,97	5,00	426,93	9,97	5,00	11,81%	3,31
CP 78	TCD	423,82	9,99	5,00	428,65	9,99	5,00	12,04%	3,44
CP 79	TCD	423,49	9,97	5,00	427,69	9,97	5,00	11,89%	3,14
CP 80	TCD	424,21	9,98	5,00	427,87	9,97	5,00	12,00%	3,48
CS – Compressão simples				TCD – Tração por compressão diametral					

Fonte: Autora (2022).

Tabela B.4 – Dados da ruptura para a matriz SE5%.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 81	CS	428,37	10,02	5,00	-	-	-	11,52%	1,93
CP 82	CS	429,50	10,03	5,00	-	-	-	11,59%	2,04
CP 83	CS	429,04	9,97	5,00	-	-	-	11,78%	1,71
CP 84	CS	426,82	10,00	5,00	-	-	-	11,60%	2,15
CP 85	CS	428,79	10,01	5,00	-	-	-	11,73%	1,71
CP 86	TCD	428,40	10,02	5,00	-	-	-	11,80%	0,37
CP 87	TCD	429,61	10,03	5,00	-	-	-	11,79%	0,37
CP 88	TCD	427,76	10,02	5,00	-	-	-	11,65%	0,43
CP 89	TCD	427,84	10,01	5,00	-	-	-	11,62%	0,43
CP 90	TCD	427,47	10,01	5,00	-	-	-	11,72%	0,37
CP 91	CS	427,16	10,00	5,00	-	-	-	11,61%	2,93
CP 92	CS	424,32	9,97	5,00	-	-	-	11,66%	2,93
CP 93	CS	426,38	10,00	5,00	-	-	-	11,52%	3,16
CP 94	CS	427,65	10,01	5,00	-	-	-	11,81%	2,71
CP 95	CS	427,53	10,01	5,00	-	-	-	11,50%	3,27
CP 96	TCD	427,83	10,01	5,00	-	-	-	11,81%	0,43
CP 97	TCD	427,92	10,02	5,00	-	-	-	11,93%	0,40
CP 98	TCD	424,82	9,98	5,00	-	-	-	11,98%	0,37
CP 99	TCD	424,85	9,97	5,00	-	-	-	11,77%	0,46
CP 100	TCD	427,71	10,02	5,00	-	-	-	11,95%	0,37
CP 101	CS	424,47	9,95	5,00	-	-	-	11,69%	1,93
CP 102	CS	425,71	9,97	5,00	-	-	-	12,00%	1,93
CP 103	CS	426,81	10,00	5,00	-	-	-	11,89%	1,93
CP 104	CS	426,27	10,00	5,00	-	-	-	11,69%	2,04
CP 105	CS	426,59	10,00	5,00	-	-	-	11,69%	1,93
CP 106	TCD	426,68	10,01	5,00	-	-	-	11,76%	0,31
CP 107	TCD	424,36	9,97	5,00	-	-	-	11,71%	0,29
CP 108	TCD	425,74	10,01	5,00	-	-	-	11,69%	0,29
CP 109	TCD	425,21	9,98	5,00	-	-	-	11,69%	0,32
CP 110	TCD	425,61	9,98	5,00	-	-	-	11,81%	0,32

CS – Compressão simples

TCD – Tração por compressão diametral

Fonte: Autora (2022).

Tabela B.5 – Dados da ruptura para a matriz SE6%.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 111	CS	425,57	10,00	5,00	-	-	-	11,34%	2,26
CP 112	CS	424,82	9,95	5,00	-	-	-	11,34%	2,15
CP 113	CS	423,69	9,94	5,00	-	-	-	11,37%	2,38
CP 114	CS	427,60	10,03	5,00	-	-	-	11,40%	2,38
CP 115	CS	427,31	9,97	5,00	-	-	-	11,53%	1,48
CP 116	TCD	427,67	10,03	5,00	-	-	-	11,44%	0,43
CP 117	TCD	428,98	9,95	5,00	-	-	-	11,47%	0,32
CP 118	TCD	425,34	9,95	5,00	-	-	-	11,53%	0,34
CP 119	TCD	430,60	10,00	5,00	-	-	-	11,59%	0,29
CP 120	TCD	426,63	10,00	5,00	-	-	-	11,50%	0,34
CP 121	CS	429,32	10,01	5,00	-	-	-	11,66%	2,15
CP 122	CS	426,00	10,01	5,00	-	-	-	11,59%	2,38
CP 123	CS	426,37	10,02	5,00	-	-	-	11,56%	2,26
CP 124	CS	426,77	10,02	5,00	-	-	-	11,44%	2,49
CP 125	CS	424,60	9,97	5,00	-	-	-	11,42%	2,38
CP 126	TCD	429,59	10,00	5,00	-	-	-	11,62%	0,29
CP 127	TCD	428,33	10,01	5,00	-	-	-	11,87%	0,29
CP 128	TCD	429,60	9,95	5,00	-	-	-	11,89%	0,26
CP 129	TCD	430,23	10,03	5,00	-	-	-	11,92%	0,26
CP 130	TCD	424,45	9,96	5,00	-	-	-	11,67%	0,32
CP 131	CS	425,71	9,96	5,00	-	-	-	11,58%	2,26
CP 132	CS	430,49	10,03	5,00	-	-	-	11,71%	1,71
CP 133	CS	426,06	10,00	5,00	-	-	-	11,69%	2,15
CP 134	CS	426,26	10,01	5,00	-	-	-	11,54%	2,26
CP 135	CS	425,96	10,00	5,00	-	-	-	11,47%	2,26
CP 136	TCD	425,46	10,00	5,00	-	-	-	11,53%	0,37
CP 137	TCD	428,74	9,99	5,00	-	-	-	11,76%	0,29
CP 138	TCD	427,91	9,97	5,00	-	-	-	11,79%	0,29
CP 139	TCD	425,82	10,01	5,00	-	-	-	11,52%	0,31
CP 140	TCD	425,23	10,00	5,00	-	-	-	11,52%	0,34

CS – Compressão simples

TCD – Tração por compressão diametral

Fonte: Autora (2022).

Tabela B.6 – Dados da ruptura para a matriz SCE10%.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 141	CS	428,04	10,03	5,03	436,63	10,12	5,06	14,33%	8,64
CP 142	CS	427,66	10,02	5,02	436,28	10,11	5,10	14,41%	8,83
CP 143	CS	429,13	10,07	5,02	437,89	10,17	5,05	14,59%	8,02
CP 144	CS	432,46	10,09	5,05	438,77	10,15	5,05	14,40%	9,66
CP 145	CS	429,59	10,04	5,02	437,42	10,12	5,05	14,35%	9,66
CP 146	TCD	429,17	10,04	5,02	437,47	10,14	5,07	14,60%	1,04
CP 147	TCD	428,14	10,01	5,02	437,26	10,10	5,05	14,29%	0,94
CP 148	TCD	428,59	10,03	5,02	437,07	10,11	5,07	14,60%	1,12
CP 149	TCD	430,35	10,07	5,04	438,06	10,14	5,06	14,22%	1,10
CP 150	TCD	428,18	10,01	5,02	437,49	10,12	5,07	14,04%	0,99
CP 151	CS	427,64	10,02	5,02	438,04	10,14	5,07	14,84%	6,00
CP 152	CS	429,30	10,02	5,02	438,31	10,12	5,08	14,70%	6,84
CP 153	CS	425,14	9,97	5,01	435,45	10,09	5,09	14,85%	5,95
CP 154	CS	426,31	10,00	5,01	437,20	10,12	5,07	14,21%	6,44
CP 155	CS	430,03	10,10	5,02	440,74	10,21	5,10	14,92%	6,25
CP 156	TCD	427,87	10,02	5,01	439,55	10,16	5,09	14,85%	0,66
CP 157	TCD	427,44	10,01	5,01	438,29	10,13	5,07	14,49%	0,63
CP 158	TCD	427,58	10,05	5,03	439,09	10,19	5,07	14,55%	0,60
CP 159	TCD	428,40	10,04	5,03	440,50	10,18	5,10	14,66%	0,63
CP 160	TCD	428,51	10,03	5,02	439,87	10,16	5,07	14,68%	0,60
CP 161	CS	426,93	10,03	5,03	441,01	10,21	5,12	15,98%	3,44
CP 162	CS	429,03	10,08	5,03	442,39	10,25	5,08	15,61%	3,71
CP 163	CS	427,51	10,04	5,03	441,35	10,22	5,07	15,70%	3,61
CP 164	CS	427,08	10,01	5,03	439,97	10,18	5,09	15,11%	3,91
CP 165	CS	428,05	10,01	5,03	440,58	10,20	5,10	15,77%	3,57
CP 166	TCD	429,02	10,07	5,02	444,42	10,27	5,11	15,67%	0,35
CP 167	TCD	428,42	10,05	5,02	443,64	10,26	5,11	15,98%	0,38
CP 168	TCD	427,22	10,02	5,02	444,06	10,26	5,12	15,20%	0,33
CP 169	TCD	429,01	10,05	5,02	446,72	10,27	5,14	15,42%	0,32
CP 170	TCD	428,96	10,05	5,02	445,12	10,26	5,13	15,92%	0,35

CS – Compressão simples

TCD – Tração por compressão diametral

Fonte: Autora (2022).

Tabela B.7 – Dados da ruptura para a matriz SCE12%.

CP	Tipo de ensaio	Antes da imersão			Depois da imersão			W depois da rupt.	qu (Kgf/cm ²)
		M (g)	h (cm)	d (cm)	M (g)	h (cm)	d (cm)		
CP 171	CS	428,64	10,03	5,05	438,36	10,13	5,09	14,58%	7,89
CP 172	CS	427,16	10,08	5,03	439,98	10,20	5,08	15,56%	7,06
CP 173	CS	428,63	10,03	5,01	442,04	10,20	5,09	14,94%	6,82
CP 174	CS	427,58	10,03	5,01	440,44	10,19	5,09	14,94%	6,71
CP 175	CS	428,34	10,05	5,03	440,33	10,18	5,09	14,68%	7,89
CP 176	TCD	427,45	10,03	5,03	439,59	10,17	5,08	14,90%	0,79
CP 177	TCD	429,02	10,08	5,03	441,14	10,21	5,10	15,12%	0,68
CP 178	TCD	430,21	10,10	5,03	441,50	10,22	5,09	15,22%	0,89
CP 179	TCD	426,35	10,00	5,01	439,08	10,16	5,08	14,89%	0,68
CP 180	TCD	427,03	10,03	5,01	439,43	10,18	5,09	14,98%	0,73
CP 181	CS	426,39	10,02	5,01	441,03	10,20	5,10	15,03%	4,97
CP 182	CS	425,96	10,02	5,01	440,81	10,18	5,10	14,84%	5,29
CP 183	CS	426,04	10,01	5,02	441,10	10,20	5,10	15,15%	5,18
CP 184	CS	425,28	9,99	5,01	439,98	10,16	5,10	14,77%	5,50
CP 185	CS	423,06	9,97	5,00	438,26	10,14	5,08	14,97%	5,33
CP 186	TCD	424,97	10,00	5,01	440,13	10,18	5,09	14,66%	0,57
CP 187	TCD	424,03	10,00	5,00	439,01	10,18	5,09	15,39%	0,60
CP 188	TCD	424,91	10,01	5,01	440,44	10,20	5,09	14,99%	0,54
CP 189	TCD	426,09	10,02	5,02	440,98	10,20	5,10	15,06%	0,54
CP 190	TCD	424,74	9,99	5,00	439,93	10,18	5,09	15,09%	0,55
CP 191	CS	427,79	10,08	5,05	444,29	10,28	5,11	15,71%	3,98
CP 192	CS	426,33	10,06	5,03	441,75	10,25	5,10	15,95%	3,89
CP 193	CS	428,85	10,07	5,03	443,09	10,24	5,11	16,10%	4,09
CP 194	CS	427,22	10,06	5,02	443,63	10,27	5,12	16,08%	3,76
CP 195	CS	428,12	10,04	5,03	442,93	10,25	5,10	15,97%	4,00
CP 196	TCD	425,69	10,03	5,03	443,90	10,27	5,09	16,14%	0,41
CP 197	TCD	427,38	10,05	5,03	443,68	10,26	5,09	15,85%	0,46
CP 198	TCD	426,01	10,03	5,03	444,10	10,27	5,10	16,80%	0,41
CP 199	TCD	429,06	10,07	5,03	444,56	10,27	5,14	16,23%	0,51
CP 200	TCD	428,02	10,04	5,03	443,92	10,25	5,10	15,99%	0,49

CS – Compressão simples

TCD – Tração por compressão diametral

Fonte: Autora (2022).

APÊNDICE C

Tabela C.1 – Índices Físicos dos CPs da matriz solo natural.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	Mcimento (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)
CP 6	84,65%	81,02%	0,368	0,269	-	500,00	-	2,15	1,923
CP 7	82,76%	84,91%	0,361	0,266	-	500,00	-	2,16	1,932
CP 8	83,70%	85,86%	0,367	0,268	-	500,00	-	2,17	1,924
CP 9	82,82%	86,90%	0,360	0,265	-	500,00	-	2,16	1,933
CP 10	84,13%	83,67%	0,365	0,268	-	500,00	-	2,16	1,926
CP 11	83,57%	83,08%	0,361	0,265	-	500,00	-	2,15	1,933
CP 12	83,81%	82,23%	0,365	0,267	-	500,00	-	2,15	1,927
CP 13	83,22%	82,21%	0,366	0,268	-	500,00	-	2,15	1,926
CP 14	83,12%	82,20%	0,365	0,268	-	500,00	-	2,15	1,926
CP 15	82,61%	81,74%	0,365	0,267	-	500,00	-	2,14	1,927

Fonte: Autora (2022).

Tabela C.2 – Índices Físicos dos CPs da matriz SC5%.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	Mcimento (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _a (g/cm ³)
CP 21	86,72%	86,46%	0,358	0,264	0,18%	500,00	26,16	2,17	1,937
CP 22	87,62%	87,70%	0,357	0,263	0,21%	500,00	26,16	2,17	1,937
CP 23	86,90%	87,19%	0,356	0,263	0,23%	500,00	26,16	2,17	1,939
CP 24	87,02%	87,20%	0,359	0,264	0,25%	500,00	26,16	2,17	1,935
CP 25	87,08%	86,84%	0,358	0,264	0,20%	500,00	26,16	2,17	1,936
CP 26	87,13%	87,51%	0,358	0,264	0,29%	500,00	26,16	2,17	1,937
CP 27	85,48%	85,79%	0,355	0,262	0,23%	500,00	26,16	2,17	1,941
CP 28	87,31%	86,51%	0,357	0,263	0,18%	500,00	26,16	2,17	1,938
CP 29	86,37%	86,63%	0,357	0,263	0,27%	500,00	26,16	2,17	1,937
CP 30	86,62%	87,03%	0,358	0,264	0,27%	500,00	26,16	2,17	1,937
CP 31	86,92%	86,39%	0,356	0,263	0,26%	500,00	26,16	2,17	1,939
CP 32	86,83%	87,56%	0,357	0,263	0,29%	500,00	26,16	2,17	1,938
CP 33	87,19%	87,59%	0,359	0,264	0,32%	500,00	26,16	2,17	1,935
CP 34	86,63%	87,52%	0,356	0,263	0,35%	500,00	26,16	2,17	1,939
CP 35	86,70%	87,91%	0,356	0,262	0,35%	500,00	26,16	2,18	1,940
CP 36	88,19%	88,76%	0,359	0,264	0,23%	500,00	26,16	2,17	1,936
CP 37	86,35%	86,86%	0,356	0,262	0,35%	500,00	26,16	2,17	1,940
CP 38	86,11%	87,59%	0,353	0,261	0,37%	500,00	26,16	2,18	1,943
CP 39	86,28%	87,20%	0,353	0,261	0,26%	500,00	26,16	2,18	1,943
CP 40	86,76%	87,21%	0,356	0,262	0,26%	500,00	26,16	2,17	1,940
CP 41	87,37%	87,99%	0,356	0,262	0,39%	500,00	26,16	2,18	1,940
CP 42	87,87%	88,99%	0,360	0,265	0,43%	500,00	26,16	2,18	1,934
CP 43	88,38%	88,67%	0,361	0,265	0,39%	500,00	26,16	2,18	1,933
CP 44	87,83%	88,58%	0,362	0,266	0,40%	500,00	26,16	2,17	1,930
CP 45	88,52%	87,59%	0,359	0,264	0,35%	500,00	26,16	2,18	1,935
CP 46	88,46%	88,59%	0,358	0,264	0,40%	500,00	26,16	2,18	1,936
CP 47	86,63%	87,46%	0,360	0,265	0,41%	500,00	26,16	2,17	1,934
CP 48	87,06%	86,27%	0,360	0,264	0,42%	500,00	26,16	2,17	1,934
CP 49	87,21%	86,68%	0,360	0,265	0,42%	500,00	26,16	2,17	1,934
CP 50	85,43%	85,76%	0,353	0,261	0,17%	500,00	26,16	2,17	1,943

Fonte: Autora (2022).

Tabela C.3 – Índices Físicos dos CPs da matriz SC6%.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	Mcimento (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)
CP 51	85,04%	86,71%	0,358	0,264	0,25%	500,00	31,73	2,17	1,937
CP 52	85,18%	86,97%	0,358	0,264	0,36%	500,00	31,73	2,17	1,936
CP 53	84,77%	85,40%	0,359	0,264	0,33%	500,00	31,73	2,17	1,936
CP 54	85,78%	86,73%	0,360	0,265	0,33%	500,00	31,73	2,17	1,933
CP 55	85,27%	85,80%	0,359	0,264	0,19%	500,00	31,73	2,17	1,936
CP 56	86,39%	87,75%	0,364	0,267	0,33%	500,00	31,73	2,16	1,928
CP 57	85,66%	87,82%	0,361	0,265	0,37%	500,00	31,73	2,17	1,932
CP 58	85,91%	87,89%	0,361	0,265	0,29%	500,00	31,73	2,17	1,932
CP 59	85,80%	87,55%	0,360	0,265	0,34%	500,00	31,73	2,17	1,934
CP 60	85,71%	86,26%	0,359	0,264	0,34%	500,00	31,73	2,17	1,935
CP 61	85,06%	86,57%	0,358	0,263	0,44%	500,00	31,73	2,17	1,937
CP 62	85,04%	86,38%	0,358	0,264	0,28%	500,00	31,73	2,16	1,936
CP 63	84,90%	87,90%	0,359	0,264	0,45%	500,00	31,73	2,18	1,936
CP 64	85,27%	87,43%	0,358	0,264	0,60%	500,00	31,73	2,17	1,936
CP 65	86,43%	90,62%	0,361	0,265	0,84%	500,00	31,73	2,19	1,932
CP 66	86,34%	87,71%	0,360	0,265	0,51%	500,00	31,73	2,17	1,933
CP 67	86,69%	89,10%	0,361	0,265	0,39%	500,00	31,73	2,17	1,932
CP 68	85,78%	88,52%	0,360	0,265	0,87%	500,00	31,73	2,18	1,934
CP 69	85,13%	87,78%	0,359	0,264	0,56%	500,00	31,73	2,18	1,936
CP 70	84,72%	85,78%	0,357	0,263	0,54%	500,00	31,73	2,16	1,938
CP 71	84,96%	90,33%	0,360	0,265	0,89%	500,00	31,73	2,17	1,934
CP 72	86,01%	91,39%	0,362	0,266	0,60%	500,00	31,73	2,18	1,931
CP 73	86,21%	91,75%	0,360	0,265	0,95%	500,00	31,73	2,18	1,934
CP 74	86,08%	93,75%	0,360	0,265	0,81%	500,00	31,73	2,18	1,933
CP 75	86,29%	91,02%	0,363	0,267	0,99%	500,00	31,73	2,17	1,929
CP 76	86,43%	90,30%	0,364	0,267	0,97%	500,00	31,73	2,18	1,929
CP 77	83,62%	89,17%	0,356	0,262	0,93%	500,00	31,73	2,18	1,940
CP 78	87,34%	90,87%	0,364	0,267	1,13%	500,00	31,73	2,19	1,928
CP 79	85,48%	90,14%	0,360	0,265	0,98%	500,00	31,73	2,18	1,933
CP 80	87,17%	90,76%	0,365	0,267	0,86%	500,00	31,73	2,19	1,927

Fonte: Autora (2022).

Tabela C.4 – Índices Físicos dos CPs da matriz SE5%.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	Mtringita (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)
CP 81	85,33%	87,28%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,953
CP 82	85,34%	88,17%	0,347	0,258	-	500,00	26,16	2,18	1,953
CP 83	85,23%	90,75%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,19	1,953
CP 84	85,51%	87,12%	0,348	0,258	-	500,00	26,16	2,17	1,951
CP 85	85,46%	88,92%	0,347	0,258	-	500,00	26,16	2,18	1,952
CP 86	85,44%	88,71%	0,347	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,953
CP 87	85,20%	89,18%	0,343	0,255	-	500,00	26,16	2,18	1,958
CP 88	85,38%	87,40%	0,347	0,258	-	500,00	26,16	2,17	1,952
CP 89	84,92%	87,67%	0,345	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,955
CP 90	84,81%	87,82%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,17	1,954
CP 91	84,92%	87,42%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,954
CP 92	84,89%	86,44%	0,352	0,260	-	500,00	26,16	2,17	1,946
CP 93	84,88%	86,39%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,17	1,954
CP 94	85,91%	88,35%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,954
CP 95	85,72%	86,90%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,955
CP 96	85,82%	88,50%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,955
CP 97	85,67%	88,78%	0,346	0,257	-	500,00	26,16	2,18	1,954
CP 98	84,96%	87,90%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,949
CP 99	85,21%	87,33%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,949
CP 100	86,14%	88,71%	0,348	0,258	-	500,00	26,16	2,17	1,951
CP 101	85,96%	87,36%	0,353	0,261	-	500,00	26,16	2,17	1,944
CP 102	86,43%	89,02%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,948
CP 103	86,58%	88,39%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,948
CP 104	85,16%	87,07%	0,348	0,258	-	500,00	26,16	2,17	1,951
CP 105	86,14%	87,33%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,948
CP 106	86,73%	87,39%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,948
CP 107	84,23%	86,66%	0,349	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,949
CP 108	85,37%	86,33%	0,352	0,260	-	500,00	26,16	2,17	1,946
CP 109	84,56%	86,92%	0,348	0,258	-	500,00	26,16	2,17	1,951
CP 110	86,37%	87,78%	0,350	0,259	-	500,00	26,16	2,17	1,948

Fonte: Autora (2022).

Tabela C.5 – Índices Físicos dos CPs da matriz SE6%.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	Mtringita (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)
CP 111	83,31%	84,98%	0,347	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,953
CP 112	84,21%	86,02%	0,347	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,952
CP 113	83,49%	85,64%	0,349	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,950
CP 114	82,95%	85,83%	0,346	0,257	-	500,00	31,73	2,17	1,954
CP 115	83,13%	88,21%	0,349	0,259	-	500,00	31,73	2,18	1,949
CP 116	83,84%	86,06%	0,345	0,256	-	500,00	31,73	2,17	1,956
CP 117	83,72%	89,99%	0,349	0,259	-	500,00	31,73	2,20	1,950
CP 118	83,13%	87,31%	0,344	0,256	-	500,00	31,73	2,18	1,957
CP 119	83,26%	90,11%	0,345	0,257	-	500,00	31,73	2,19	1,955
CP 120	83,38%	86,51%	0,347	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,952
CP 121	83,49%	89,05%	0,348	0,258	-	500,00	31,73	2,18	1,951
CP 122	83,69%	86,11%	0,348	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,951
CP 123	83,23%	85,90%	0,347	0,257	-	500,00	31,73	2,17	1,953
CP 124	84,20%	85,66%	0,347	0,257	-	500,00	31,73	2,17	1,953
CP 125	83,68%	85,58%	0,344	0,256	-	500,00	31,73	2,17	1,957
CP 126	82,97%	89,44%	0,348	0,258	-	500,00	31,73	2,19	1,952
CP 127	82,83%	89,16%	0,346	0,257	-	500,00	31,73	2,18	1,954
CP 128	84,51%	92,43%	0,345	0,257	-	500,00	31,73	2,20	1,955
CP 129	84,35%	90,22%	0,347	0,258	-	500,00	31,73	2,18	1,952
CP 130	84,25%	86,90%	0,347	0,257	-	500,00	31,73	2,17	1,953
CP 131	83,97%	87,48%	0,349	0,259	-	500,00	31,73	2,18	1,949
CP 132	84,76%	89,52%	0,346	0,257	-	500,00	31,73	2,19	1,954
CP 133	83,98%	86,93%	0,349	0,259	-	500,00	31,73	2,17	1,950
CP 134	83,90%	86,07%	0,347	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,952
CP 135	83,79%	85,87%	0,348	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,950
CP 136	83,68%	85,73%	0,348	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,951
CP 137	84,01%	89,70%	0,350	0,259	-	500,00	31,73	2,19	1,948
CP 138	84,57%	89,88%	0,348	0,258	-	500,00	31,73	2,19	1,952
CP 139	83,17%	85,64%	0,347	0,258	-	500,00	31,73	2,17	1,952
CP 140	83,67%	85,53%	0,350	0,259	-	500,00	31,73	2,17	1,949

Fonte: Autora (2022).

Tabela C.6 – Índices Físicos dos CPs da matriz SCE10%.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	M cim. e M entrin. (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)
CP 141	88,74%	93,88%	0,345	0,256	1,97%	500,00	27,61	2,15	1,956
CP 142	87,43%	89,30%	0,349	0,258	1,98%	500,00	27,61	2,11	1,950
CP 143	88,50%	95,45%	0,347	0,257	2,00%	500,00	27,61	2,15	1,953
CP 144	88,40%	96,11%	0,343	0,256	1,44%	500,00	27,61	2,16	1,958
CP 145	88,07%	95,88%	0,346	0,257	1,79%	500,00	27,61	2,16	1,955
CP 146	88,85%	93,57%	0,347	0,258	1,90%	500,00	27,61	2,14	1,952
CP 147	89,13%	96,19%	0,347	0,258	2,09%	500,00	27,61	2,16	1,952
CP 148	87,96%	94,23%	0,346	0,257	1,94%	500,00	27,61	2,14	1,954
CP 149	88,47%	93,91%	0,345	0,257	1,76%	500,00	27,61	2,15	1,955
CP 150	87,99%	92,16%	0,345	0,256	2,13%	500,00	27,61	2,14	1,956
CP 151	89,20%	94,83%	0,349	0,258	2,37%	500,00	27,61	2,14	1,950
CP 152	88,62%	93,93%	0,348	0,258	2,06%	500,00	27,61	2,14	1,950
CP 153	88,90%	92,06%	0,348	0,258	2,37%	500,00	27,61	2,12	1,951
CP 154	88,26%	92,59%	0,345	0,257	2,49%	500,00	27,61	2,14	1,955
CP 155	87,29%	91,20%	0,344	0,256	2,43%	500,00	27,61	2,11	1,957
CP 156	89,51%	92,85%	0,351	0,260	2,66%	500,00	27,61	2,13	1,947
CP 157	89,22%	94,11%	0,348	0,258	2,48%	500,00	27,61	2,14	1,950
CP 158	89,05%	93,01%	0,346	0,257	2,62%	500,00	27,61	2,13	1,953
CP 159	88,23%	90,99%	0,345	0,257	2,75%	500,00	27,61	2,12	1,955
CP 160	88,35%	95,01%	0,346	0,257	2,58%	500,00	27,61	2,14	1,953
CP 161	88,28%	92,57%	0,348	0,258	3,19%	500,00	27,61	2,10	1,951
CP 162	88,48%	95,94%	0,345	0,257	3,02%	500,00	27,61	2,13	1,955
CP 163	88,80%	97,74%	0,347	0,258	3,14%	500,00	27,61	2,14	1,952
CP 164	88,39%	93,42%	0,347	0,258	2,93%	500,00	27,61	2,12	1,952
CP 165	89,34%	94,28%	0,347	0,258	2,84%	500,00	27,61	2,11	1,952
CP 166	87,62%	93,31%	0,345	0,257	3,47%	500,00	27,61	2,11	1,955
CP 167	87,95%	94,07%	0,346	0,257	3,43%	500,00	27,61	2,11	1,954
CP 168	88,68%	90,60%	0,349	0,259	3,79%	500,00	27,61	2,10	1,949
CP 169	88,46%	90,51%	0,343	0,255	3,96%	500,00	27,61	2,10	1,959
CP 170	89,04%	92,53%	0,348	0,258	3,63%	500,00	27,61	2,10	1,951

Fonte: Autora (2022).

Tabela C.7 – Índices Físicos dos CPs da matriz SCE12%.

CP	Sr (%)	Sr _{rupt} (%)	e	η	Abs (%)	Msolo (g)	M cim. e M entrin. (g)	ρ _{rupt} (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)
CP 171	84,85%	91,97%	0,346	0,257	2,22%	500,00	33,89	2,13	1,953
CP 172	84,07%	95,59%	0,346	0,257	2,91%	500,00	33,89	2,13	1,954
CP 173	84,73%	93,69%	0,345	0,257	3,03%	500,00	33,89	2,13	1,955
CP 174	84,30%	92,86%	0,343	0,255	2,92%	500,00	33,89	2,12	1,958
CP 175	84,64%	92,19%	0,345	0,256	2,72%	500,00	33,89	2,13	1,955
CP 176	84,96%	93,97%	0,346	0,257	2,76%	500,00	33,89	2,13	1,955
CP 177	84,26%	92,14%	0,344	0,256	2,75%	500,00	33,89	2,12	1,957
CP 178	85,15%	93,68%	0,345	0,257	2,56%	500,00	33,89	2,12	1,955
CP 179	85,95%	93,88%	0,344	0,256	2,90%	500,00	33,89	2,13	1,957
CP 180	85,85%	92,59%	0,345	0,257	2,82%	500,00	33,89	2,12	1,955
CP 181	85,20%	92,06%	0,347	0,258	3,32%	500,00	33,89	2,12	1,953
CP 182	85,63%	91,87%	0,347	0,258	3,37%	500,00	33,89	2,12	1,952
CP 183	85,43%	92,54%	0,346	0,257	3,41%	500,00	33,89	2,12	1,953
CP 184	85,26%	91,63%	0,346	0,257	3,34%	500,00	33,89	2,12	1,954
CP 185	84,41%	94,19%	0,349	0,259	3,47%	500,00	33,89	2,13	1,949
CP 186	84,34%	91,96%	0,345	0,256	3,44%	500,00	33,89	2,12	1,955
CP 187	84,59%	93,72%	0,349	0,258	3,41%	500,00	33,89	2,12	1,950
CP 188	84,93%	92,73%	0,350	0,259	3,53%	500,00	33,89	2,12	1,949
CP 189	85,12%	92,14%	0,348	0,258	3,38%	500,00	33,89	2,12	1,950
CP 190	85,08%	93,34%	0,346	0,257	3,45%	500,00	33,89	2,12	1,953
CP 191	85,53%	93,05%	0,348	0,258	3,71%	500,00	33,89	2,11	1,950
CP 192	83,60%	94,18%	0,353	0,261	3,49%	500,00	33,89	2,11	1,944
CP 193	86,21%	94,68%	0,346	0,257	3,21%	500,00	33,89	2,11	1,955
CP 194	85,57%	92,93%	0,346	0,257	3,70%	500,00	33,89	2,10	1,953
CP 195	85,25%	95,05%	0,346	0,257	3,34%	500,00	33,89	2,12	1,953
CP 196	85,72%	96,93%	0,350	0,259	4,10%	500,00	33,89	2,12	1,949
CP 197	85,57%	96,12%	0,346	0,257	3,67%	500,00	33,89	2,13	1,953
CP 198	85,56%	97,92%	0,349	0,259	4,07%	500,00	33,89	2,12	1,949
CP 199	84,99%	91,74%	0,346	0,257	3,49%	500,00	33,89	2,09	1,954
CP 200	85,38%	95,83%	0,346	0,257	3,58%	500,00	33,89	2,12	1,953

Fonte: Autora (2022).