

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estabilização de material dragado no Porto do Rio Grande por  
álcali ativação de resíduos regionais para confecção de BTC**

**Camila Larrosa de Oliveira**

Porto Alegre

2021

CAMILA LARROSA DE OLIVEIRA

**Estabilização de material dragado no Porto do Rio Grande por  
álcali ativação de resíduos regionais para confecção de BTC**

Projeto de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre

2021

**CAMILA LARROSA DE OLIVEIRA**

**Estabilização de material dragado no Porto do Rio Grande por  
álcali ativação de resíduos regionais para confecção de BTC**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2021

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph. D. Concordia University, Canadá  
Orientador

Prof. Cezar Burkert Bastos  
Dr. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Coorientador

Prof. Lucas Festugato  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Diego de Freitas Fagundes (FURG)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Dr. Andrés Mauricio Lotero Caicedo (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha *abuelita* (*in memoriam*),  
por me ensinar a ver o mundo com olhos curiosos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Nilo Consoli pela orientação no desenvolvimento desta pesquisa, se mostrando disponível às minhas demandas. Agradeço ao professor Cezar Bastos, de igual maneira, pela coorientação, por ter me ensinado e apoiado tanto desde a graduação, e também, por abrir as portas do LGC da FURG para mim, mesmo em tempos pandêmicos. Agradeço ao professor Diego Fagundes, pela obtenção do solo dragado no Porto do Rio Grande em 2019, e por acreditar na busca por alternativas para a disposição final do mesmo. Agradeço ao professor Andrés, por todo o auxílio com a álcali ativação e a estatística. Agradeço ao colega Saymon, pelo suporte nas moldagens dos corpos de prova e trocas de conhecimento. E também a Camila, por me manter informada sobre os avanços na UFRGS, além das conversas de sempre.

Agradeço imensamente a minha família, por todo o apoio, incentivo e por acreditarem em mim. Agradeço a minha mãe, por me ensinar a ser forte. Ao meu pai, pelos sonhos. A minha irmã Carol, por ser um exemplo de professora e pesquisadora, e defender sempre a educação. A minha irmã Gabi, por ser meu suporte, meu exemplo de capacidade e determinação. Ao Kaloo, pelo companheirismo de anos. Ao meu companheiro Douglas, por todo o carinho, por dividir as dores e as delícias desses dias, além das ajudas técnicas. Agradeço as minhas amigas, que nessa altura da vida já são quase irmãs, por tantas conversas e momentos de descontração. Agradeço aos meus sobrinhos e afilhado, Dom e Francisco, por além de renovar minhas esperanças, trazer dias melhores.

Agradeço a todos os acadêmicos brasileiros, que mesmo em tempos sombrios de desvalorização da educação, continuam acreditando e lutando por nossa ciência.

Por último, mas não menos importante, agradeço a quem eu dediquei este trabalho, a minha vó, minha *abuelita*, Aurora Renée. Pois foi ela quem me ensinou a ver o mundo com olhos curiosos e imaginação sem limites. Foi ela quem ajudou a tecer minha essência, qual tive que mirar firme para concluir esta pesquisa.

## RESUMO

LARROSA, C. **Estabilização de material dragado no Porto do Rio Grande por álcali ativação de resíduos regionais para confecção de BTC**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O setor portuário é de suma importância para a economia do Brasil, visto que movimentava 90% dos produtos exportados pelo país. O Porto do Rio Grande recebe destaque nesse quesito sendo considerado o segundo porto mais importante para o desenvolvimento do comércio internacional brasileiro e classificando-se como o terceiro porto público de maior movimentação de carga do país. Em contrapartida, intensas e constantes atividades potencialmente poluidoras são intrínsecas às atividades portuárias, como as operações de dragagem. O conflito ambiental por dragagem no Porto do Rio Grande ainda é acentuado pelo fato da cidade abrigar um balneário turístico e pesqueiro, a Praia do Cassino, nas adjacências do canal de acesso ao porto, que é acometido por eventos lamíticos poluidores durante e após atividades de dragagem, associados por alguns estudiosos ao próprio processo. Destarte, iniciativas acerca da reutilização do material dragado são imprescindíveis para a proteção do ambiente e da população que necessita do local. Nesta perspectiva, propõe-se a confecção de Blocos de Terra Comprimida (BTCs) em paralelo à técnica de solo-cimento, estabilizando o solo dragado a partir de agentes químicos e mecânicos, evitando o processo de queima dos tijolos tradicionais. Ademais, preconizando o cunho ambiental da pesquisa, optou-se pelo emprego de um agente cimentante de baixo consumo energético e baixa emissão de CO<sub>2</sub>, produzido a partir da técnica de álcali ativação de outros dois resíduos regionais: a cinza de casca de arroz e a cal de carbureto. Assim, a metodologia desta pesquisa se configura na análise e definição da melhor dosagem de materiais encontrada na região experimental para a produção dos BTCs, considerando seu comportamento frente à resistência à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem, e na qualificação dos blocos, segundo critérios de resistência e de absorção de água. Os resultados encontrados demonstraram que o ligante se apresenta como opção satisfatória para o melhoramento do comportamento mecânico do solo dragado. Os BTCs alcançaram uma resistência de 3,05 MPa em 28 dias de cura, a temperatura ambiente, sendo 50% maior que a mínima exigida por normativas brasileiras nesta idade e estando dentro dos limites de outras normas internacionais. Ademais, a partir dessa idade o BTC satisfaz todas as exigências estabelecidas pela NBR 10834/2013, absorvendo 21,18 % de água, podendo ser utilizados na execução de alvenaria sem função estrutural. Com esse parecer de competência, 38 milhões de BTCs tem potencial de ser produzidos anualmente na cidade de Rio Grande, assegurando abrigo para muitas famílias e evitando que os três resíduos estudados sejam dispostos de maneira que talvez contamine o ambiente.

**Palavras-chave:** *solo dragado; álcali ativação; BTC; estabilização de solos; cinza de casca de arroz; cal de carbureto.*

## ABSTRACT

LARROSA, C. **Stabilization of dredged material at the Port of Rio Grande by alkali activation of regional waste for CEB's production.** 2021. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The port logistics industry is a very important economic sector to the Brazilian economy, they are responsible by 90 % of the products which are exported by Brazil. The Port of Rio Grande is highlighted in this regard, being considered the second most important port for the development of international Brazilian trade and ranking as the third largest government port for cargo handling in Brazil. On the other hand, intense and constant potentially polluting activities are related with port activities, such as dredging operations. The environmental conflict due to dredging in the Port of Rio Grande is further accentuated by the fact that the city has a tourist and fishing beach, named Cassino's beach, which are located at the neighborhood of the port access channel, and is constantly affected by polluting mud during and after activities dredging, associated by some scientists to the process itself. Thus, initiatives regarding the reuse of dredged material are essential to protect the environment and the population that depends of fishing and tourism. In this perspective, it is proposed the manufacture of Compressed Earth Blocks (CEBs) in parallel with the soil-cement technique, stabilizing the dredged soil using chemical and mechanical agents, avoiding the traditional bricks burning process. Furthermore, advocating the environmental nature of the research, it was decided to use a cementing agent with low energy consumption and low CO<sub>2</sub> emissions, produced using the technique of alkali activation of two other regional residues: rice husk ash and Carbide lime. Thus, the methodology of this research is configured in the analysis and definition of the best dosage of materials found in the experimental region for the production of CEBs, considering their behavior against compressive strength and durability by wetting and drying cycles, and in the qualification of blocks, according to resistance and water absorption criteria. The founded results are showed that the binder is a satisfactory option for improving the mechanical behavior of the dredged soil. The CEBs reached a resistance of 3.05 MPa in 28 days of cure, at a temperature of  $\pm 23^{\circ}$ , being 50% higher than the minimum required by Brazilian regulations at this age and being within the limits of other international standards. Furthermore, at the same age, the CEB was approved in all the requirements established by NBR 10834/2013, resisting 4 MPa and absorbing 21.18 % of water, being able to be used in the execution of masonry without a structural function. With this validation, it is estimated that 38 million CEBs can be produced annually in the city of Rio Grande, ensuring housing for many families and preventing the three studied residues from being disposed of in a way that might contaminate the environment.

**Key-words:** *dredged soil; álcali-activated cement; CEB; soil stabilization; rice husk ash; carbide lime.*



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	22
1.2 OBJETIVO GERAL .....	25
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
2.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATÉRIA-PRIMA .....	27
2.1.1 Cinza de casca de arroz .....	28
2.1.2 Cal de carbureto.....	29
2.1.3 Material dragado.....	30
2.2 PORTO DO RIO GRANDE .....	33
2.2.1 Breve contextualização histórica e importância socioeconômica para a região .....	33
2.2.2 Aspectos geográficos e assoreamento do Canal de Acesso .....	35
2.2.3 Definição e histórico de dragagem.....	38
2.2.4 Relação entre atividades de dragagem e os surgimentos de lama na Praia do Cassino .....	41
2.3 BLOCO DE TERRA COMPRIMIDA (BTC) .....	46
2.3.1 Normatização brasileira.....	49
2.3.2 Avaliação de desempenho.....	50

2.3.3 Dosagens recomendadas para confecção de BTCs .....	51
2.4 MELHORAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS ATRAVÉS DE MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS .....	53
2.5 LIGANTES ÁLCALI ATIVADOS .....	56
2.5.1 Materiais precursores .....	59
2.5.2 Ativador alcalino .....	60
2.5.3 Mecanismos de reação .....	61
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>64</b>
3.1 MATERIAIS .....	64
3.1.1 Cinza de casca de arroz .....	64
3.1.2 Cal de carbureto.....	68
3.1.3 Material dragado no Porto do Rio Grande em 2019 .....	71
3.1.4 Hidróxido de Sódio .....	80
3.2 MÉTODOS .....	81
3.2.1 Programa experimental .....	81
3.2.2 Projeto de experimentos .....	83
3.2.3 Variáveis investigadas.....	86
3.2.4 Definição dos níveis das variáveis de entrada.....	87
3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	91
3.3.1 Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos.....	91

3.3.2 Resistência à Compressão Simples de corpos de prova cilíndricos.....	95
3.3.3 Durabilidade por Ciclos de Molhagem e Secagem.....	96
3.3.4 Produção dos BTCs.....	98
3.3.5 Resistência à Compressão Simples de BTCs.....	101
3.3.6 Absorção de água de BTCs.....	103
3.3.7 Caracterização química por Espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX).....	103
3.3.8 Caracterização mineralógica.....	104
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.....	106
4.1.1 Projeto fatorial $2^k$ com pontos centrais.....	107
4.1.2 Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO).....	111
4.2 DURABILIDADE POR CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM.....	123
4.2.1 Análise de variância (ANOVA) do PCSO.....	125
4.2.2 Determinação do Melhor Tratamento Dentro da Região Experimental..	128
4.3 DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DOS MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DE BTCS.....	129
4.4 ANÁLISE DA MISTURA ADOTADA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA.....	130
4.4.1 Resistência à Compressão Simples.....	130
4.4.2 Ensaio de Microestrutura.....	131

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS BTCS.....	139
4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BTCS.....	141
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>143</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	149
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>150</b>

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização e zoneamento do Porto do Rio Grande (Adaptado da SUPRG, 2021). .....	36
Figura 2.2 - Localização da Praia do Cassino, Molhes da Barra, Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande e região estuária da Laguna dos Patos (Adaptado do Google Earth, 2021). .....	42
Figura 2.3 - Evento de deposição da lama na praia em 2019 (Autorial, 2019). .....	43
Figura 2.4 - Utilização de <i>overflow</i> na dragagem do canal do Porto de Rio Grande em 2018 (FERREIRA; FREITAS; LUCENA, 2019). .....	45
Figura 2.5 - (a) BTC e (b) Prensa hidráulica (Autorais, 2018). .....	47
Figura 2.6 – Parâmetros de avaliação de desempenho de BTC mais utilizados nos últimos anos (Adaptado de ANTONELLI e DOS ANJOS AZAMBUJA, 2021). .....	50
Figura 2.7 - Esquema de classificação dos materiais álcali ativados, em que a tonalidade mais escura representa maiores concentrações de metais alcalinos (Na e/ou K) (Adaptado de VAN DEVENTER et al., 2010). .....	58
Figura 2.8 - Modelo de polimerização proposto por Glukhosky (adaptado de DUXSON, et al. 2007). .....	62
Figura 3.1 – Aspecto visual da cinza de casca de arroz (AUTORAL, 2021). .....	65
Figura 3.2 – Curva granulométrica da Cinza de Casca de Arroz Silcca Nobre (Adaptado de LEON et al., 2020). .....	66
Figura 3.3 – Imagem MEV da CCA nas ampliações de (a) 50, (b) 400 vezes, (c) 1500 e (d) 5000 vezes (AUTORAL, 2021). .....	67
Figura 3.4 – Aspecto visual da Cal de Carbureto (AUTORAL, 2021). .....	68
Figura 3.5- Distribuição granulométrica da cal de carbureto (SANTOS, 2021). .....	69
Figura 3.6 - Difração de Raios X da cal de carbureto (SALDANHA, 2018). .....	70
Figura 3.7 – Imagem MEV da CC nas ampliações de (a) 400 e (b) 1500 vezes (AUTORAL, 2021). .....	71
Figura 3.8 - Local de retirada do solo em estudo (AUTORAL, 2021). .....	72
Figura 3.9 – Draga operante na retirada do material (AUTORAL, 2019). .....	72
Figura 3.10 – Solo (a) antes e (b) depois do ensaio de teor de matéria orgânica (AUTORAL, 2021). .....	73
Figura 3.11 – Curva granulométrica do solo (AUTORAL, 2021). .....	74
Figura 3.12 – Curva de compactação do solo na energia modificada (AUTORAL, 2021). ....	75

Figura 3.13 – Análise DRX do solo (AUTORAL, 2020).....	76
Figura 3.14 – Imagem MEV do solo nas ampliações de (a) 80, (b) 300, (c) 800 e (d) 1500 vezes (AUTORAL, 2021). .....	77
Figura 3.15 – (a) Secagem e (b) destorroamento do solo (AUTORAL, 2021). .....	80
Figura 3.16 – Solução de hidróxido de sódio (AUTORAL, 2021). .....	81
Figura 3.17 – Representação (a) de um experimento $2^2$ e (B) do efeito dos fatores (k) A e B (AUTORAL, 2021). .....	84
Figura 3.18 – Pontos centrais (a) no experimento $2^2$ (b) na análise dos efeitos dos fatores (AUTORAL, 2021). .....	85
Figura 3.19 – Projeto Composto de Segunda Ordem com pontos axiais para $k = 3$ (AUTORAL, 2021).....	85
Figura 3.20 – Curva de compactação e curvas de mesmo grau de saturação da mistura com maior teor de CC (AUTORAL, 2021).....	89
Figura 3.21 – Materiais sólidos separados para mistura e moldagem (AUTORAL, 2021). ....	92
Figura 3.22 – Misturas produzidas com misturador mecânico (AUTORAL, 2021).....	92
Figura 3.23 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos (AUTORAL, 2021).....	93
Figura 3.24 – Corpos de prova para (a) ensaio de RCS e (b) ensaio de durabilidade (AUTORAL, 2021).....	94
Figura 3.25 – Cura dos corpos de prova cilíndricos (AUTORAL, 2021). .....	94
Figura 3.26 – Ensaio de RCS (AUTORAL, 2021).....	96
Figura 3.27 – Ensaio de durabilidade: (a) imersão dos CPs, (b) pesagem pós escovação e (c) escova utilizada (AUTORAL, 2021).....	97
Figura 3.28 – Produção de BTC por prensa manual (AUTORAL, 2021).....	98
Figura 3.29 – Fôrma para produção de BTC (AUTORAL, 2021). .....	99
Figura 3.30 – (a) Mistura, (b) compactação, (c) fôrma e (d) cura dos BTCs (AUTORAL, 2021). .....	100
Figura 3.31 – Dimensões de um BTC após a desforma (AUTORAL, 2021). .....	101
Figura 3.32 – (a) capeamento e (b) rompimento dos BTCs (AUTORAL, 2021).....	102
Figura 3.33 – Ensaio de MEV (AUTORAL, 2021). .....	105
Figura 4.1 – Média da resistência à compressão simples para os tratamentos do projeto fatorial $2^3$ com ponto central (AUTORAL, 2021).Figura 4.2 - Gráfico de Pareto do projeto fatorial $2^3$ com pontos centrais para RCS (AUTORAL, 2021).....	108

Figura 4.3 - Gráfico de efeitos principais para RCS do projeto fatorial 2 <sup>3</sup> (AUTORAL, 2021). .....	111
Figura 4.4 – Resistência à compressão simples dos tratamentos do PCSO (AUTORAL, 2021). .....	112
Figura 4.5 – Gráfico de efeitos principais para RCS do PCSO (AUTORAL, 2021). .....	115
Figura 4.6 – Gráfico de interações para RCS do PCSO (AUTORAL, 2021). .....	116
Figura 4.7 – Significância da relação entre x e y do modelo de regressão para RCS (AUTORAL, 2021). .....	117
Figura 4.8 - % de variação explicada pelo modelo para RCS (AUTORAL, 2021). .....	118
Figura 4.9 – Superfícies de resposta para RCS (AUTORAL, 2021). .....	118
Figura 4.10 – Gráfico de contorno da variáveis para RCS (AUTORAL, 2021). .....	119
Figura 4.11 – Gráficos de resíduos do PCSO para RCS (AUTORAL, 2021). .....	120
Figura 4.12 – Determinação do melhor tratamento dentro da região experimental para RCS (AUTORAL, 2021). .....	121
Figura 4.13 – Melhor tratamento, ponto ótimo, região experimental e de operabilidade (adaptado de PULIDO et al., 2012). .....	122
Figura 4.14 – Perda de Massa Acumulada (PMA) ao longo dos ciclos (AUTORAL, 2021). .....	124
Figura 4.15 – Efeito de interação entre os fatores para durabilidade (AUTORAL, 2021). ...	126
Figura 4.16 – Gráfico de efeitos principais para PCSO de durabilidade (AUTORAL, 2021). .....	127
Figura 4.17 – Tratamento 15 (a) antes e (b) após 12 ciclos de molhagem e secagem (AUTORAL, 2021). .....	129
Figura 4.18 – RCS <i>versus</i> tempo de cura para a mistura ótima (AUTORAL, 2021). .....	131
Figura 4.19 – DRX do solo e da mistura ótima em relação ao tempo de cura (AUTORAL, 2021). .....	132
Figura 4.20 – Imagem de MEV com ampliação de 1500 vezes da mistura curada por 7 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021). .....	135
Figura 4.21 - Imagem de MEV com ampliação de (a) 11.000 e (b) 45.000 vezes da mistura curada por 7 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021). .....	136
Figura 4.22 - Imagem de MEV com ampliação de 400 vezes da mistura curada por 7 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021). .....	136

Figura 4.23 - Imagem de MEV com ampliação de 1500 vezes da mistura curada por 90 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).....	137
Figura 4.24 - Imagem de MEV com ampliação de 400 vezes da mistura curada por 90 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).....	138
Figura 4.25 – Amostras secas ao ar livre (AUTORAL, 2021).....	140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Histórico de dragagem no Porto do Rio Grande (AUTORAL, 2021).....	41
Tabela 2.2 - Períodos de dragagem no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande e datas dos eventos de deposição de lama na praia do Cassino (Adaptado de MIRLEAN; CALLIARI; JOHANNESSON, 2020).....	44
Tabela 2.3 – Quadro-resumo dos limites especificados para fabricação de BTC pela ABNT (Adaptada da NBR 10834/2013).....	50
Tabela 2.4 – Limites de resistência à compressão determinados pelas principais normativas internacionais de BTCs (Autorial, 2021).....	51
Tabela 3.1 – Propriedades físicas da Cinza de Casca de Arroz (Adaptado de LEON et al., 2020). .....	65
Tabela 3.2 – Composição da Silcca Nobre (SILCCA, 2021).....	66
Tabela 3.3 – Composição química elementar da Cinza de Casca de Arroz determinada por FRX (Adaptado de SILCCA, 2021).....	67
Tabela 3.4 – Propriedades da CC da White Martins Gases Industriais S.A. (SALDANHA, 2018).....	70
Tabela 3.5 – Propriedades do solo dragado (AUTORAL, 2021).....	74
Tabela 3.6 – Composição química elementar em peso do material dragado (AUTORAL, 2021). .....	78
Tabela 3.7 – Análise FRX para elementos traço em PPM (AUTORAL, 2021).....	79
Tabela 3.8 – Resumo do programa experimental (AUTORAL, 2021). ....	83
Tabela 3.9 – Resumo das variáveis estabelecidas para os programas experimentais PCSOs e seus níveis (AUTORAL, 2021).....	88
Tabela 3.10 – Teor de álcalis em relação ao peso de precursor (AUTORAL, 2021).....	90
Tabela 4.1 – Níveis das variáveis controláveis para cada tratamento do projeto fatorial 2 <sup>3</sup> com ponto central (AUTORAL, 2021). ....	107
Tabela 4.2 - Tabela ANOVA do projeto fatorial 2 <sup>3</sup> para RCS (AUTORAL, 2021). ....	109
Tabela 4.3 – PCSO para Resistência à Compressão Simples (AUTORAL, 2021). ....	112
Tabela 4.4 – Tabela ANOVA para RCS do PCSO (AUTORAL, 2021).....	114
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de durabilidade referente a PMA por tratamento (AUTORAL, 2021).....	123
Tabela 4.6 – ANOVA para PCSO de PMA (AUTORAL, 2021).....	125

Tabela 4.7 – Valores de RCS frente ao tempo de cura para a mistura ótima (AUTORAL, 2021). .....	130
Tabela 4.8 – Resistência à compressão simples dos blocos (AUTORAL, 2021). .....	139
Tabela 4.9 – RCS em relação a umidade de cura (AUTORAL, 2021). .....	141
Tabela 4.10 – Absorção de água dos BTCs (AUTORAL, 20201). .....	141

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	Área Superficial específica
BTC	Bloco de Terra Comprimida
CC	Cal de Carbureto
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DNPVN	Departamento Nacional de Portos Vias Navegáveis
DRX	Difração de Raios-X
FAOSTAT	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FRX	Fluorescência de Raios-X
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>

IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NBR	Norma Brasileira
PCSO	Projeto Composto de Segunda Ordem
PE	Estado de Pernambuco
PMA	Perda de Massa Acumulada
RCS	Resistência à Compressão Simples
RS	Estado do Rio Grande do Sul
SC	Estado de Santa Catarina
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SUPRG	Superintendência do Porto do Rio Grande
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UPF	Universidade de Passo Fundo

**LISTA DE SIMBOLOS**

AA	Absorção de água (%)
D	Diâmetro efetivo (m)
Dm	Diâmetro médio (m)
CC/PR	Teor de cal no precursor (%)
m1	Massa do corpo de prova seco (g)
m2	Massa do corpo de prova saturado
PR/solo	Relação em peso entre quantidade de material precursor e solo (%)
Q	Carga máxima aplicada (N)
q <sub>u</sub>	Resistência à compressão simples (MPa)
S	Seção da face de trabalho (m <sup>2</sup> )
SA	Concentração da solução ativadora (mol, %)
t	Tempo de cura (dias)
TC	Temperatura de cura (°C)
w	Teor de umidade (%)
γ	Peso específico aparente natural (kN/m <sup>3</sup> )
γ <sub>d</sub>	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )
γ <sub>s</sub>	Peso específico real dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )
η	Porosidade (%)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O Brasil se caracteriza por ser um país de extensa costa marítima, possuindo mais de 8.000 km de linha costeira contínua, classificada como uma das maiores do mundo. Ao longo da sua faixa litorânea estão distribuídos 99 portos e terminais marítimos, que operam praticamente em sua totalidade para o comércio internacional, movimentando 90% dos produtos exportados pelo país (SOPESP, 2020). O transporte marítimo é o modal que oferece maior capacidade de carga aliada a um menor custo, podendo transportar qualquer tipo de produto, conquanto que à custa de intensas e constantes atividades potencialmente impactantes para a natureza, sendo classificado desde 1996 pela Política Nacional do Meio Ambiente, como um dos fatores de maior risco ambiental na zona costeira brasileira (GRANATO, 2005; ISOTTON, 2009).

Diante deste cenário, nota-se a emergência - de forma natural- de interesses coletivos antagônicos num ambiente comum, isto é, de um lado grupos defendem a economia e de outro, a preservação ambiental, configurando o conceito de conflito ambiental acerca das atividades portuárias. Contextualizado isso, introduz-se o ponto de partida da problemática deste trabalho, que é o conflito ambiental por dragagem do Porto do Rio Grande.

De acordo com Theodoro (2005), os conflitos ambientais por dragagem portuária geralmente se referem ao nível de contaminação dos sedimentos retirados e/ou sobre o seu local de disposição final, visto que estas são atividades que podem gerar danos à biota aquática e, conseqüentemente, refletir sobre a qualidade de vida de atores regionais. Entretanto, especialmente no Porto do Rio Grande, o conflito é acentuado pelo fato da cidade abrigar um balneário turístico e pesqueiro, a Praia do Cassino, nas adjacências do canal de acesso ao Porto, qual é acometido por eventos lamíticos poluidores durante e após atividades de dragagem, associados por alguns estudiosos ao próprio processo.

Desde 1972 pesquisadores vêm tentando descobrir os grandes responsáveis pelo aparecimento dos bolsões de lama na orla da praia. Investiga-se se são fatores de natureza antrópica ou se

advém dos aspetos geográficos e de hidrodinâmica estuarina da região, polarizando ainda mais o conflito. Contudo, para este trabalho, apesar da discussão ser fundamental para que se trace um panorama da problemática, torna-se meramente retórica, sendo o ponto fulcral do estudo o desenvolvimento de uma alternativa de disposição final do material dragado. Promove-se assim, a reutilização de um resíduo com potencial para se tornar matéria-prima na indústria da construção civil e evita-se que o mesmo seja lançado ao mar.

A gestão de materiais oriundos de processos de dragagem é uma preocupação ambiental e econômica não só em um nível local, mas para muitos países, principalmente sua disposição final, qual é regida por leis internacionais rigorosas (SAMARA et al., 2009; SIHAM et al., 2008). Por isso, o estado da arte sobre alternativas de reutilização desse tipo de resíduo, apesar de recente, torna-se cada vez mais rico. Na maioria das pesquisas encontradas para o embasamento teórico deste trabalho, o material dragado é previamente beneficiado por algum processo de melhoramento de suas propriedades físicas, químicas e/ou mecânicas, e quando necessário, de remediação, para após ser reutilizado, tendo destaque em aplicações no âmbito da engenharia civil na área de pavimentação e alvenaria.

Desta feita, optou-se pela técnica de BTC (isto é, Bloco de Terra Comprimida) estabilizado a partir de algum agente cimentante, como nova destinação para o material dragado no Porto do Rio Grande. Técnica essa, já consolidada na literatura por trabalhos como o de Wang et al. (2015), Samara et al. (2009), Silva et al. (2014; 2015), Soares et al. (2016), entre outros. Ademais, o BTC traz outras vantagens, como o fato de não passar pelo processo de queima dos tijolos tradicionais, de já ser normatizado pela ABNT e de ser facilmente industrializável (SILVA et al., 2015).

A despeito da escolha pela estabilização através de um agente químico, isto é, material cimentante, faz com que o BTC seja mais resistente tanto às solicitações de projeto, quanto ao contato direto com a água, como à exposição a chuva, sem precisar que seja protegido por grandes beirais ou elevado do solo, como quando aplicado na arquitetura vernacular. Este tipo de estabilização é de uso comum no âmbito de melhoramento de solos, principalmente a partir do emprego de materiais como o cimento Portland e a cal, alicerçando-se como uma técnica

atrativa por melhorar propriedades como resistência, permeabilidade, compressibilidade e durabilidade.

Entretanto, como aponta Lotero Caicedo (2020) o alto consumo e projeções do uso destes materiais cimentantes estão chamando atenção de diversos setores nos últimos anos, entre eles pesquisadores, órgãos governamentais e ambientais, posto que a produção do cimento Portland e a extração mineral de cal estão relacionadas com exploração de recurso natural, geração de emissões sólidas e gasosas (principalmente de dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>), alto consumo energético e uso de combustíveis fósseis.

Ou seja, continuar fazendo o uso de materiais cimentantes convencionais vai a contramão ao cunho ambiental preconizado por esta pesquisa e às inovações por parte da ciência dos materiais nos últimos tempos. Com isso, entra-se no segundo e último ponto principal deste trabalho: estabilização do solo por meio da álcali ativação. Esta técnica, além de produzir agentes cimentantes a partir de um baixo consumo energético e baixa emissão de CO<sub>2</sub>, possibilita a reutilização e monetização de outros resíduos (BRUSCHI, 2020).

Neste sentido, buscar-se-á avaliar a possibilidade de ativar alcalinamente a cal de carbureto e a cinza de casca de arroz, resíduos industriais com potencial por três significativos motivos: (i) por serem encontrados amplamente no estado do Rio Grande do Sul e região próxima ao Porto do Rio Grande; (ii) por suas composições químicas reativas e suas propriedades físicas; (iii) com o amparo de que no contexto da engenharia geotécnica, estes resíduos já vêm sendo aplicados em solos artificialmente cimentados, e que diversos autores já verificaram sua aplicabilidade (CONSOLI et al., 2019; LEON et al., 2020; CONTI, 2018; SALDANHA et al., 2018; LOTERO CAICEDO, 2020) constatando melhoras em propriedades mecânicas de resistências, rigidez e durabilidade.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo geral produzir um bloco para alvenaria (tipo BTC) reutilizando o material dragado do Porto do Rio Grande estabilizado por meio de um cimento alternativo, produzido a partir de resíduos industriais encontrados na região: cinza de casca de arroz e cal de carbureto, através da técnica de ativação alcalina.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- a. Determinar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas da porção de material dragado no Porto do Rio Grande concedida a Universidade Federal do Rio Grande;
- b. Avaliar a influência de diferentes proporções e quantidades de precursores e solução ativadora, em relação a resistência à compressão simples e durabilidade por ciclos de molhagem e secagem da mistura, com base em análises de superfície de resposta, e, determinar as dosagens que apresentam a melhor resposta dentro do projeto experimental para estas duas variáveis de saída;
- c. Analisar a evolução da resistência à compressão simples da mistura escolhida para confecção dos BTCs em diferentes tempos de cura, bem como sua microestrutura, identificando os produtos de reações formados, de forma a tentar validar a álcali ativação para estabilização de solos;
- d. Avaliar o desempenho mecânico dos BTCs através de ensaios de compressão uniaxial e de absorção de água em diferentes tempos de cura.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa está organizada em 5 capítulos. O **capítulo 1** é introdutório, apresenta a pesquisa, delimita o que será estudado, indica os objetivos que se pretendem alcançar, justifica e conceitua a relevância do tema definido.

O **capítulo 2** aborda a revisão da literatura consultada acerca dos assuntos considerados valiosos para compreensão do estudo. Logo, explora os principais pontos para o entendimento do conflito ambiental acometido pelas dragagens no Porto do Rio Grande, a reutilização de resíduos (agro) industriais para produção de novos materiais de construção, e o BTC como alternativa de aplicação dos materiais em estudo. Ademais, apresenta um compilado bibliográfico relativo à estabilização de solos por agentes cimentantes, em especial, por meio da técnica de álcali ativação.

No **capítulo 3** expõe-se o programa experimental e a metodologia aplicada a fim de se atingir os objetivos traçados pela pesquisa. Para tanto, descreve os materiais utilizados, define os fatores investigados pelos projetos de experimentos e os procedimentos de ensaio.

O **capítulo 4** apresenta os resultados obtidos, mas não só, pois traz consigo discussões e análises decorrentes dos mesmos. Por fim, no **capítulo 5** apresentam-se as principais conclusões obtidas com esta pesquisa e direcionam-se sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa apresentar ao leitor os principais fundamentos necessários à compreensão do tema estudado, com base em revisões literárias. Destarte, serão compreendidos os três resíduos regionais reaproveitados neste trabalho (cinza de casca de arroz, cal de carbureto e material dragado), os principais pontos que tangem à problemática da dragagem no Porto do Rio Grande, a confecção de BTCs a partir do reuso destes materiais e os processos de álcali ativação e estabilização química de solos argilosos por meio desta técnica.

### 2.1 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATÉRIA-PRIMA

A indústria da construção civil, apesar do seu reconhecimento como fundamental dentro da perspectiva de desenvolvimento econômico, é também a indústria que mais polui o planeta no século XXI, absorvendo de 50% a 75% de todos os recursos extraídos da crosta terrestre e consumindo entre 40 e 50% da energia consumida em cada país (DU PLESSIS, 2002; JOHN; SJÖSTRÖM; AGOPYAN, 2001).

Em destaque, no subsetor de materiais de construção, a cadeia produtiva por si só, tem um impacto significativo que precisa de atenção para que seja mitigado. Por exemplo, só a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera e por 3% das emissões mundiais de gases de Efeito Estufa (DEJA; ULIASZ-BOCHENCZYK; MOKRZYCKI, 2010; YANG et al., 2014).

Ademais, como qualquer atividade industrial, a fabricação de materiais de construção acaba por produzir resíduos não inerentes aos objetivos da produção em si, e sua redução muitas vezes é tecnicamente limitada. Considerando todos esses fatores, propõe-se que o melhor caminho a ser seguido é a reutilização dos resíduos já produzidos como matéria-prima para novos produtos. Desta feita, preservam-se recursos naturais, bem como gera a redução de sua própria energia de consumo e evita que o mesmo seja disposto de maneira que talvez contamine o ambiente.

Por conseguinte, os próximos subitens buscam discorrer sobre os três resíduos reaproveitados neste trabalho: cinza de casca de arroz, cal de carbureto e material dragado.

### 2.1.1 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) é um resíduo agroindustrial proveniente do beneficiamento do arroz. Estima-se que para cada tonelada de arroz, 23% correspondem a casca e 4% a cinzas (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

Para se ter uma ideia da quantidade de CCA gerada no país anualmente, segundo os dados do IBGE (2019) no ano de 2019, o Brasil produziu 10.368.611 de toneladas de arroz com casca, sendo o 12º maior país produtor do grão no mundo (FAOSTAT, 2019). Através desses dados, pode-se fazer uma avaliação de que 2,4 milhões de toneladas de casca foram geradas como resíduo, e que cerca de 400.000 toneladas de cinzas poderiam ter sido produzidas a partir da incineração de toda a casca proveniente da colheita só naquele ano.

Mudando o enfoque para uma análise regional, entre as unidades da federação brasileira, o estado do Rio Grande do Sul (RS) foi classificado como o maior produtor nacional de arroz (IBGE, 2019). Ainda, segundo a Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE (2019), o RS registrou em média, no período de 2016 a 2018 uma produção de 8.209.443 toneladas do grão. O município de Santa Vitória do Palmar (vizinho a Rio Grande) foi um dos 12 principais produtores do país, apresentando produção média superior a 200.000 toneladas/ano neste período.

O arroz é um dos itens de destaque na pauta de exportações gaúchas (IBGE, *op. cit.*) e não por acaso, em 2021, o Porto do Rio Grande inaugurou um terminal exclusivo para sua exportação, com capacidade de armazenamento para 60 mil toneladas do grão, chamado de Terminal Logístico do Arroz. Em que pese os grandes números de produção, o produto final gerado pelo beneficiamento do arroz, a CCA ainda é considerada como resíduo e na maioria das vezes, e disposta de maneira insatisfatória sob o ponto de vista ambiental e econômico em aterros (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

A despeito da reutilização desse resíduo, de acordo com Leon et al. (2020), a CCA tem grande potencial para ser utilizada como fonte de material precursor para a álcali ativação na técnica de solos artificialmente cimentados, em substituição parcial do cimento Portland, devido à alta concentração de  $\text{SiO}_2$  acumulada pela planta de arroz - contendo aproximadamente de 95 a 98% de sílica no estado amorfo (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

Neste sentido, diversos autores já comprovaram que a CCA é uma ótima fonte alternativa de sílica (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; DELLA et al., 2006; FOLETTTO et al., 2005) e incluso verificaram sua aplicabilidade em solos artificialmente cimentados (CONSOLI et al., 2019, 2020; LEON et al., 2020; CONTI, 2018) constatando melhoras em propriedades mecânicas de resistências, rigidez e durabilidade de misturas de solo-cimento.

### 2.1.2 Cal de carbureto

A cal de carbureto (CC) é um resíduo industrial também encontrado no estado do Rio Grande do Sul, proveniente da produção do gás acetileno – o qual é obtido através da hidrólise do carbonato de cálcio. Este não é um resíduo meramente regional, sendo seu descarte ou reutilização, um problema mundial. Segundo Saldanha et al. (2018), na época vinham sendo produzidas 17.100 toneladas por ano de CC só no Brasil e 1.423.000 toneladas por ano em todo o mundo, com previsão de que este valor aumentasse em 3% até 2020.

Em particular, a CC demanda cuidados especiais no que tange seu gerenciamento e disposição, visto que possui um potencial poluidor por sua alta alcalinidade, e também por ser possível apresentar metais pesados tóxicos (Cu, Pb, Mn, Ni e Zn) na sua composição - como encontrados por Ramasamy (2002). Em relação a sua reutilização, devido à grande quantidade de hidróxido de cálcio livre em sua composição e a baixa presença de impurezas, a reciclagem de CC tem grande potencial para substituir o uso da cal comercial proveniente da calcinação de rochas calcárias (LOTTERO CAICEDO, 2020).

Na engenharia geotécnica, este resíduo vem sendo utilizado na estabilização química de diferentes solos, melhorando suas propriedades tanto a curto prazo (através de aglomeração, floculação, troca catiônica e possível carbonatação), quanto à longo prazo (em reações

pozolânicas). Assim como para a CCA, diversos autores verificaram a aplicabilidade da CC na estabilização de solos (CONSOLI et al., 2019; LOTERO CAICEDO, 2020; LEON et al., 2020; SALDANHA et al., 2018; HORPIBULSUK et al., 2013; PHUMMIPHAN et al., 2016;) e constataram melhoras em propriedades mecânicas como resistência, rigidez e durabilidade.

### 2.1.3 Material dragado

A dragagem é uma atividade essencial para a indústria portuária, tratando-se de um processo de retirada de sedimentos (isto é, material dragado) para aprofundamento e/ou manutenção da profundidade de canais e berços, proporcionando uma navegação segura. Com o passar dos anos, o volume de material dragado nos portos mundialmente aumentou, tanto pela demanda por embarcações maiores - e consequentemente calados maiores-, quanto pelo aumento da taxa de sedimentação de alguns canais relacionadas a atividades industriais cada vez mais próximas (TORRES, 2000; REKIK et al., 2009), dificultando ainda mais a gerência desses materiais.

Notoriamente, a gestão de materiais oriundos de processos de dragagem é uma preocupação ambiental e econômica para muitos países, principalmente após as diretivas da União Europeia (Convenção de OSPAR, Paris em 1992), em que as leis internacionais de disposição final destes sedimentos resultaram mais rigorosas (SAMARA et al., 2009; SIHAM et al., 2008).

No Brasil, os sedimentos de dragagem são classificados e analisados como resíduos sólidos de acordo com a NBR 10004/2004. Ademais, desde 2012 existe uma resolução estabelecida pelo CONAMA (resolução CONAMA N° 454, de 1° de novembro de 2012) qual estabelece diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento desses materiais em águas sob jurisdição nacional e a sua disposição final. Ambas as regulamentações determinam que apenas materiais classificados como limpos ou moderadamente contaminados podem ser dispostos em corpos hídricos abertos, já os materiais classificados como contaminados devem ser dispostos em local confinado e monitorados.

Outro fim para os resíduos de dragagem é a sua reutilização após passar por algum processo de melhoramento de suas propriedades físicas, químicas e/ou mecânicas, e quando necessário, de remediação. Apesar de países como Estados Unidos, França e China incentivarem cada vez

mais pesquisas e projetos sobre uso benéfico de material de dragagem estabilizado, a reutilização ainda é pouco disseminada na prática, como apontam dados de Wang (2015), em que centenas de milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos marinhos foram dragados em todo mundo e menos de 1% reciclados.

Tratando-se de volume de material dragado no Brasil, segundo Simões (2009), o país é responsável pela dragagem anual de uma média de dezenas de milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos. Já em relação ao uso benéfico dos rejeitos de dragagem, as diretriz nacional (resolução do CONAMA) estabelece que podem ser utilizados - após análise e avaliação ambiental prévia- em obras de engenharia, como: (i) criação e melhoria do terreno, recomposição e engordamento artificial de praias, estabilização da linha de costa, margens de rios e controle de erosão, bermas offshore, material de capeamento e preenchimento de células sedimentares, aterro para portos, aeroportos, ancoradouros, construção de diques, barragens e rodovias; (ii) na construção civil e indústria; (iii) usos na agricultura e aquicultura; (iv) em melhorias ambientais - restauração e estabelecimento de áreas úmidas, ilhas de nidificação, pesca, recuperação de solo, recuperação de áreas degradadas, recuperação de margens erodidas.

No âmbito da engenharia geotécnica, o estudo da estabilização artificial de solos argilosos através de agentes cimentantes é destacado desde a década de 60 (SHERWOOD 1957, 1962; MCDOWELL 1959; TAYLOR; ORMAN, 1960). No entanto, pesquisas sobre estabilização química de sedimentos de dragagens são mais recentes e por isso ainda restritas. Cabe citar: Brandl (1981), Locat et al. (1996), Rajasekaran e Narashima Rao (1997) e Tang et al. (2001).

Dentro do estado da arte que trata sobre estabilização de materiais oriundos de dragagem, encontra-se: (i) principalmente estudos que misturam o sedimento com cimento comercial, avaliando propriedades físicas como plasticidade, resistência à compressão, rigidez ou durabilidade, em diferentes idades de cura, para diferentes teores de água/cimento (TANG et al. 2001; KANG et al. 2015; FEDERICO et al. 2015), (ii) alguns estudos voltados para técnicas específicas como *Jet Grouting* (LEE et al. 2005), (iii) outros que abrangem tanto ensaios de laboratório, quanto em campo, como o melhoramento de uma camada de argila marinha dragada na Coreia (YUN et al. 2006).

Por sua vez, a literatura indica que na prática, a reutilização de materiais argilosos de dragagem estabilizados com agente cimentante, como qualquer outro solo coesivo, apresenta baixa resistência, na faixa de 100 kPa a 500 kPa (KANG et al. 2015). E por isso devem ser aplicados em projetos que demandem uma solicitação de acordo, como materiais de preenchimento em geral: preenchendo paredes de cais, barreiras artificiais, aterros, entre outros.

Hoje em dia, a maior concentração de estudos de aplicabilidade de rejeitos de dragagem estabilizados é na área da pavimentação, servindo como material para fundação e base de estradas, pelo fato de tanto a oferta, quanto a demanda de materiais disponíveis e necessários serem de grande volume. Inclusive, na França, segundo Siham et al. (2008), materiais grosseiros de dragagem são uma das principais alternativas na construção de estradas, visto o esgotamento dos recursos naturais e a dificuldade de abrir novas pedreiras.

Em relação à produção acadêmica, inúmeros trabalhos já foram publicados utilizando materiais dragados para este mesmo fim: Rekik et al. (2009) estudaram a resistência do material variando o teor de cimento e o tempo de cura, Siham et al. (2009) utilizaram além do cimento uma correção granulométrica com areias, Wang et al. (2012) compararam os efeitos da estabilização com cimento e com cal, Wang et al. (2017) introduziram cinza volante junto com o cimento hidráulico, Silitonga et al. (2009, 2010) utilizaram apenas cinza volante como agente cimentante e Zentar et al. (2008) fizeram correção granulométrica através de sedimento de areia também dragado, além de adicionarem 6% de cimento e 2% de cal à mistura.

Outra aplicação apontada como economicamente competitiva à reutilização do material dragado, é a produção de blocos estabilizados, BTCs ou tijolos - técnica incluso proposta para este trabalho. Neste âmbito em específico, pode-se referenciar o estudo de Wang et al. (2015) qual contempla a reutilização de vários outros resíduos para estabilização de blocos, além do dragado, como: concreto esmagado, lixo urbano incinerado, cinza volante, cimento, conchas, entre outros, encontrando uma mistura otimizada e dentro dos padrões dos blocos comerciais. Além disso, a eficácia da técnica já havia sido demonstrada por Samara et al. (2009), inerente ao caso de materiais dragados contaminados - não raro de se encontrar-, qual comprovam através de um experimento industrial em larga escala, que a confecção de tijolos utilizando o

sedimento (tratado pelo método Novosol®) respeita as especificações ambientais e atinge os valores comerciais.

Comenta-se por fim, que entendida a viabilidade e importância de reutilização tanto do material dragado, quanto da CCA e CC, os três materiais utilizados neste trabalho, passamos para o próximo subitem, que irá contextualizar a região em estudo e o conflito ambiental ali estabelecido. O item 2.2 se relaciona com o item 2.1 por corroborar com a relevância de iniciativas deste cunho, em especial na cidade de Rio Grande.

## 2.2 PORTO DO RIO GRANDE

O Porto do Rio Grande estabelece-se como um porto marítimo público de grande porte, especificamente localizado a 32°07'20" S e 52°05'36" O de *Greenwich* no município de Rio Grande, no litoral sul do estado do Rio Grande do Sul. Refere-se ao porto marítimo mais meridional do Brasil, encontrando-se na margem oeste do Canal do Norte, que é o escoadouro natural de toda a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos (DUARTE, 1997; WREGGE, 2009).

De acordo com os últimos dados encontrados da ANTAQ (2019), o Porto do Rio Grande é o 3º porto público de maior movimentação de carga do Brasil. Estima-se que 21 unidades da federação usam esse porto para transações internacionais, mas suas principais áreas de influência estão no Rio Grande do Sul, São Paulo, Santa Catarina e Paraná. Suas exportações e importações são conhecidas principalmente pela diversidade, movimentando desde adubos e fertilizantes, passando por grãos e madeiras, até itens para indústria automobilística e produtos da indústria mecânica.

### 2.2.1 Breve contextualização histórica e importância socioeconômica para a região

Segundo a Superintendência dos Portos (2021), a primeira atividade de navegação que se tem registro na barra do Rio Grande data de 1737, quando o Brigadeiro José da Silva Paes chegou para povoar a região. Entretanto, somente por volta de 1850 surgiu um pequeno porto localizado onde hoje é o Porto Velho, no centro da cidade.

Condições naturais como águas protegidas, bom calado, baixa amplitude de maré, grande área para expansão e para o retroporto, aliadas ao potencial econômico da região, como o Distrito Industrial do Rio Grande, foram os motivos que levaram mais tarde, em 1910, o Governo Federal a escolher Rio Grande para sediar as atuais instalações portuárias e o complexo industrial a ele anexo, denominado como Porto Novo (TORRES, 2000).

A seu turno, aspectos geográficos favoráveis fizeram com que o Porto do Rio Grande se consolidasse como estratégico, atuando fortemente no extremo sul do Brasil. Com o passar dos anos, a importância econômica do Porto do Rio Grande tornou-se um reflexo direto da economia do Rio Grande do Sul, como mostram dados da Superintendência dos Portos (2007), em que 90% de todos os produtos produzidos na região com destino a exportação passavam por ali.

Numa perspectiva acadêmica, estudiosos do tema como Burgueño (2009), coincidiram a considera-lo como o principal fator para o desenvolvimento da metade sul do Rio Grande do Sul, e também o apontou como forte candidato a assumir as funções de um porto concentrador de cargas (*hub port*) para o chamado Cone Sul da América do Sul (Conesul), o futuro da logística portuária. Neste contexto, Alfredini (2005) notadamente afirmou que o Porto do Rio Grande já apresentava condições para tornar-se *hub port*, especialmente concentrador de cargas gerais, soltas e containerizadas, estando na mesma lista que portos como o de Montevideú (UY) e o de Buenos Aires (AR).

Atualmente o Porto do Rio Grande possui um calado de acesso de 18 m e de 15 m nos seus terminais, sendo este último superior ao correspondente nos portos argentinos (GOV, 2020; SUPRG, 2021). Ele ainda é tido como uma promessa a se tornar um dos primeiros *hub ports* brasileiros, junto com o porto de Itapoá (SC) e Suape (PE). Além disso, se destaca entre os portos mais importantes do continente americano em produtividade e é considerado o segundo porto mais importante para o desenvolvimento do comércio internacional brasileiro (SUPRG, 2021).

### 2.2.2 Aspectos geográficos e assoreamento do Canal de Acesso

O município de Rio Grande está situado na planície costeira do Rio Grande do Sul, na parte inferior do estuário da laguna dos Patos, numa costa arenosa, retilínea e baixa, sendo uma das mais amplas planícies costeiras do Brasil (BURGUEÑO, 2009). Como já comentado, é nesta cidade gaúcha em que se encontra o porto do Rio Grande, bem como seu distrito industrial, especificamente, na costa oeste da enseada que conecta o estuário com o Oceano Atlântico Sul, a sudoeste da embocadura da laguna dos Patos (MIRLEAN; CALLIARE; JOHANNESSON, 2020; TORRES, 2000).

O canal navegável do Porto do Rio Grande, área que demanda dragagens periódicas para que haja o fluxo de entrada e saída de navios no porto, e por isso local de relevância nesta pesquisa, localiza-se exatamente na extremidade da laguna dos Patos, em sua conexão com o oceano, possuindo 18 km de extensão (Figura 2.1). O canal é limitado desde a embocadura até a cidade de São José do Norte, aproximando-se da margem de Rio Grande no trecho entre o pontal oeste da barra e o pontal da Mangueira (TORRES, 2000; SUPRG, 2021). Sua entrada é amparada por dois molhes de aproximadamente 4 km de extensão e 1 km de distância (BURGUEÑO et al., 2008).

Já a laguna dos Patos, protagonista da geografia da região do Porto do Rio Grande neste trabalho, localiza-se entre as coordenadas 30° e 32° S, tendo orientação no sentido NE – SO. Possui aproximadamente 250 km de extensão, largura média de 40 km e 5 m de profundidade, sendo classificada como uma laguna rasa. Evidencia-se imponente por sua área, como se vê na Figura 2.1 – de aproximadamente 10.360 km<sup>2</sup>-, compondo a maior área lagunar da América Latina e classificando-se como a maior laguna costeira do tipo estrangulada do mundo (BURGUEÑO, 2009; MÖLLER, 1996).

A laguna se caracteriza, também, por receber água doce dos rios que afluem no Guaíba (Jacuí/Taquari, Caí, Sinos, Gravataí e Velhaco), e que desaguam diretamente nela: Camaquã e Pelotas, representando um escoadouro natural da bacia hidrográfica da Lagoa dos Patos para o oceano (TORRES, 2000; MÖLLER et al., 2010). Além disso, por receber a entrada de água marinha (salgada) para o seu interior, configura um ambiente estuarino e estabelece-se como

laguna – apesar de ser denominada em muitos mapas como Lagoa dos Patos (OLIVEIRA, 2014).

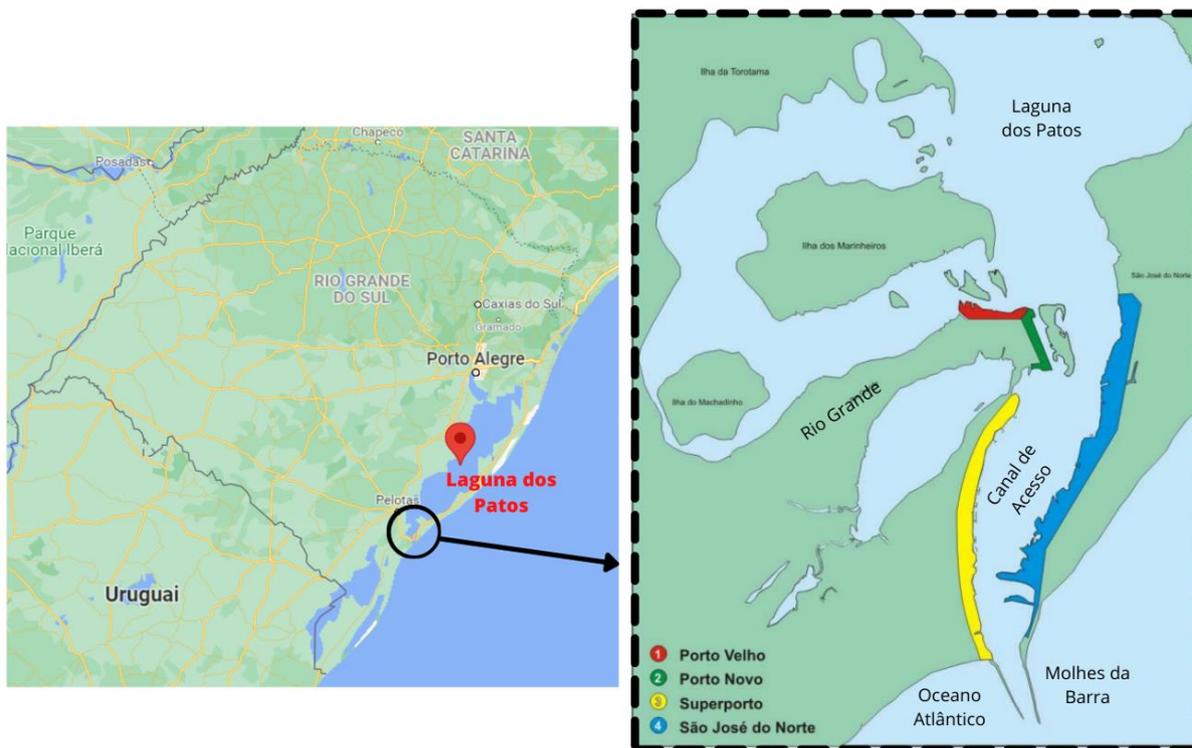


Figura 2.1 - Localização e zoneamento do Porto do Rio Grande (Adaptado da SUPRG, 2021).

Neste sentido, estima-se que a bacia drene uma área aproximada de 200.000 km<sup>2</sup>, e como revés, mais de um 1.000.000 m<sup>3</sup> de sedimentos acabam por ser carreados e desembocam na região estuarina (BAISCH, 1994). A maioria dos autores, como veremos ao decorrer deste capítulo, associam o assoreamento do Canal do Porto a este fato. Acrescenta-se neste ponto, em que pese a grande importância da descarga fluvial sobre a hidrodinâmica da laguna, e também o único fator detalhado neste trabalho, de acordo com Möller (1996) e Möller et al. (2009), a hidrodinâmica depende também e principalmente, da ação dos ventos, da passagem de frentes e da relação entre esses três fatores.

Outro aspecto importante sobre a laguna é o formato de sua desembocadura, qual apresenta um afunilamento natural no canal do Porto do Rio Grande em direção ao mar, sendo hiperbolizada pela obra de construção e de ampliação dos molhes da barra – que tiveram como objetivo fixar a desembocadura do canal. Como resultado, a geometria formada acabou propiciando a

intensificação das correntes de vazão, e com isso, um aumento de volume de material retirado nas operações de dragagem (OLIVEIRA, 2014).

Ademais, como acontece em geral em zonas portuárias, há muitas fontes de contaminação na região, pontualmente no Porto do Rio Grande tem-se em destaque: (i) a atividade agrícola do estado, as margens da laguna ou nos rios que desaguam na mesma; (ii) os efluentes domésticos dos centros urbanos de Pelotas e Rio Grande (BAUMGARTEN et al. 2001); e (iii) as atividades industriais do próprio complexo portuário, que contribuem significativamente na contaminação das águas e dos sedimentos do estuário (BURGUEÑO, 2009). Como exemplos de atividades potencialmente contaminantes do Porto do Rio Grande, Granato (2005) destacou a indústria de fertilizantes, a movimentação de granéis, a própria navegação, a indústria do pescado, entre outras.

Destarte, a questão dos contaminantes torna-se um fator ainda mais preocupante levando em conta os aspectos geográficos e de hidrodinâmica estuarina da região. Segundo Burgueño (2009), em épocas de elevada pluviosidade e com condições eólicas específicas, os sedimentos de fundo do canal junto com os contaminantes, são ressuspensos, transportados e distribuídos. Conseqüentemente, metais pesados, nutrientes e micronutrientes, associados sobretudo às partículas finas do solo (argila e matéria orgânica), são exportados para o oceano, prejudicando à vida aquática (BURGUEÑO, 2009; TORRES, 2000).

Em síntese, as condições geográficas naturais da região onde se encontra o Porto do Rio Grande explicam o assoreamento permanente do canal, além das ações antrópicas, principalmente através da agricultura e atividades industriais próximas, que acabam por proporcionar o aporte de sedimento para a bacia de drenagem (BURGUEÑO, 2009; TORRES, 2000). Estes fatos contribuem para a redução da profundidade do canal, obrigando o porto à realização de dragagens periódicas a cada dois ou três anos para manter a navegabilidade, e, por conseguinte, também retirando possíveis materiais contaminados (HARTMANN, 1996).

### 2.2.3 Definição e histórico de dragagem

A atividade de dragagem, conforme a lei 12.815 (BRASIL, 2013) é considerada como “obra ou serviço de engenharia que consiste na limpeza, desobstrução, remoção, derrocamento ou escavação de material do fundo de rios, lagos, mares, baías e canais”, sendo realizada através de um tipo de embarcação especial denominada “draga”. Também, de acordo com o Art. 54 desta lei, as principais funções da dragagem são o aprofundamento, alargamento ou expansão de áreas portuárias e de hidrovias, canais de navegação, bacias de evolução e de fundeio e berços de atracação, tendo como objetivo manter as condições de profundidade e segurança estabelecidas em projeto (BRASIL, *op. cit.*).

Para mais desta designação do termo dragagem, a atividade ainda é classificada em quatro tipos de acordo com a literatura técnica, destacando-se como os dois principais, dentro do contexto portuário de Rio Grande, a dragagem inicial e a de manutenção. A inicial consiste na retirada de material virgem para formação do canal inicial e infraestrutura portuária, já a de manutenção, como o próprio nome indica, acaba por retirar o material sedimentar depositado recentemente para manter a profundidade necessária (TEIXEIRA, 2009).

A dragagem é uma atividade essencial para que haja o tráfego de navios no porto, desta feita, um porto com canais de navegação e ancoragem seguros facilita as operações portuárias, movimentações de carga e descarga, além de evitar atrasos e prejuízos econômicos, sendo um fator determinante para a competitividade de um porto. Não obstante à essencialidade da atividade dentro de uma perspectiva operacional e econômica, a dragagem é classificada como uma atividade potencialmente poluidora, sendo impetuosa a obtenção de licenciamento ambiental, e por sua vez, estudos prévios ao processo, gerenciamento da atividade e de seus resíduos.

Os primeiros registros de necessidade de melhoramento do canal no Porto do Rio Grande datam de 1860, onde a profundidade da Barra não ia além de 2,20 m. Na época, muitos estudiosos diziam não haver soluções hidráulicas para o problema, contudo, em 1875, um comissionado do Governo Imperial propôs a construção de quebra-mares partindo do litoral para o oceano.

Em 1906, o engenheiro Elmer Lawrence Cortheill foi contratado pelo Governo Brasileiro para executar as obras de fixação da Barra de Rio Grande, com aprofundamento para 10 m, e a construção de dois molhes convergentes e um novo porto - hoje conhecido como Porto Novo-, mas foi somente anos depois que as obras começaram efetivamente (SUPRG, 2021).

A despeito delas, ocorreram entre 1909 e 1914, já a construção dos Molhes da Barra, em 1915, gerando 8.776.000 m<sup>3</sup> de material dragado (BURGUEÑO, 2009; GRANATO 2005). Este material foi reutilizado para a construção de ilhas e, também, depositado ao longo das margens do estuário inferior. Neste último caso, e em adicional ao grande volume de deposição natural de sedimento que acontece no estuário, acabaram por se tornar o ponto fulcral para que as atividades de dragagem se concentrem onde hoje é chamado de Canal de Acesso e nos portos marginais (GRANATO, 2005).

Em 1961 e 1962, com a modernização do modal hidroviário - em que pragmaticamente navios maiores são utilizados, demandando calados maiores aos portos - o Departamento Nacional de Portos Vias Navegáveis (DNPVN) realizou uma dragagem entre os Molhes e a Barra passando seu calado para 12 m. Por sua vez, na década de 70, seu calado foi aprofundado para 14 m e nesta dragagem, onde 703.032 m<sup>3</sup> de material foram removidos, o atual Canal de Acesso recebeu tal denominação (BURGUEÑO, 2009).

Em contraponto, os aprofundamentos do canal fizeram com que dragagens de manutenção passassem a ser necessárias e provocaram modificações nos fluxos de enchente e vazante na desembocadura e na laguna (BURGUEÑO, *op. Cit.*; HARTMANN, 1996). Destarte, entre 1980 e 1996 um total de 24.390.182 m<sup>3</sup> de sedimentos foram dragados do fundo do estuário, resultando em uma média de anual de 1,6 milhões de metros cúbicos (TORRES, 2000; GRANATO, 2005).

Passados 2 anos, entre março e agosto de 1998, houve subsequente dragagem, onde aproximadamente 2.940.000 m<sup>3</sup> de sedimentos foram retirados e depositados a cerca de 5 milhas náuticas do Molhe Oeste, em frente à praia do Mar Grosso, em uma profundidade aproximada de 13 m (TORRES, *op. cit.*). Em seguida, a dragagem de 2001 notadamente se

destacou por ser a primeira onde foram elaborados estudos de pré-dragagem e de monitoramento ambiental do processo em si (BURGUEÑO, *op. cit.*).

Similarmente, entre julho de 2003 e setembro de 2004, a operação de dragagem de manutenção removeu aproximadamente 2.900.000 m<sup>3</sup> de sedimentos (GRANATO, 2005). Na operação de 2006, também classificada como dragagem de manutenção, qual objetivava manter as condições de profundidade em 14 m, foram removidos aproximadamente de 3.000.000 m<sup>3</sup> de material oriundo do assoreamento (BURGUEÑO, 2009).

Mais a diante, em 2010 foi concluída a dragagem do canal interno do porto atingindo 16 m de profundidade, e iniciada a dragagem de aprofundamento do canal externo ao porto, área fora dos Molhes da Barra, visando atingir um calado de 18 m. Ao todo, nesta operação, foram removidos 20 milhões de m<sup>3</sup> de sedimento (BRASIL, 2013).

Em 2013, a operação de dragagem voltou a ser realizada apenas para dar manutenção ao calado, e nela foram removidos os usuais 1,6 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos (BURGUEÑO, 2009). Por sua vez, na obra de 2015, foram realizadas tanto dragagens de manutenção e quanto iniciais, sendo respectivamente à última, na área do Superporto, que passou a ter um calado de 14 m. Entretanto e para tanto, o volume de material retirado foi de 16 milhões de m<sup>3</sup>, dez vezes maior do que o de praxe (SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES, 2010).

Em que pese o caráter de manutenção da dragagem ocorrida em 2018, ainda se manteve removendo aproximadamente 16 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos do canal (SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES, 2018). Distintivamente das demais, esta operação, foi embargada pelo Ministério Público Federal, que justificou referido embargo com a possível relação entre a dragagem em andamento utilizando *overflow* (processo que devolve ao ambiente parte da água dragada) e o surgimento de lama na orla da Praia do Cassino - fato importante que será retomado no próximo subitem. As dragas pararam no dia 13 de dezembro de 2018, mas, horas depois, o governo orientou que o trabalho fosse retomado (SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES, 2018).

Entre novembro de 2019 e janeiro de 2020, a última operação de dragagem (até então) foi realizada, ampliando o calado operacional do porto para 15 metros (GOVRS, 2020). O destino final deste material continuou sendo sua disposição em mar aberto, em um sítio de despejo *offshore* com profundidades de 19 a 22 m e a aproximadamente 22 km da linha de costa (DEZOTTI, 2021).

A Tabela 2.1 apresenta uma compilação do histórico de dragagem no Porto do Rio Grande confeccionada através de dados encontrados em outros trabalhos, documentos e informativos sobre o assunto.

Tabela 2.1 – Histórico de dragagem no Porto do Rio Grande (AUTORAL, 2021).

<b>Data (ano)</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Volume dragado (m<sup>3</sup>)</b>
<b>1909-1915</b>	Aprofundamento e construção dos molhes	8.776.000
<b>1961-1962</b>	Aprofundamento	477.800
<b>Década de 70</b>	Aprofundamento	703.032
<b>1980-1996</b>	Manutenção	24.390.182
<b>1998</b>	Manutenção	2.940.000
<b>2003-2004</b>	Manutenção	2.900.000
<b>2006</b>	Manutenção	3.000.000
<b>Término em 2010</b>	Aprofundamento	20.000.000
<b>2013-2014</b>	Manutenção	1.600.000
<b>2015</b>	Aprofundamento e manutenção	16.000.000
<b>2018</b>	Manutenção	16.000.000
<b>2019-2020</b>	Aprofundamento	16.000.000

#### 2.2.4 Relação entre atividades de dragagem e os surgimentos de lama na Praia do Cassino

A Praia do Cassino também está localizada no município de Rio Grande (Figura 2.2), propriamente nas adjacências da desembocadura da laguna dos Patos, estendendo-se por 220 km até a fronteira entre o Brasil e o Uruguai (CALLIARI et al. 2020). Trata-se do balneário marítimo mais antigo do Brasil, e também da orla mais extensa do mundo, onde se pode trafegar de carro, representando há mais de 100 anos uma excelente opção para o lazer, turismo e pesca para a região (BISCAGLIA; VIEIRA, 2005).

De acordo com Calliari e Griep (1999), o primeiro registro de ocorrência de lama na Praia do Cassino data de 1901, sendo o posterior episódio, noticiado pelo Jornal Rio Grande, datando de 28 de dezembro de 1954 (DE-ZOTTI, 2021). Segundo o jornal: “a Praia do Cassino foi invadida por uma extensa camada de lama, onde os banhistas enterram pés, pernas e até o próprio corpo até o peito” (CALLIARI; FACHIN, 1993).

Em 1972 foi publicado o primeiro estudo científico sobre o tema por pesquisadores de pós-graduação em geociências da UFRGS (VILLWOCK; MARTINS, 1972), qual estudaram o fenômeno lamítico ocorrido em 1970. Desde então, episódios de deposição de lama na praia do Cassino ocorreram com razoável assiduidade, sendo verificados, segundo Meirelles (2010) pelo menos 25 eventos desde 1972 até o ano de 2010, todos acarretando transtornos à região. Para mais, De-zotti (2021) coaduna ao citar que de 1998 a 2021, pelo menos um evento anual ocorreu (Figura 2.3), com exceção dos anos de 2005, 2006 e 2007.



Figura 2.2 - Localização da Praia do Cassino, Molhes da Barra, Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande e região estuária da Laguna dos Patos (Adaptado do Google Earth, 2021).



Figura 2.3 - Evento de deposição da lama na praia em 2019 (Autorial, 2019).

A explicação que por muitos anos foi tida como única resposta para a origem dos depósitos de sedimentos na praia, como discorre De-zotti (2021), foi a hipótese de que eles vinham sendo introduzidos exclusivamente de forma natural à plataforma. Ademais, conforme explanado no item 2.3.2 e reforçado por diversos autores como Villwock e Martins, 1972; Martins et al., 1978; Calliari et al., 2000, 2009; Mirlean; Calliari; Johannesson, 2020, a laguna dos Patos deveras se apresenta como uma potencial fonte de sedimentos finos para a plataforma interna adjacente (MEIRELLES, 2010).

Entretanto, mesmo Meirelles (*op. cit.*) já vinha fazendo questionamentos retóricos sobre os efeitos antropogênicos associados às atividades de dragagem no canal do porto e também ao desmatamento às margens da laguna dos Patos. Seguindo esta linha de desdobramento, alguns estudiosos mais atuais do tema, tanto num contexto regional, como internacional, em destaque Calliari et. al. (2020), Mirlean, Calliari e Johannesson (2020) e De-zotti (2021), encetaram a defender que novas interpretações advindas de uma perspectiva multidisciplinar e de dados recentes, levam à indicação de que outros fatores podem estar contribuindo nas deposições de lama na praia, fato corroborado pelo aumento da frequência desses eventos nas últimas décadas.

Neste sentido, Calliari et. al. (2020) afirmaram que o maior registro de evento de deposição de lama na Praia do Cassino foi precedido de dragagem no ano de 1998, e que a partir desta ocorrência a questão emergiu como uma problemática ambiental no contexto da cidade de Rio Grande (FERREIRA; FREITAS; LUCENA, 2019). Nesta oportunidade, os sedimentos removidos foram depositados na vizinhança dos Molhes da Barra em um segmento de 13 km, e desde então, quiçá por perceptível relação, o material dragado começou a ser realocado em um sítio a cerca de 20 m de profundidade, mas mesmo assim, novos eventos de deposição de lama na praia seguiram ocorrendo (DE-ZOTTI, 2021).

Em secundo as últimas elucidações, Mirlean, Calliari e Johannesson (2020) afirmaram que de maneira similar os eventos de deposição de lama na praia de 2014, 2018 e 2020, foram sempre precedidos de dragagens no porto do Rio Grande (Tabela 2.2), atentando ao uso cônsono da técnica de *overflow*. Este procedimento, como já comentado, consiste na saída do excesso líquido após o recolhimento do sedimento mais denso nos compartimentos da draga, e torna-se visível (Figura 2.4) quando os sedimentos finos, que são expelidos junto com a água, criam uma pluma no mar (FERREIRA; FREITAS; LUCENA, 2019). Segundo Mirlean, Calliari e Johannesson (2020), por causa da prática comum do uso do *overflow* no Porto do Rio Grande, quantidades enormes de sedimentos contaminados foram lançados ao meio ambiente durante todos estes anos.

Tabela 2.2 - Períodos de dragagem no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande e datas dos eventos de deposição de lama na praia do Cassino (Adaptado de MIRLEAN; CALLIARI; JOHANNESON, 2020).

<b>Operações de Dragagem</b>	<b>Depósitos de lama na praia</b>
Março e Abril de 1998	Final de Março de 1998
Dezembro de 2013 a Janeiro de 2014	Início de Março de 2014
Outubro, Novembro e Dezembro de 2018	Início de Dezembro de 2018
Novembro de 2019 e Janeiro de 2020	Início de Janeiro de 2020



Figura 2.4 - Utilização de *overflow* na dragagem do canal do Porto de Rio Grande em 2018 (FERREIRA; FREITAS; LUCENA, 2019).

Ainda, segundo Mirlean, Calliari e Johannesson (*op. cit.*), a poluição gerada pela técnica pode ser demonstrada à luz do fato de que em 2019, por oito meses (de março a outubro), o *overflow* não foi permitido e episódios de deposição de lama fluida não ocorreram. A seu turno, a última série de deposição de lama na praia ocorreu em janeiro e fevereiro de 2020, depois da dragagem com *overflow* no baixo estuário no fim de 2019 e início de 2020. Entretanto, como defendem os mesmos autores, a origem da lama na Praia do Cassino não está e nem deve ser relacionada somente à de dragagem em si e as técnicas nela utilizadas, mas sim na combinação entre toda a atividade e a disposição final de seus sedimentos, sendo estes, para eles, os principais agentes dos eventos (MIRLEAN, CALLIARI E JOHANNESON, 2020).

Além disso, em que pese todas as informações supracitadas do trabalho de Mirlean, Calliari e Johannesson (*op. cit.*) - advindas da rica introdução ao estudo - a pesquisa por eles realizada, na realidade, consistiu na investigação da razão de elementos de terras raras (La/Eu e Gd/Yb) nos sedimentos marinhos, litorâneos e de estuários adjacentes à laguna do Patos, no período de 2014 a 2020. Como resultado, eles comprovaram, pioneiramente, que os sedimentos dragados dentro o estuário – precisamente na bacia do porto e no canal de navegação - e a lama que surge

na praia, tem proporções semelhantes, concluindo assim, que os eventos de deposição de lama na praia estão provavelmente associados aos processos de dragagem no estuário.

Pondo fim aqui ao debate, salienta-se novamente que para além de apontar o grande responsável pelos eventos de lama na Praia do Cassino, ou sentenciar as atividades de dragagem que ocorrem no Porto do Rio Grande, o ponto nevrálgico da discussão no presente trabalho está em desenvolver uma alternativa de disposição final para o sedimento que chega ao porto através de um estuário industrializado – podendo conter quantidades expressivas de metais pesados e outros contaminantes-, e que ainda são lançados ao mar. Desta feita, propõe-se como alternativa o reuso do material dragado, especificamente para confecção de BTCs, tema que será enfatizado no item adjacente (2.3).

Afinal, como observa De-Zotti (2021), quiçá voltar à ciência para determinar apenas um dos fatores (natural ou antrópico) como o único responsável pelos eventos lamíticos, polarize a discussão e acabe por deixar o foco de lado: a proteção do ambiente e da população que necessita deste local.

### 2.3 BLOCO DE TERRA COMPRIMIDA (BTC)

Desde a pré-história o homem tem a utilizado a terra (isto é, o solo) como material de construção, tanto para suas habitações, como em edifícios representativos e monumentos (NEVES et al., 2011). Segundo Minke (2015) todas as culturas antigas construíam tendo a terra como matéria prima, existindo inúmeras técnicas de como aplicá-la, como: adobe, taipa, cob, pau-a-pique, entre outras, e que são conhecidas a mais de 9000 anos.

No que toca à eficácia do material em construções, considerando fatores de resistência e durabilidade, a priori, se confirma por existem edificações com mais de 3.000 anos ainda de pé, além de grandes construções. Em seu livro, Minke (2015) destaca um edifício de 7 andares na Alemanha, datado de 1828, e que também já sobreviveu à um incêndio.

Nesta perspectiva, propõe-se que os três resíduos estudados neste trabalho, sejam empregados na confecção de Blocos de Terra Comprimida (BTCs), material que compõe a alvenaria na construção civil, em paralelo à técnica de solo-cimento. Isto é, a partir da estabilização química e mecânica do solo dragado, respectivamente por meio de um aglomerante artificial, produzido através da álcali ativação da CC e CCA, e por sua compactação em blocos prensados.

A técnica de BTC traz como vantagens, além de já ser normatizada no Brasil, o fato de ser facilmente industrializável e, por consequência, possibilitar um maior controle de qualidade de produção (SILVA et al., 2015). Além disso, ela pode e tem sido muito utilizada em habitações de interesse social nos últimos tempos. Segundo Hunter e Kiffmeyer (2004) o uso de BTCs em países de terceiro mundo, como o Brasil, já assegurou que muitas comunidades fossem tiradas da pobreza e do desabrigo.

O BTC (Figura 2.5 (a)) como o próprio nome indica, é um bloco de terra (úmida) compactada, sendo uma evolução natural dos adobes – que eram moldados em fôrmas rudimentares. A mistura de materiais nos BTCs é prensada através de prensas manuais ou hidráulicas (Figura 2.5 (b)), resultando na diminuição do volume de vazios em relação à mistura em adobe, obtendo um material final de alta densidade e de maior resistência mecânica (MINKE, 2015; ANTONELLI e DOS ANJOS AZAMBUJA, 2021; SOARES et al., 2016).



Figura 2.5 - (a) BTC e (b) Prensa hidráulica (Autorais, 2018).

Em relação as suas aplicações, podem ser utilizados tanto como material de vedação, quanto na alvenaria estrutural, de maneira similar aos blocos cerâmicos ou de concreto, em construções modulares.

Conceitualmente, o BTC estabilizado por algum agente cimentante, também é conhecido pelo termo “bloco de solo-cimento” e definido pela NBR 10834/2013 como componente de alvenaria, constituído por uma mistura homogênea, compacta e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos e/ou pigmentos, podendo ser maciço ou vazado. Para além desses termos e seguindo essa prerrogativa, podem-se encontrar outras palavras chaves em produções científicas para denominá-lo, como tijolo ecológico, tijolo verde ou tijolo solo-cimento.

A alusão ao âmbito ecológico vem do fato de que este tipo de tijolo não passa pelo processo de queima dos tijolos convencionais, o que conseqüentemente evita o uso de combustíveis e a emissão de gases poluentes durante sua fabricação. Nesse mesmo contexto e ao encontro deste trabalho, pesquisadores desta técnica estão cada vez mais à procura de materiais cimentantes alternativos em substituição ao cimento Portland.

Segundo Antonelli e Dos Anjos Azambuja (2021) que pesquisaram artigos sobre BTCs publicados entre os anos de 2017 e 2021, aproximadamente 43% dos estudos já utilizam subprodutos agrícolas, como cinza de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar, e/ou resíduos minerais como escória de alto forno, metacaulim, sílica ativa, carbonato de cálcio e cinza volante, em substituição ao cimento tradicional.

Assim, pode-se citar autores como Silva et al. (2015) que analisaram e caracterizaram as propriedades mecânicas de compressão e flexão de BTCs estabilizados a partir da técnica de ativação alcalina, utilizando cinzas volantes ou lodo de estação de tratamento, em conjunto com soluções ativadoras de silicato e hidróxido de sódio, encontrando resultados superiores àqueles exigidos por algumas normas internacionais que regulam estruturas construídas com terra crua. E Leitão et al. (2017) que qualificaram o desempenho térmico de paredes constituídas por BTCs álcali ativados a partir de cinza volante, obtendo valores comparáveis aos tijolos tradicionais.

### 2.3.1 Normatização brasileira

No Brasil, como comentado inicialmente, a técnica de BTC já é normatizada. O conjunto de regulamentos sobre o tema é feito pela ABNT, e têm os seguintes documentos como diretrizes:

- NBR 8491 (ABNT, 2012): Tijolo de solo-cimento — Requisitos;
- NBR 8492 (ABNT, 2012): Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio;
- NBR 10832 (ABNT, 2013): Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual;
- NBR 10833 (ABNT, 2013): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento;
- NBR 10834 (ABNT, 2013): Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos;
- NBR 10835 (ABNT, 2013): Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Forma e dimensões – Padronização;
- NBR 10836 (ABNT, 2013): Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.

Especialmente para o escopo desta pesquisa, ressalta-se algumas definições importantes estabelecidas pela NBR 10834/2013 no que diz respeito à qualificação dos blocos, como: (i) a amostra representativa de um lote de 10.000 blocos é de no mínimo 10 blocos, sendo que estes só podem ser ensaiados com no mínimo 7 dias de cura; (ii) os critérios mínimos de qualidade estão definidos e apresentados na Tabela 2.3, sendo que estes valores foram estabelecidos para um tempo de cura de 28 dias.

Tabela 2.3 – Quadro-resumo dos limites especificados para fabricação de BTC pela ABNT (Adaptada da NBR 10834/2013).

<b>Valores-limite</b>	<b>Média</b>	<b>Individual</b>
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	$\geq 2$	$\geq 1,7$
<b>Absorção de água (%)</b>	$\leq 20$	$\leq 22$

### 2.3.2 Avaliação de desempenho

Como critério de avaliação de desempenho de BTCs, tem-se mundialmente a resistência à compressão aceita como propriedade universal, porquanto com unanimidade todas as normas de BTCs determinam esse parâmetro como obrigatório (ANTONELLI; DOS ANJOS AZAMBUJA, 2021). No Brasil, como comentado no subitem anterior, a ABNT coaduna e estabelece como parâmetro, além da avaliação da absorção de água do bloco (Tabela 2.2).

Em concordância à importância das avaliações estabelecidas pela ABNT, Antonelli e Dos Anjos Azambuja (2021) indicam que estes são os dois parâmetros mais estudados quando se trata de BTC (Figura 2.6), mesmo num espectro mundial. Por estes motivos, e pela dificuldade em preparar os materiais estudados neste trabalho -em específico o material dragado-, estas duas variáveis de resposta serão as únicas aqui avaliadas.

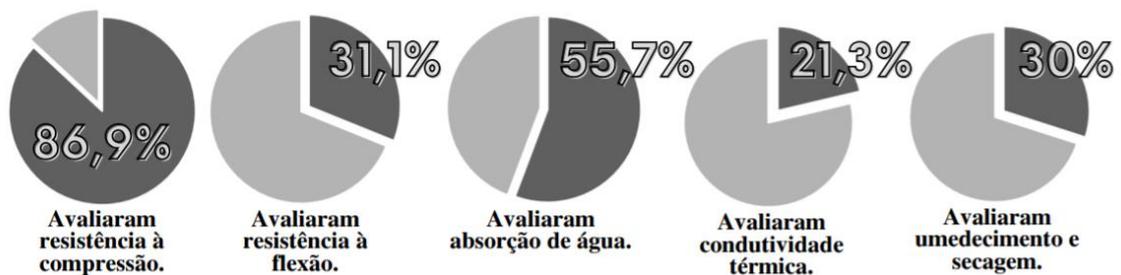


Figura 2.6 – Parâmetros de avaliação de desempenho de BTC mais utilizados nos últimos anos (Adaptado de ANTONELLI e DOS ANJOS AZAMBUJA, 2021).

Ainda, para além das normas brasileiras, no que tange aos limites mínimos de resistência à compressão recomendados internacionalmente, Silva et al. (2014) comentam que prescrições normativas e não normativas estabelecem um valor superior 2 MPa. Não obstante, através de uma breve pesquisa em outras normativas comumente encontradas no estado da arte do assunto, encontrou-se os valores de resistência mínimos apresentados na Tabela 2.4, quais se mostraram em concordância com a ABNT e com Silva et al. (*op. cit.*) – sendo estes últimos mais generalistas.

Tabela 2.4 – Limites de resistência à compressão determinados pelas principais normativas internacionais de BTCs (Autorial, 2021).

<b>Normas</b>	<b>Resistência à compressão mínima (MPa)</b>
<b>UNE 41410/2008 (Espanha)</b>	BTC-C1: 1,3
	BTC-C3: 3,0
	BTC-C5: 5,0
<b>XP P13-901/2001 (França)</b>	Seco:
	BTC 20 $\geq$ 2
	BTC 40 $\geq$ 4
	BTC 60 $\geq$ 6
	Úmido:
	BTC 20 $\geq$ 1
	BTC 40 $\geq$ 2
BTC 60 $\geq$ 3	
<b>HB 195/2009 (Austrália)</b>	1
<b>NZS 4298/1998 (Nova Zelândia)</b>	1,52

### 2.3.3 Dosagens recomendadas para confecção de BTCs

Por meio de consultas a bibliografia da Construção com Terra, aferiu-se as seguintes orientações para a moldagem de BTCs (sem adição de agente cimentante): (i) deve-se utilizar solos compostos por no mínimo 50% de areia, caso contrário, sugere-se que seja feita a correção granulométrica do solo, adicionando esta fração (NEVES et. al, 2010); (ii) a mistura deve ser prensada com quantidade de água de 1,1 vezes a umidade ótima do solo (MINKE, 2015).

A estabilização química nem sempre é imprescindível neste âmbito, já que muitos solos conseguem alcançar um comportamento satisfatório em relação à resistência e absorção de água, sem necessidade de adição de nenhum aglomerante como cimento, cal e emulsão

asfáltica. Entretanto, algumas normas, como as brasileiras, recomendam esse tipo de procedimento (CID et al., 2011).

Agentes estabilizadores fornecem ao BTC uma melhor resistência mecânica e estabilidade volumétrica, diminuem a permeabilidade e aumentam a durabilidade das peças comprimidas (RIVERA et al, 2020). A seu turno, Minke (2015) recomenda o uso entre 4 a 8% de cimento para estabilização dos blocos através da técnica de BTC; Já Sabbag (1980) adverte que se o teor de cimento for muito elevado, em condições de cura inadequadas, o material pode fissurar.

Um compêndio das prerrogativas estabelecidas no estado da arte da Construção com Terra para dosagens dos BTCs com adição de cimento tradicional é feita por Neves et. al (2010) e Neves e Faria (2011):

- a. Deve-se utilizar um solo do tipo arenoso, e que idealmente apresente as seguintes características geotécnicas: (i) seja 100% passante na peneira de abertura de 4,8 mm; (ii) classificado como desuniforme; (iii) apresente um limite de liquidez (LL) de 45% e um índice de plasticidade (IP) de 18%;
- b. Aconselha-se a proporção de 1 volume de cimento para de 12 a 18 volumes de solo, conforme a retração do solo. Quanto menos retrátil, menor a dosagem de cimento a ser adicionada.

Ainda que estas sejam as recomendações encontradas, adenda-se que parte do material dragado no Porto do Rio Grande trata-se de um solo argiloso, e que existem estudos alheios à Construção com Terra, especialmente no âmbito da Construção Civil, Engenharia Geotécnica e de Materiais de Construção utilizando este tipo de solo. Notadamente, essas outras áreas não prescindem a correção granulométrica, melhorando o material de outras maneiras, como por meio da estabilização química.

Neste sentido, pode-se destacar o trabalho de Ghadir e Ranjbar (2018) que utilizaram 15% de geopolímero (material álcali ativado) na estabilização de uma argila, atingindo a resistência de 4 MPa aos 28 dias, com cura seca. E principalmente o trabalho de Rivera et al. (2020), qual estabilizaram uma argila por meio da álcali ativação de cinzas, cal e silicato de sódio, aplicados em BTCs, de maneira análoga ao que será realizado neste trabalho.

## 2.4 MELHORAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS ATRAVÉS DE MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS

Solos argilosos podem ser considerados como solos de granulometria fina, que apresentam comportamento plástico em contato com a água (GRIM, 1962). Um solo é classificado como argiloso quando apresenta como sua principal componente partículas inferiores a 2  $\mu\text{m}$ , qual correspondem ao tamanho das partículas de argilo-minerais (PINTO, 2002).

Mesmo um solo não classificado como argiloso, pode ter seu comportamento influenciado por essa parcela, quando constituídos minimamente por 10% de argilominerais (MÜLLER, 2005). Ainda, ressalta-se que no âmbito de Fundações e Obras de Terra, o solo predominantemente argiloso recebe o nome de “solo mole” quando apresenta valor de N-SPT menor que 5, segundo a NBR 6484/2020, tendo como característica um índice de consistência menor ou igual a 0,5, isto é, apresenta um teor de umidade natural próximo do limite de liquidez.

Este tipo de solo, em que pese sua importância para a agricultura, cerâmica e várias indústrias, estabelece-se como um desafio no que tange à engenharia geotécnica, devido suas características de elevada compressibilidade, baixa resistência e plasticidade. Dentre as diversas alternativas usuais para o melhoramento de suas propriedades neste setor, a estabilização surge como técnica capaz de alterar propriedades do solo, tais como, estabilidade volumétrica, resistência, compressibilidade, durabilidade e permeabilidade, através de tratamentos mecânicos, físicos, químicos, térmicos, entre outros.

Notadamente, no melhoramento de um solo por meio da estabilização química, suas características geotécnicas são modificadas através da adição de novos materiais com características aglomerantes, como a cal, o cimento, o asfalto e os materiais álcali ativados. As reações químicas que ocorrem entre o aglomerante e o solo, seguem, de maneira geral, mecanismos análogos, podendo ser divididas em 4 etapas: (i) troca catiônica; (ii) aglomeração/floculação; (iii) hidratação e (iv) reações pozolânicas (ROGERS; GLENDINNING, 2000).

A **troca catiônica** ocorre de maneira instantânea, podendo se estender por algumas horas, ademais, é um mecanismo que ocorre exclusivamente em argilas (ROGERS; GLENDINNING, 2000). Este fenômeno processa-se através da interação entre íons de cálcio liberados pela adição do agente aglomerante e os íons metálicos provenientes da estrutura argilomineral (BRUSCHI, 2020).

De maneira sucinta, Rogers e Glendinnigs (1996) explicam que nesta etapa há a redução do espaçamento da dupla camada elétrica das partículas de argila. Este mecanismo faz com que as partículas do solo aglomerem e fiquem menos propensas à adição de água. O resultado são mudanças de textura e resistência do material, qual deixa de se comportar como uma argila plástica e assume característica de um material mais granular, com um maior ângulo de atrito.

A etapa de **aglomeração/floculação**, assim como a troca catiônica, ocorre de maneira instantânea, podendo durar horas. A aglomeração consiste no capeamento da superfície das partículas de argila com carga negativa, por uma camada de cátions (carga positiva).

Assim, as partículas de argila capeadas acabam apresentando grande dispersão devido às forças de repulsão das camadas de cátion com carga positiva. Entretanto, simultaneamente, surgem forças de *van der Waals* devido às cargas negativas das superfícies das argilas, e estas conseguem superar a repulsão inicial, fazendo com que as partículas floculem, fiquem mais próximas, sob nova orientação (SUMNER; NAIDU, 1998).

Assim como na etapa anterior, o mecanismo de floculação promove uma textura granular ao material, melhorando suas características físicas, químicas e mecânicas, em especial, provocando um aumento da sua resistência ao cisalhamento (HERRIN, 1961).

Já a etapa de **hidratação**, trata-se de uma etapa um pouco mais longa, podendo durar até um mês após a mistura do solo com a agente cimentante. Este processo começa com a hidratação das partículas de óxido cálcio ( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ), resultando em hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , seguido de sua própria dissolução na presença de água. Um dos efeitos da dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é a floculação ainda mais forte das partículas.

Não obstante, a dissolução do hidróxido de cálcio libera cátions de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e a hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), qual promovem o aumento do pH do sistema para valores de 12,3 a 12,4 (TRB, 1987). O ambiente alcalino desencadeia o ataque progressivo dos argilominerais e pozolanas em fase amorfa, implicando na dissolução dos seus alumino-silicatos. Estes últimos, combinados aos íons de cálcio livres ( $\text{Ca}^{2+}$ ), precipitam compostos cimentantes hidratados como produtos de hidratação (AYTEKIN; NAS, 1998).

Dito isso, Aytakin e Nas (1998) ressaltam que deve haver uma preocupação em relação à suficiência de água do sistema, já a mesma sofre evaporação pelo processo exotérmico da hidratação, mas posteriormente deve garantir que haja troca iônica entre os íons de cálcio da cal hidratada e os íons alcalinos dos minerais de argila e das pozolanas.

Os compostos formados a partir do hidróxido de cálcio e dos alumino silicatos solubilizados podem ser do tipo C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) ou C-A-S-H (aluminatos de cálcio hidratados), sendo classificados como produtos cimentícios primários, ou produtos de hidratação principais. Esses géis acabam ligando as partículas do solo e do cimento não hidratadas, formando o esqueleto do solo-cimento, assim melhorando características mecânicas do solo (BURRIS et al., 2015).

Por último, as decorrentes **reações pozolânicas** consistem no incremento dos produtos primários de reação de hidratação, quais se verificam perante à longas escalas de tempo, podendo durar de meses a anos (DUXSON et al., 2007). Para tanto, como alertam Aytakin e Nas (1998), demandam que o sistema tenha quantidade suficiente de água disponível.

Nesta etapa ocorre a cimentação do solo, onde as partículas não são apenas ligadas, mas têm seus vazios preenchidos pelos compostos da hidratação. A partir de desenvolvimento das reações pozolânicas, o material torna-se mais resistente, rígido, menos suscetível à retração e expansão (WILKINSON; HAQUE; KODIKARA, 2010; CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015).

Ainda, pode acontecer um quinto tipo de reação no sistema, denominado **carbonatação**, proveniente do uso da cal. Neste processo, algumas partículas de cálcio que não hidrataram,

podem reagir com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente nos vazios do solo, resultando em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

O  $\text{CaCO}_3$  é classificado como um produto de reação secundário, e possui capacidade cimentante, porém de menor resistência se comparado ao C-S-H ou C-A-S-H. Neste sentido, o produto pode ser considerado como deletério, vista que vem a carbonatar a cal que poderia ser utilizada para produção de géis primários (SCHEUERMANN FILHO, 2019; HERRIN; MITCHELL, 1961).

## 2.5 LIGANTES ÁLCALI ATIVADOS

Perante a busca por materiais de baixo impacto ambiental para a realização desta pesquisa, os ligantes álcali ativados configuram-se como alternativa eficaz, econômica e sustentável em substituição ao cimento Portland para estabilização química dos BTCs, e, por isso, o conglomerante escolhido. Nesta técnica pode-se utilizar como matéria-prima subprodutos e/ou resíduos industriais da região, como destacado nos itens 2.1.1 e 2.1.2: a cinza de casca de arroz e a cal de carbureto, que caso não fossem reutilizados, poderiam contribuir ainda mais para contaminação ambiental nos locais onde destinados.

A técnica de ativação alcalina é definida por Palomo et al. (1999) como um processo químico que permite a transformação de estruturas vítreas (ou seja, parcial ou totalmente amorfas), em estruturas com propriedades cimentantes. Em específico, os designados ligantes álcali ativados, são epistemologicamente conceituados como materiais produzidos a partir da reação entre dois componentes: uma fonte de metal alcalino (ativador alcalino) e uma fonte de alumínio silicato (DAVIDOVITS, 1994; SHI et al., 2006; TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017).

Os materiais de natureza alumínio sílica utilizados para este tipo de reação têm como características estarem em estado sólido e em pó, podendo ter origem natural ou artificial, e ser ricos em cálcio como o silicato de cálcio, ou pobres, como as escórias de alto forno e cinzas volantes. No que compreende as fontes alcalinas, deve-se utilizar qualquer substância solúvel (sólida ou dissolvida) que forneça cátions de metais alcalinos, eleve o pH da mistura e acelere

a dissolução do precursor sólido, como: hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos ou óxidos (SHI et al., 2006; PACHECO-TORGAL et al., 2015).

Se comparados aos cimentos tradicionais (como Portland), este tipo de ligante traz como vantagens do seu processo de fabricação menores taxas de emissão de dióxido de carbono e de gasto energético (FLATT; ROUSSEL; CHEESEMAN, 2012), além da possibilidade de utilização de subprodutos industriais ou materiais naturais como matéria-prima. Em relação a sua aplicabilidade, Flatt et al. (2012) também afirmam que estes materiais, de maneira genérica, podem apresentar maior resistência mecânica, maior durabilidade e estabilidade, além de conseguirem atingir este grau de comportamento muito mais rápido. Neste sentido, Bruschi (2020) reforça ao citar que os ligantes álcali ativados podem apresentar diversas propriedades comercialmente atraentes, como: resistência e durabilidade química (ALAM et al., 2019; XU; VAN DEVENTER, 2010), resistência a altas temperaturas (KUA et al., 2016) e baixo custo de produção (ZHANG et al., 2013).

No entanto, apesar de toda evidência, há um atraso da popularização deste tipo de técnica em relação aos cimentos tradicionais, inclusive no âmbito acadêmico, onde pesquisas sobre o assunto só começaram a crescer mundialmente na década de 1990 (XU; DENVER, 2000). Este fato é explicado por diversos estudiosos do tema pela falta de padronização da nomenclatura que os designa, apesar de serem sintetizados utilizando a mesma química (LOTERO CAICEDO, 2020).

Neste sentido, Pacheco-Torgal et al. (2014) destacam que, pragmaticamente, a falta de consenso sobre o nome científico da técnica determina a não existência de uma palavra-chave universal, o que acaba por fazer com que pesquisas relevantes não apareçam em buscas simples no meio acadêmico. Na literatura, encontramos nomenclaturas, como: geopolímero ou polímero inorgânico (DAVIDOVITS, 1979), geocimentos (KRIVENKO, 1994), cimento álcali ativado (PUERTAS, 1995), concreto polimérico inorgânico (SOFI et al., 2007), entre outras.

Em contrapartida, outros autores defendem a ideia de que apesar de serem materiais semelhantes, alguns termos não podem ser utilizados como sinônimos, visto que, como mostra a Figura 2.7, os produtos de reação não são iguais. De acordo com Davidovits (1991), um

material álcali ativado só deve ser classificado e chamado como geopolímero quando seus produtos de reação apresentarem uma coordenação tetraédrica com o silício e ao menos duas ligações com o alumínio, semelhante à zeolita. O autor argumenta ainda, que o produto da geopolimerização ocorre apenas em baixos teores de cálcio e altas concentrações de alumínio e de agente ativador.

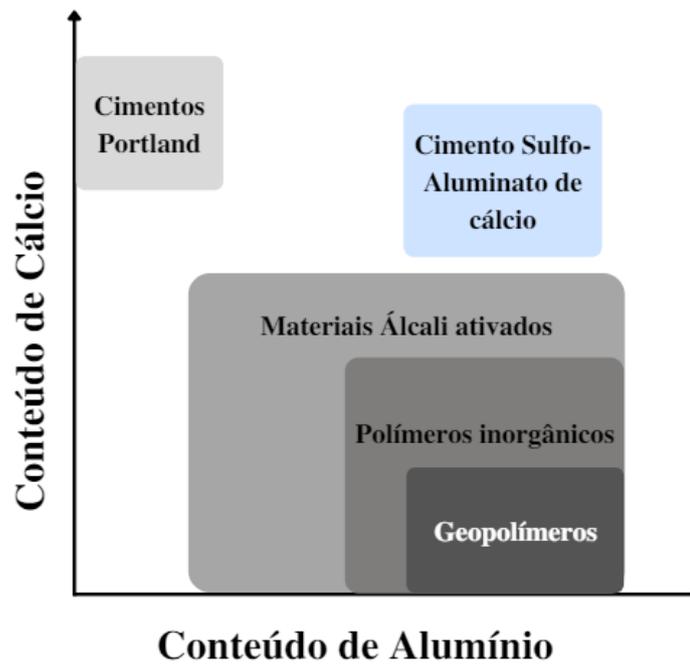


Figura 2.7 - Esquema de classificação dos materiais álcali ativados, em que a tonalidade mais escura representa maiores concentrações de metais alcalinos (Na e/ou K) (Adaptado de VAN DEVENTER et al., 2010).

Em relação aos polímeros inorgânicos, Duxson et al. (2007) defendem que também devem ser definidos como um sub grupo dos sistemas álcali ativados, sendo caracterizados por materiais que formam uma rede desordenada de silicatos como fase ligante primária e que solicitam uma maior quantidade e grau de conectividade dos silicatos - se comparado ao cimento Portland.

Ou seja, o termo “álcali ativado” acaba por ser genérico, abrangendo tanto materiais como o polímero inorgânico, quanto o geopolímero. Entretanto, ao que tange à compreensão do estudo deste trabalho, este é o termo mais representativo e por isso, adotado.

### 2.5.1 Materiais precursores

Entendem-se como materiais precursores em um conglomerante álcali ativado, aqueles compostos predominantemente por sílica e/ou alumina reativas (PACHECO-TORGAL et al., 2015). Sendo sua capacidade reativa determinada e dependente, de acordo com Duxton et al. (2007), pelo teor de material amorfo, superfície específica do material, teor de fase vítrea e tamanho da partícula.

Uma grande variedade de materiais naturais e de subprodutos industriais atendem essas premissas, podendo ser utilizados como fonte precursora. Dentre os mais destacados estão o metacaulim, escórias de alto forno, cinzas volantes (provenientes da combustão do carvão mineral em usinas termoeletricas), pó de telha ou tijolo e cinzas de resíduos agroindustriais como cinza de casca de arroz e de bagaço de cana. Notadamente, os resíduos industriais ricos em alumino-silicatos, por consequência de tratamento térmico a que foram anteriormente submetidos, transformando sua estrutura cristalina em amorfa, são extremamente atraentes tanto do ponto de vista químico (por serem reativos), quanto ambiental (na reutilização de resíduos), para serem beneficiados como precursores (SILVA, 2016).

No âmbito da álcali ativação, no que toca a sua composição química, os precursores são divididos em dois grupos:

- Materiais ricos em cálcio, compostos por  $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ , como as escórias de alto forno;
- Materiais pobres em cálcio, compostos por  $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ , como metacaulim e cinzas volantes.

No sistema alto cálcio, os precursores são normalmente ativados sob condições alcalinas moderadas, e seu produto de reação principal é o gel C-A-S-H, qual possui uma estrutura cristalina desordenada, similar ao C-S-H formado no cimento Portland (PUERTAS et al., 2011; PACHECO-TORGAL et al., 2015). Ademais, os materiais calcinados são de mais fácil dissolução (por serem mais amorfos), por isso, quando álcali ativado apresentam uma taxa

mais rápida de dissolução e gelificação, e, por consequência, seus produtos têm maior resistência à compressão inicial quando comparados à precursores de baixo teor de cálcio (ZHANG et al., 2013).

Já em relação ao sistema baixo cálcio, a álcali ativação do precursor demanda meios altamente alcalinos e altas temperaturas de cura, tendo como principal produto formado o gel N-A-S-H, qual possui estrutura amorfa ou semi-cristalina (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015). Cabe ressaltar que esse mesmo gel pode ser referido como geopolímero no estado da arte de aglomerantes álcali ativados, dependendo da composição química do precursor (VAN DEVENTER et al., 2010; DUXSON et al., 2005). Ademais, os produtos da reação de precursores com baixo teor de cálcio, apesar de resultarem em menos resistentes inicialmente, acabam por apresentar um aumento mais significativo na sua resistência mecânica nos estágios posteriores à reação de álcali ativação (BRUSCHI, 2020).

Há ainda, a possibilidade da mistura entre os dois tipos de precursores a fim de se atingir propriedades e características específicas, ademais, as misturas podem ser feitas adicionalmente com uma gama de diferentes composições e ativadores alcalinos. Autores como Palomo et al. (2007) e Pacheco-Torgal et al. (2015), já vêm chamando um novo grupo como cimento híbrido.

Neste trabalho serão utilizados dois materiais como precursores, um rico em sílica reativa e outro com alto teor de cálcio, respectivamente: a cinza de casca de arroz e a cal de carbureto. Alguns autores também estudaram essa combinação para melhoramento de propriedades de solos como resistência a compressão, rigidez inicial e durabilidade por molhagem e secagem, obtendo ótimos resultados (CONTI, 2020; LEON et al., 2020; CONSOLI et al., 2019, 2021). Destarte, os diferenciais neste estudo serão a utilização de hidróxido de sódio como ativador alcalino e o solo a ser melhorado do tipo argiloso.

### 2.5.2 Ativador alcalino

Os ativadores são substâncias químicas utilizadas na técnica de álcali ativação, que como o próprio nome já diz, ativam os materiais precursores, gerando compostos cimentantes. Eles

atingem seu objetivo pelo fato de fornecerem cátions de metais alcalinos à mistura, o que acarreta no aumento do pH e na aceleração da dissolução do precursor sólido.

De acordo com Duxson et al. (2007), os ativadores podem ser divididos em quatro grupos: hidróxidos alcalinos, silicatos alcalinos, carbonatos alcalinos e sulfatos alcalinos, sendo os hidróxidos e silicatos os mais utilizados (CRIADO; PALOMO; FERNANDEZ-JIMENEZ, 2005). A diferença entre os últimos, de acordo com Lima e Thaumaturgo (2005), está no fato de que os silicatos proporcionam uma fonte adicional de sílica ao sistema, enquanto os hidróxidos asseguram alta alcalinidade às misturas.

Os hidróxidos alcalinos são quimicamente compostos por um cátion alcalino metálico e um ânion hidróxido, caracterizando-se como bases fortes e altamente corrosivas (DUXSON et al., 2007). Ainda, em variedade, o cátion metálico pode proceder de diferentes elementos, como o sódio (Na), potássio (K), lítio (Li), rubídio (Rb) ou célio (Cs) (BRUSCHI, 2020), sendo o hidróxido de sódio (NaOH) e o de potássio (KOH) os mais difundidos na técnica de álcali ativação (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Segundo Acosta (2020), as dissoluções de NaOH e KOH apresentam um pH elevado, superior a 13, com um alto conteúdo de íons OH<sup>-</sup>.

Para este trabalho, foi escolhido o uso do hidróxido de sódio, substância amplamente utilizada para diversos tipos de precursores no estado da arte dos cimentos alcalinos, qual também apresenta vantagens como baixo custo, ampla disponibilidade e alta solubilidade em água (PINTO, 2004; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

### 2.5.3 Mecanismos de reação

Apesar da importância da natureza e dosagem dos materiais precursores e ativadores utilizados nesta técnica em relação ao produto final, os mecanismos gerais de formação (princípios químicos) são os mesmos para todos os materiais classificados como álcali ativados (RENDÓN et al., 2015; RUIZ-SANTAQUITERIA, 2013). Apesar deles, podem-se encontrar alguns modelos na literatura, sendo o primeiro e, não obstante, principal, de autoria de Glukovsky, datado da década de 1950 (GLUKOVSKY, 1967).

Segundo Lotero Caicedo (2020), o modelo de Glukovsky se fundamenta em trabalhos preliminares sobre a teoria de polimerização do ácido silícico realizados por Carman (1940) e Iler (1955), sendo o mesmo também denominado na literatura como polimerização, e seu o produto obtido pelo referido autor como geopolímero. A Figura 2.8 apresenta o supracitado modelo, detalhado por Duxson et al. (2007), qual é dividido em três etapas de reação: (i) destruição-coagulação, (ii) coagulação-condensação e (iii) condensação-cristalização, e explicado brevemente em seguida.

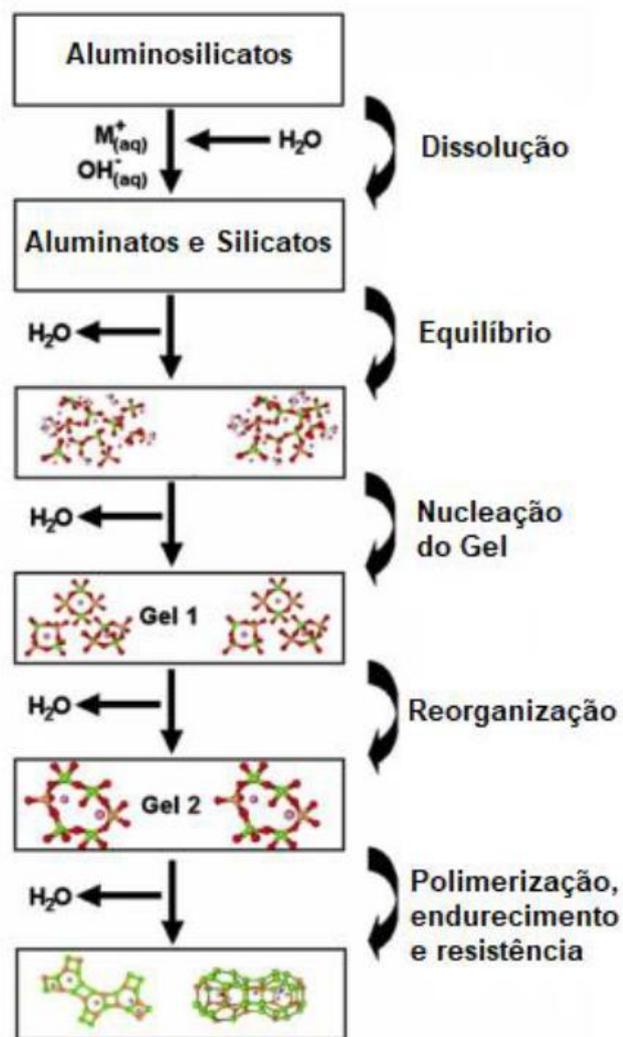


Figura 2.8 - Modelo de polimerização proposto por Glukhosky (adaptado de DUXSON, et al. 2007).

A primeira etapa do modelo, **destruição-coagulação**, consiste na degradação das ligações iônicas (Ca-O) e covalentes (Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si) dos precursores, ou seja, na dissolução da fonte sólida, pelo processo de hidrólise alcalina (devido a presença do íon OH<sup>-</sup> do ativador) gerando produtos de aluminatos e silicatos (ZHANG et al., 2013). Para se atingir o equilíbrio do sistema (isto é, dos alumino silicatos), alguns fatores devem ser considerados: concentração dos ativadores, velocidade da mistura, tamanho da partícula, área superficial e composição dos precursores (DUXSON et al., 2007).

Os cátions da dissolução alcalina, que atuaram na primeira etapa como catalizadores, agora, a partir da etapa de **coagulação-condensação**, cumprem a função de construção da estrutura. Essa etapa também é conhecida como gelificação, e nela, os cátions favorecem o contato das partículas desagregadas, assim formando grupos de estruturas coaguladas (GLUKHOVSKY, 1967; DUXSON et al., 2007).

Na última fase, **condensação-cristalização**, fase onde ocorre a resolidificação, o sistema continua a se rearranjar e organizar, além disso, ocorre a evaporação da água dos poros, o que favorece cada vez mais as reações de condensação. Os núcleos atingem um tamanho crítico e os cristais começam a se desenvolver (DUXSON et al., 2005). Segundo Duxson et al. (2007), essa última etapa é crítica na determinação de muitas propriedades físicas do material álcali ativado, visto que nela é gerada a microestrutura e a distribuição dos poros do material.

Em relação aos principais produtos gerados pelos mecanismos de reação, como já comentado, podem ser os géis C-A-S-H e N-A-S-H (aluminosilicato de sódio hidratado). Espera-se que neste trabalho, por ser um sistema alto cálcio, seja formado o gel C-A-S-H, responsável por estabilizar quimicamente o material dragado. Sua formação será confirmada através de estudo do produto de reação por análises de DRX (Difração de Raios-X) e de microscopia eletrônica das amostras.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo destina-se a discorrer sobre os materiais utilizados, a preparação das amostras e detalhes relevantes à execução dos ensaios, para que se compreendam as peculiaridades e modo de execução desta pesquisa. Também integra o programa experimental e metodologia adotados a fim de se atingir os objetivos propostos (itens 1.2 e 1.3).

#### 3.1 MATERIAIS

Este subitem irá abordar características físicas, químicas e/ou mineralógicas dos materiais utilizados, interessantes ao estudo. Bem como sua aquisição e o seu preparo para utilização em todas as etapas do programa experimental (item 3.2.1).

Em suma, os materiais utilizados nesta pesquisa formam um sistema álcali ativado para confecção de BTCs, sendo cada um categorizado como:

- Solo a ser estabilizado: material dragado do Porto do Rio Grande em 2019, abordado no item 3.1.3;
- Materiais precursores: cinza de casca de arroz e cal de carbureto, detalhados respectivamente nos itens 3.1.1 e 3.1.2;
- Ativador alcalino: hidróxido de sódio, compreendido no item 3.1.4, além da contribuição da cal de carbureto.

##### 3.1.1 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada nesta pesquisa foi fornecida de forma gratuita pela Silcca Nobre, produto já certificado como sílica verde do arroz, proveniente da queima controlada da casca do arroz da Pilecco Nobre, em Alegrete, no RS. Este produto tem o aspecto visual como registrado pela Figura 3.1, sendo assim comercializado, em estado sólido, como

um pó de dimensões micrométricas, com diâmetro médio menor que 8  $\mu\text{m}$ , na cor cinza claro e sem odor (SILCCA, 2021).



Figura 3.1 – Aspecto visual da cinza de casca de arroz (AUTORAL, 2021).

Por ser um produto padronizado, algumas características do material foram obtidas de outros estudos, como a análise granulométrica por Leon et al. (2020), apresentada na Tabela 3.1. e na Figura 3.2. Além dos dados do próprio fabricante, como o pH da cinza, que varia entre 8 e 10, sua massa específica de 2,16  $\text{g}/\text{cm}^3$  e sua superfície específica no intervalo de 15 a 20  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Tabela 3.1 – Propriedades físicas da Cinza de Casca de Arroz (Adaptado de LEON et al., 2020).

<b>Propriedade</b>	<b>Limites (ABNT, 2016)</b>	<b>Resultado</b>
Areia grossa (%)	$600 \leq D < 2000$ ( $\mu\text{m}$ )	0
Areia média (%)	$200 \leq D < 600$ ( $\mu\text{m}$ )	0
Areia fina (%)	$60 \leq D < 200$ ( $\mu\text{m}$ )	10
Silte (%)	$2 \leq D < 60$ ( $\mu\text{m}$ )	81
Argila (%)	$D < 2$ ( $\mu\text{m}$ )	9
IP (%)	-	Não plástica

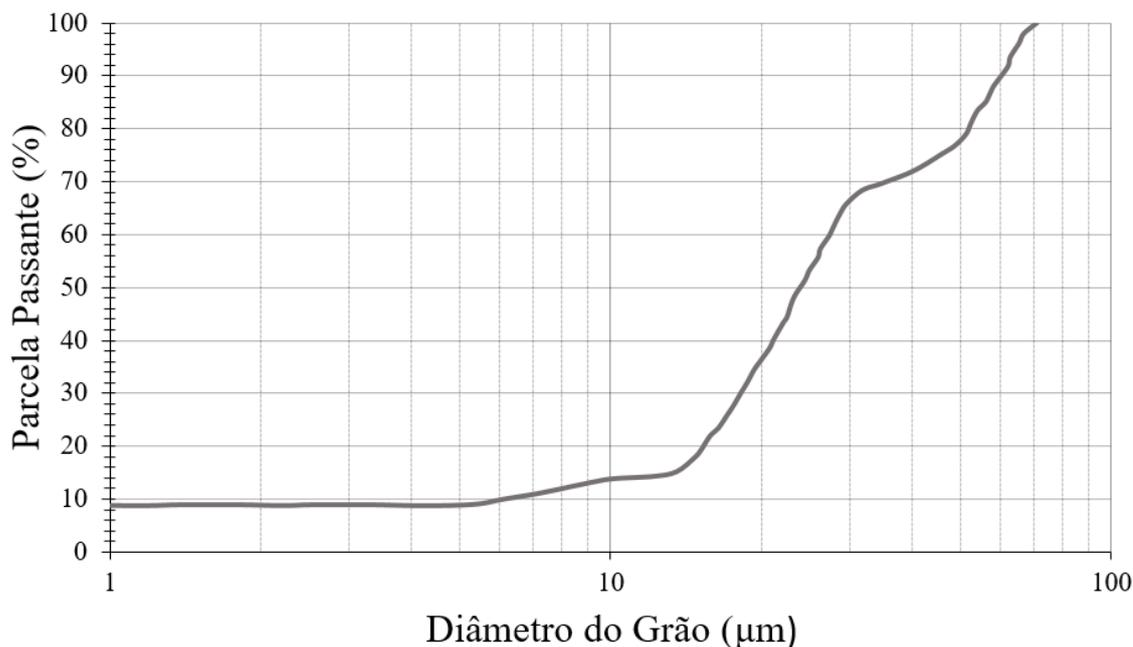


Figura 3.2 – Curva granulométrica da Cinza de Casca de Arroz Silcca Nobre (Adaptado de LEON et al., 2020).

Em relação à composição química, o fabricante garante a cinza ser integrada por sílica amorfa, óxido de ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio, potássio, carbono e umidade, sendo quantificada quanto a esses elementos e propriedade física na Tabela 3.2. Já sua composição química elementar obtida através do ensaio de fluorescência de raio X (FRX) é apresentada na Tabela 3.3. Através dessas informações, pode-se aferir que o material possui uma alta quantidade de sílica em estado amorfo ( $\geq 90$  % em peso), ou seja, reativa, confirmando seu potencial como material precursor na técnica de álcali ativação.

Tabela 3.2 – Composição da Silcca Nobre (SILCCA, 2021).

<b>Substância</b>	<b>Composição química (%)</b>
<b>Sílica Amorfa (SiO<sub>2</sub>)</b>	$\geq 90,0$
<b>Sílica Cristalina (SiO<sub>2</sub>)</b>	$\leq 2,0$
<b>Óxido de Sódio (Na<sub>2</sub>O)</b>	$\leq 1,5$
<b>Carbono Total (C)</b>	$\leq 6$
<b>Umidade (H<sub>2</sub>O)</b>	$\leq 3$

Tabela 3.3 – Composição química elementar da Cinza de Casca de Arroz determinada por FRX (Adaptado de SILCCA, 2021).

Elemento	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	MnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	Perda ao fogo
%	90,67	2,17	1,12	0,58	0,28	0,22	0,19	0,18	0,14	0,11	0,01	4,32

Ademais, ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da cinza de casca de arroz, após 24h de secagem a 60 °C, foram realizados a fim de se avaliar o formato e arranjo das partículas que a compõem (Figura 3.3 (a – d)). Neste sentido, conhecer a morfologia do material irá auxiliar na identificação da formação e evolução de produtos de reações das misturas álcali ativadas no item 4.4.2.2.

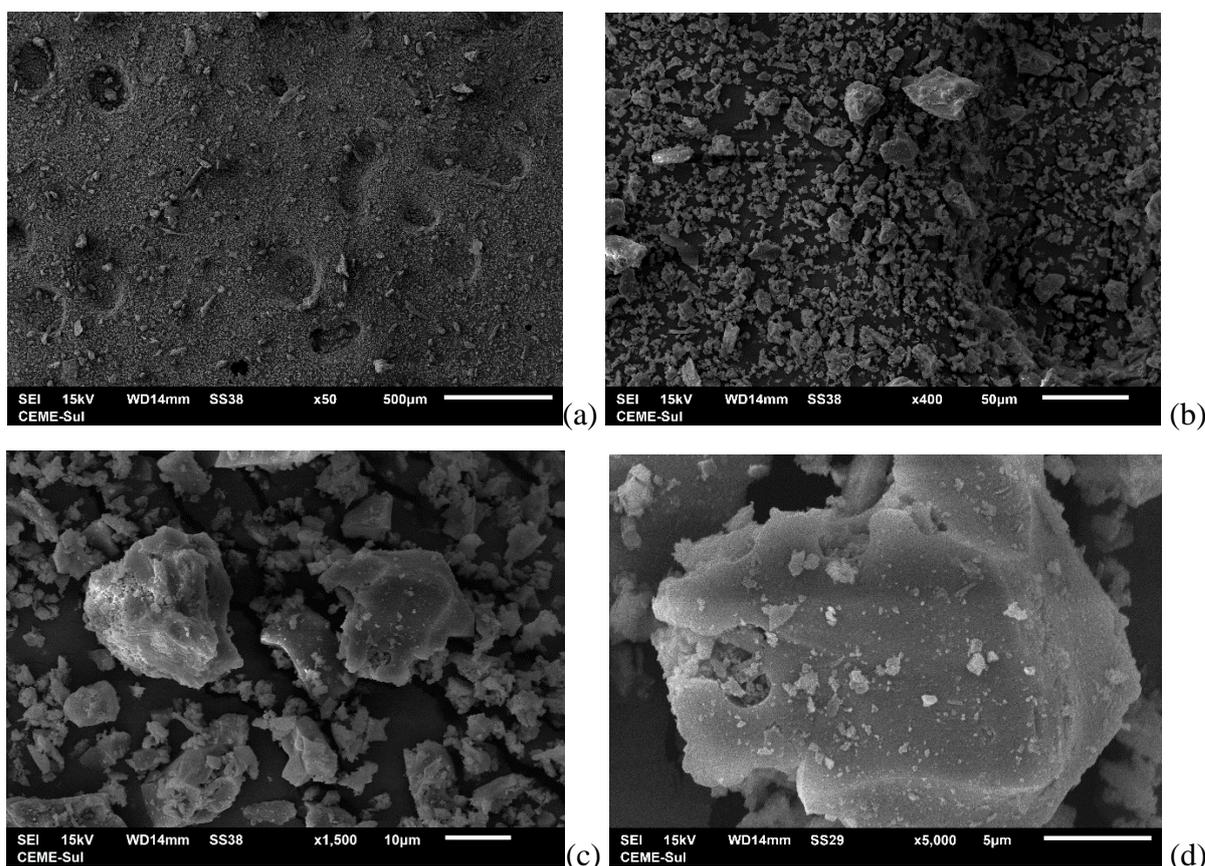


Figura 3.3 – Imagem MEV da CCA nas ampliações de (a) 50, (b) 400 vezes, (c) 1500 e (d) 5000 vezes (AUTORAL, 2021).

De maneira geral, nota-se que as partículas de cinza de casca de arroz não são homogêneas e possuem geometria irregular. Quando se aproxima do grão, como na Figura 3.3 (d), percebe-se que a textura superficial do material é plana e lisa.

Por fim, faz-se importante destacar que a CCA foi utilizada no programa experimental da maneira que é fornecida pelo fabricante, sem passar por nenhum processo de preparação de amostra, como quarteamento, secagem ou peneiramento. Sua umidade higroscópica foi medida sempre antes da realização dos ensaios, resultando na média de 1%.

### 3.1.2 Cal de carbureto

A cal de carbureto (CC) (Figura 3.4) utilizada é um resíduo oriundo da produção de gás acetileno, da White Martins Gases Industriais S.A., localizada no município de Sapucaia do Sul, no RS. Segundo dados de controle da empresa, estima-se que aproximadamente 2160 toneladas de CC sejam geradas por ano.



Figura 3.4 – Aspecto visual da Cal de Carbureto (AUTORAL, 2021).

Este resíduo é obtido em forma de pasta, com uma umidade de 48 a 60%. Para sua utilização neste trabalho, foi seco em estufa a 60°C por no mínimo 48h e posteriormente destorroado,

alguns dias antes da realização dos experimentos. Ademais, a fim de se obter um material mais uniforme e de aumentar sua reatividade (através do aumento da sua superfície específica), a cal de carbureto também foi peneirada na peneira de número #200 ( $D < 0,075$  mm).

Este material é amplamente estudado dentre o grupo de pesquisadores do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental – LEGG, com destaque a dissertação de Saldanha (2018), a tese Lotero Caicedo (2020), e outros estudos de mestrado que utilizaram a CC proveniente do mesmo lote que para este trabalho: Bruschi (2020), Secco (2020), Martinatto (2021) e Santos (2021). Portanto, algumas informações importantes sobre o material foram obtidas de trabalhos já publicados, como a análise granulométrica pelo método de difração de raios laser, elucidada na Figura 3.5, e suas principais propriedades físicas apresentadas na Tabela 3.4.

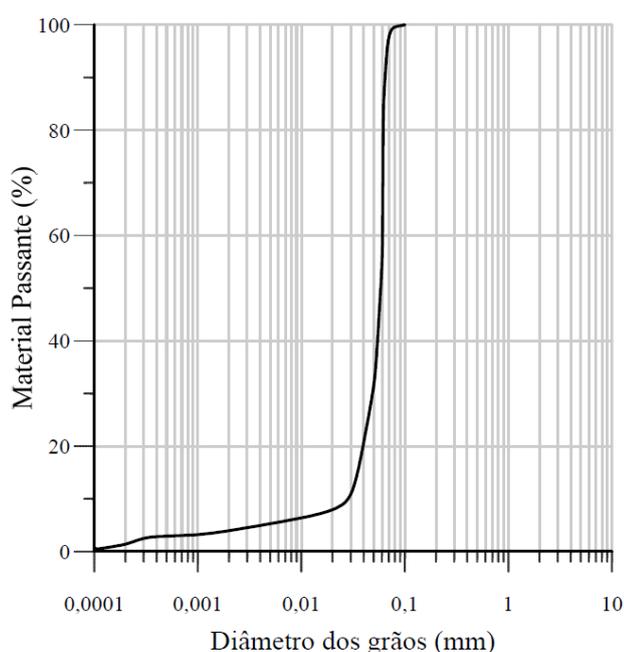


Figura 3.5- Distribuição granulométrica da cal de carbureto (SANTOS, 2021).

Analisando os dados obtidos pela Tabela 3.4, salienta-se que a elevada área de superfície específica pode indicar um potencial de grande reatividade do material. Ademais, sua composição majoritária em óxido de cálcio, e a quantidade de cálcio livre, indicam que a 66% da CC está disponível para reagir na produção do cimento alcalino. Outros autores como Lotero

Caicedo (2021), Bruschi (2020), Martinatto (2021) e Santos (2021), encontraram valores similares, corroborando com Saldanha (2018).

Tabela 3.4 – Propriedades da CC da White Martins Gases Industriais S.A. (SALDANHA, 2018).

Propriedade	Cal de carbureto	Método de determinação
Óxido de cálcio (CaO)	70,20%	NBR 6473 (ABNT, 2003)
Óxido de magnésio (MgO)	0,30%	
Resíduos insolúveis	1,60%	
Óxido de cálcio disponível	66%	
Massa Específica (Gs)	2,19 g/cm <sup>3</sup>	NM 23 (NBR, 2000)
pH	12,4	D4972 (ASTM, 2013)
Área de Superfície Específica	22,60 m <sup>2</sup> /g	BET

Em relação aos minerais presentes na CC, Saldanha (2018) obteve que em maioria é composta por Portlandita [Ca(OH)<sub>2</sub>], Calcita (CaCO<sub>3</sub>) e Grafite (Carbono), como mostra a Figura 3.6.

No que concerne à dominância dos respectivos dois primeiros, Lotero Caicedo (2021), Bruschi (2020), Martinatto (2021) e Santos (2021), também relatam tê-los encontrado.

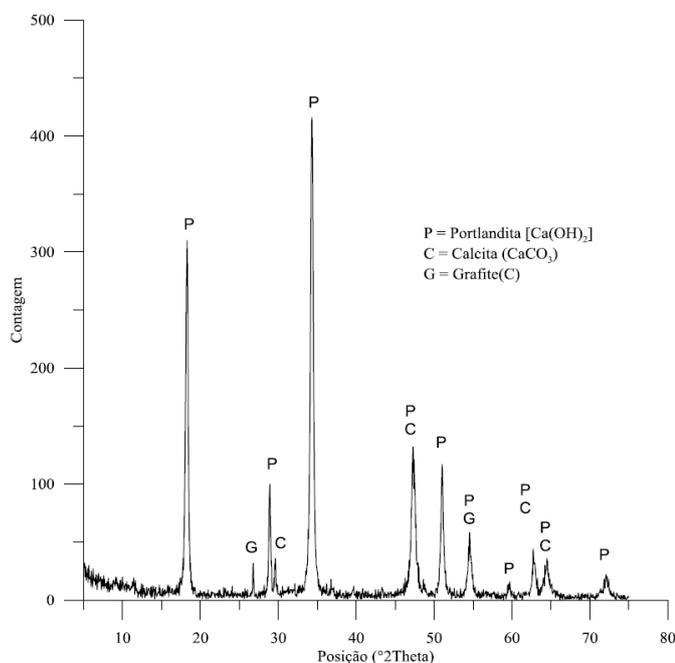


Figura 3.6 - Difração de Raios X da cal de carbureto (SALDANHA, 2018).

Ainda, de maneira análoga à caracterização da CCA, realizou-se ensaio de MEV para a cal de carbureto. Para tanto, o material foi seco em estufa a 60°C por 48 h e peneirado na malha de número #200 ( $D < 0,075$  mm). As Figuras 3.7 (a) e 3.7 (b) apresentam as imagens obtidas para ampliações de 400 e 1500 vezes, respectivamente.

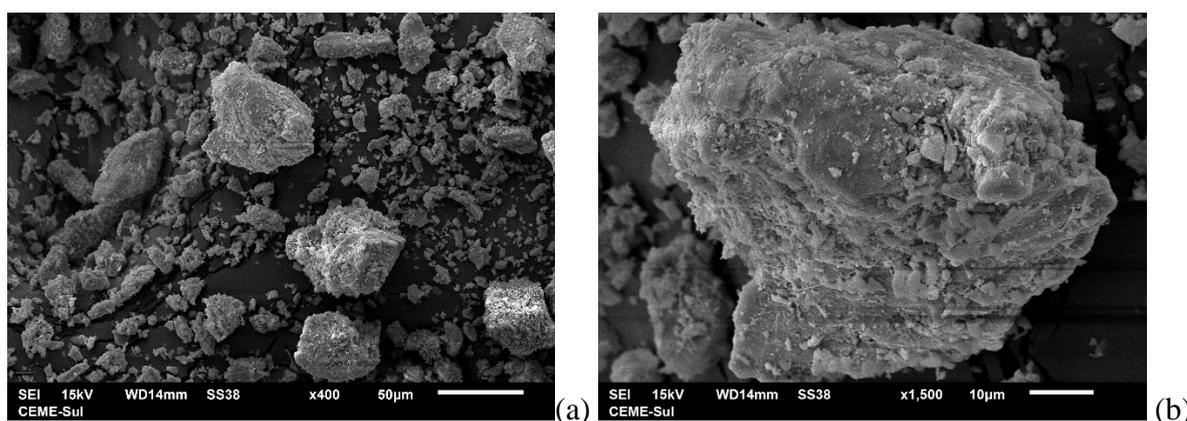


Figura 3.7 – Imagem MEV da CC nas ampliações de (a) 400 e (b) 1500 vezes (AUTORAL, 2021).

Das imagens obtidas nota-se que a cal de carbureto é constituída por partículas de formato medianamente esférico e levemente angular, apresentando textura superficial bastante irregular e rugosa.

### 3.1.3 Material dragado no Porto do Rio Grande em 2019

O solo utilizado nesta pesquisa provém da operação de dragagem realizada em 2018 e 2019 no Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande. Como visto no item 2.2.3, esta operação teve caráter de manutenção, e visava aumentar a profundidade do canal de 12,8 m para 14 m, permitindo o tráfego de navios de maior porte, especificamente, até 365 m de comprimento (ARAUJO et al., 2020).

A porção de solo concedida ao Laboratório de Geotecnia e Concreto Professor Claudio Dias (LGC) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) para fins de estudo, foi coletada no fim do processo de dragagem, em 2019, em frente ao cais do Porto Novo, como indica a Figura 3.8. Não obstante, por ser um local próximo às estruturas do complexo portuário, a draga utilizada

foi do tipo *Backhoe*, também conhecida como draga escavadeira, um tipo de equipamento que oferece maior precisão e força na retirada de sedimentos de corpos hídricos (Figura 3.9).

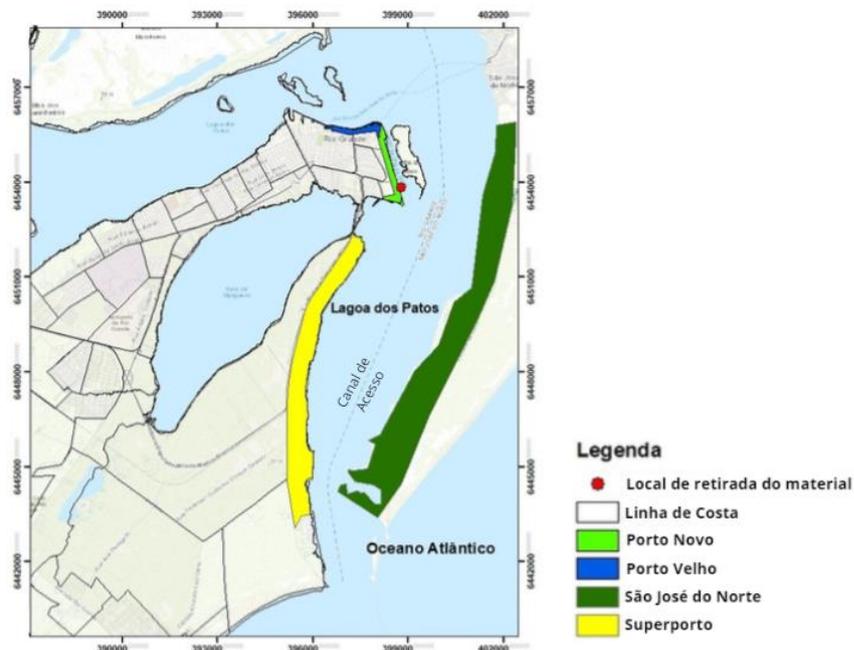


Figura 3.8 - Local de retirada do solo em estudo (AUTORAL, 2021).

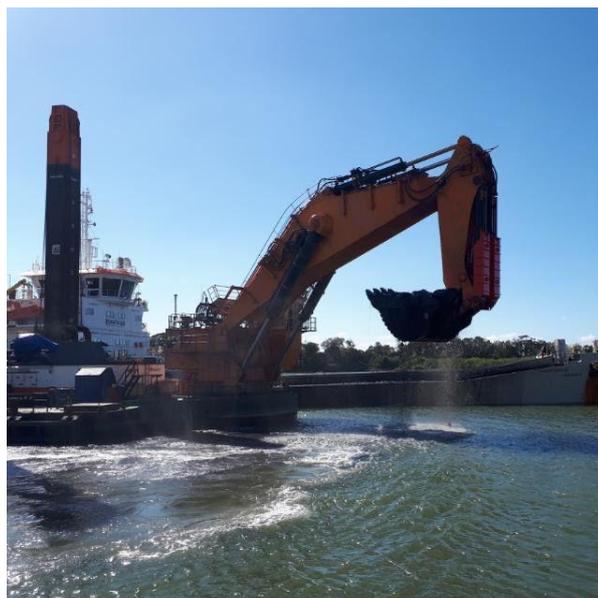


Figura 3.9 – Dragagem operante na retirada do material (AUTORAL, 2019).

Em relação à caracterização do material, no que concerne aos seus principais índices físicos, a lama apresenta uma umidade média de 170,22 % em seu estado saturado e um peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ) de 26,37 kN/m<sup>3</sup>. Estes valores foram determinados segundo a NBR 6457 (ABNT, 2016) e NBR 6508 (ABNT, 2014), pelo método da estufa e ensaio de picnômetro, respectivamente.

Seu peso específico aparente natural ( $\gamma$ ) resultou em 12,98 kN/m<sup>3</sup>. Este valor de  $\gamma$ , inferior ao comumente encontrado para solos em geral, em torno de 20 kN/m<sup>3</sup>, pode ser um indicativo de uma argila orgânica mole (PINTO, 2002).

Neste sentido, a presença de matéria orgânica no material também é indicada por sua coloração, pois em que pese se apresente como cinza – cor típica de solos sujeitos a condições de hidromorfia -, o material reflete um tom de cor escuro, além do odor característico de solos com presença de matéria orgânica. A Figura 3.10 (a) mostra a aparência do solo passante na peneira de malha #10 ( $D < 2\text{mm}$ ).



Figura 3.10 – Solo (a) antes e (b) depois do ensaio de teor de matéria orgânica (AUTORAL, 2021).

A verificação do teor de matéria orgânica foi realizada segundo as prescrições da NBR 13600 (ABNT, 1996), resultando em 2,32 % em peso de material seco. Segundo a classificação de solo orgânico proposta por Karlsson e Hansbo (1981) este solo é especificado como solo de baixo teor orgânico (2 a 6 %). Entretanto, em que pese à especificação, nota-se pela Figura 3.10 (b) que a quantidade de matéria orgânica foi suficiente para agregar a cor escura ao material.

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016). A Figura 3.11 apresenta a curva granulométrica obtida, e sua quantificação na Tabela 3.5, sendo este solo denominado segundo a ABNT (2016) como uma argila siltosa.

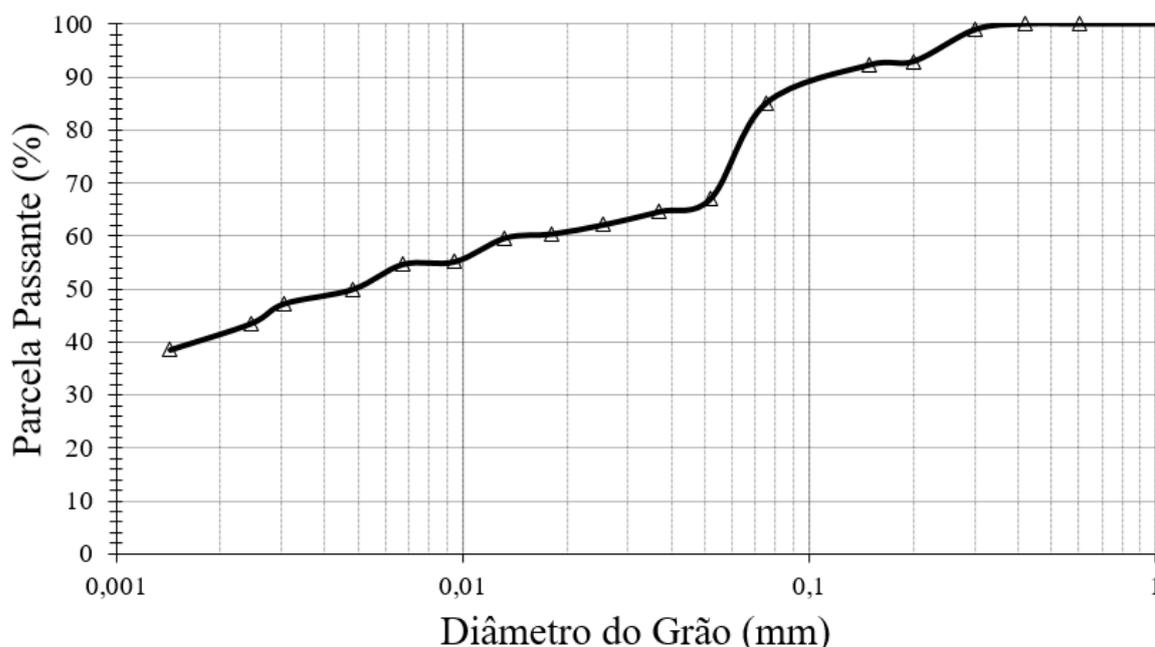


Figura 3.11 – Curva granulométrica do solo (AUTORAL, 2021).

Tabela 3.5 – Propriedades do solo dragado (AUTORAL, 2021).

Propriedade	Resultado	Normativa
Pedregulho ( $d > 2\text{mm}$ ) (%)	0	NBR 7181 (ABNT, 2016)
Areia Grossa ( $0,6 < d < 2\text{ mm}$ ) (%)	0	
Areia Média ( $0,2 < d < 0,6\text{ mm}$ ) (%)	7	
Areia Fina ( $0,06 < d < 0,2\text{ mm}$ ) (%)	19	
Silte ( $0,002 < d < 0,006$ ) (%)	33	
Argila ( $d < 0,002$ ) (%)	41	
Coefficiente de Uniformidade (Cu)	> 15	
Coefficiente de Curvatura (Cc)	-	
Índice de Plasticidade (IP)	13	
Limite de Liquidez (%)	60	NBR 6459 (ABNT, 2016)
Limite de plasticidade (%)	47	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Classificação SUCS	MH	D2487 (ASTM, 2017)

Sua classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (ASTM, 2017) também é apresentada na Tabela 3.5, qualificando-se como um silte de alta compressibilidade (MH). Ainda, a mesma tabela apresenta outros parâmetros determinantes para as classificações e entendimento das propriedades do solo, obtidos pela curva granulométrica e por limites de consistência.

Outra propriedade importante do material, é o conhecimento da umidade pela qual o solo compactado - em determinada energia- atinge seu maior peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ). Esse teor de umidade, conhecido como umidade ótima ( $w_{ót}$ ), estabelece a maior resistência estável que o material pode atingir ao ser compactado, isto é, melhorado por estabilização mecânica.

Para tanto, fez-se a curva de compactação do solo, segundo a NBR 6457 (ABNT, 2016) e a NBR 7182 (ABNT, 2016), na energia do Proctor modificada, com reutilização do material. O resultado é exposto pela Figura 3.12, atingindo um  $\gamma_d$  máximo de 15,30 kN/m<sup>3</sup> e uma  $w_{ót}$  de 26%.

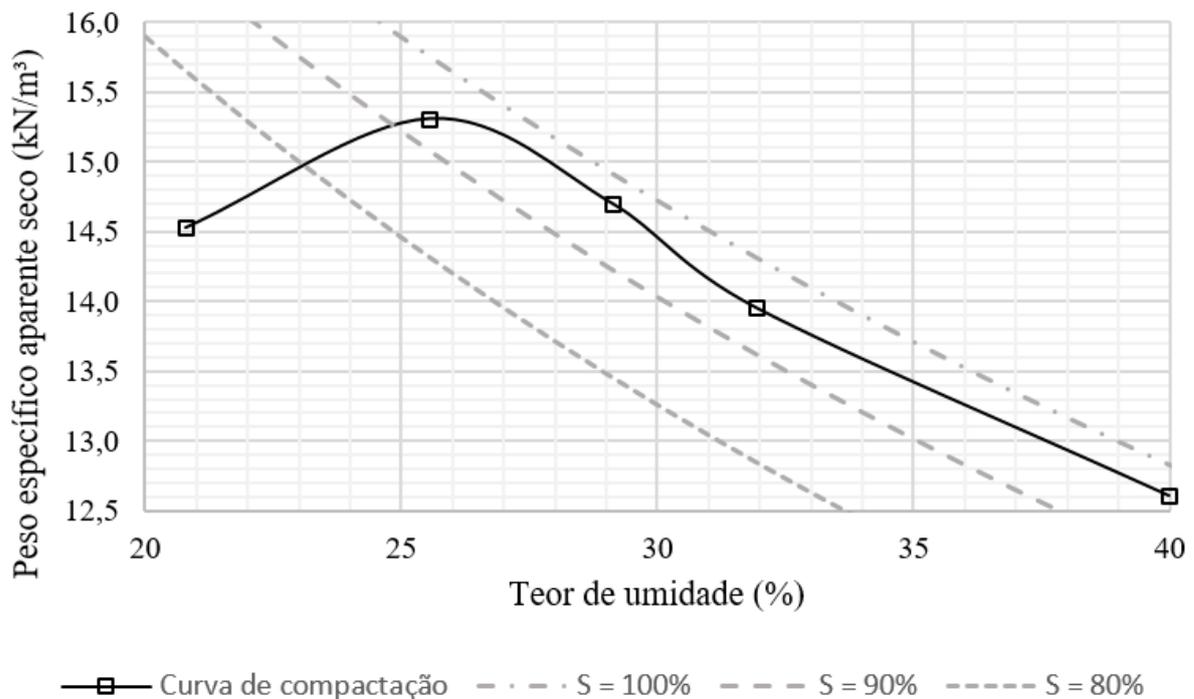


Figura 3.12 – Curva de compactação do solo na energia modificada (AUTORAL, 2021).

No tocante a caracterização mineralógica do material, foi realizada por análise de Difratomia de Raios X (DRX). A Figura 3.13 mostra o difratograma obtido, onde os picos correspondem fases cristalinas, e a presença de halos, indica sua natureza também amorfa, tipificando-se como um material semi-cristalino.

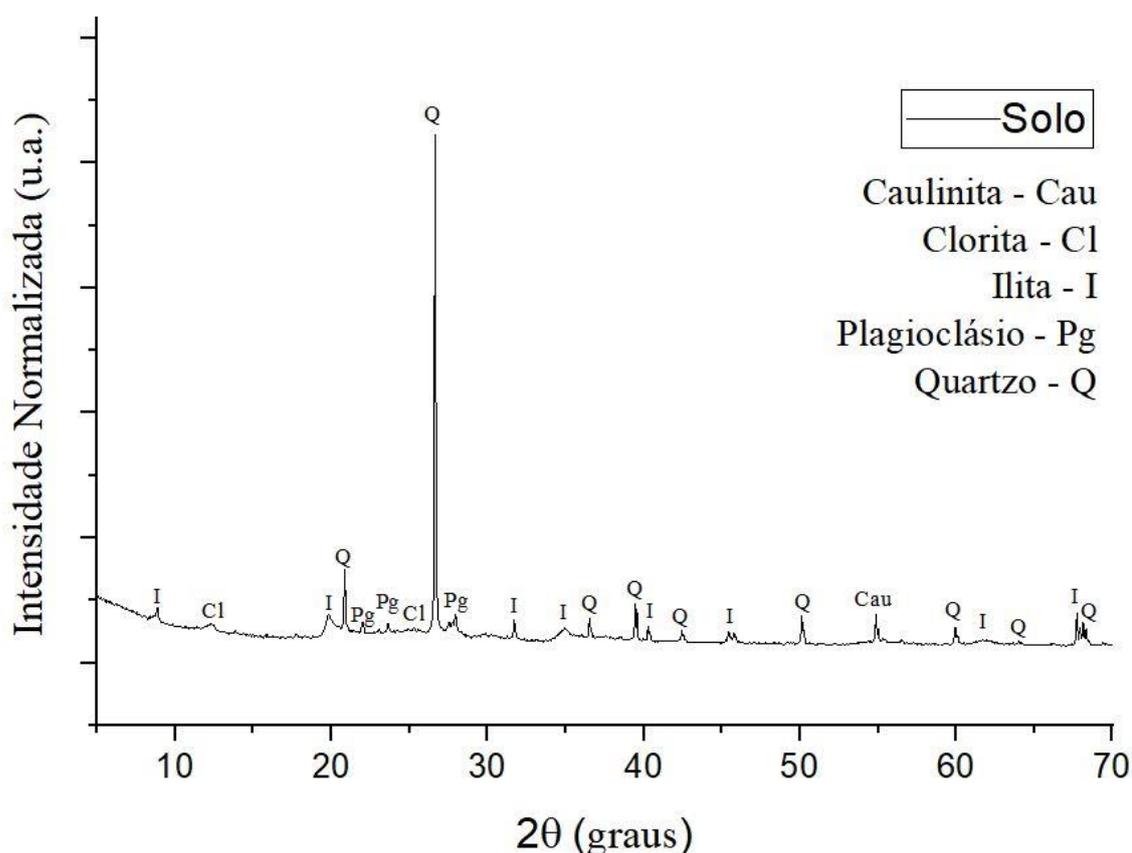


Figura 3.13 – Análise DRX do solo (AUTORAL, 2020).

A fase cristalina do solo é composta por quartzo (um mineral muito estável quimicamente), plagioclásio (mineral da família dos feldspatos), e por argilominerais: caulinita, ilita e clorita. Os argilominerais em quase sua totalidade, são filossilicatos, ou seja, possuem estruturas em forma de redes planas (lâminas) compostas geralmente por tetraedros (T) de silicato ( $SiO_4$ ) ou aluminato ( $NaAlO_2$ ) e octaedros (O) coordenados por átomos de magnésio (Mg) ou alumínio (Al).

A caulinita é um filossilicato que apresenta uma estrutura 1:1 (T-O), a illita apresenta estrutura 2:1 (T-O-T) e a clorita 2:1:1 (T-O-T-[O]). A distância basal de argilominerais 1:1 é menor, o que os tornam minerais mais estáveis. Já as argilas 2:1 e 2:1:1 por possuírem distância basal maior, tornam-se mais suscetíveis a trocas catiônicas, e são conhecidas por serem minerais expansivos.

Ensaio de microscopia eletrônica (MEV) também foram realizados para análise morfológica das partículas do solo. As Figuras 3.14 (a - d) apresentam as imagens obtidas para ampliações de 80, de 300, de 800 e de 1500 vezes, respectivamente.

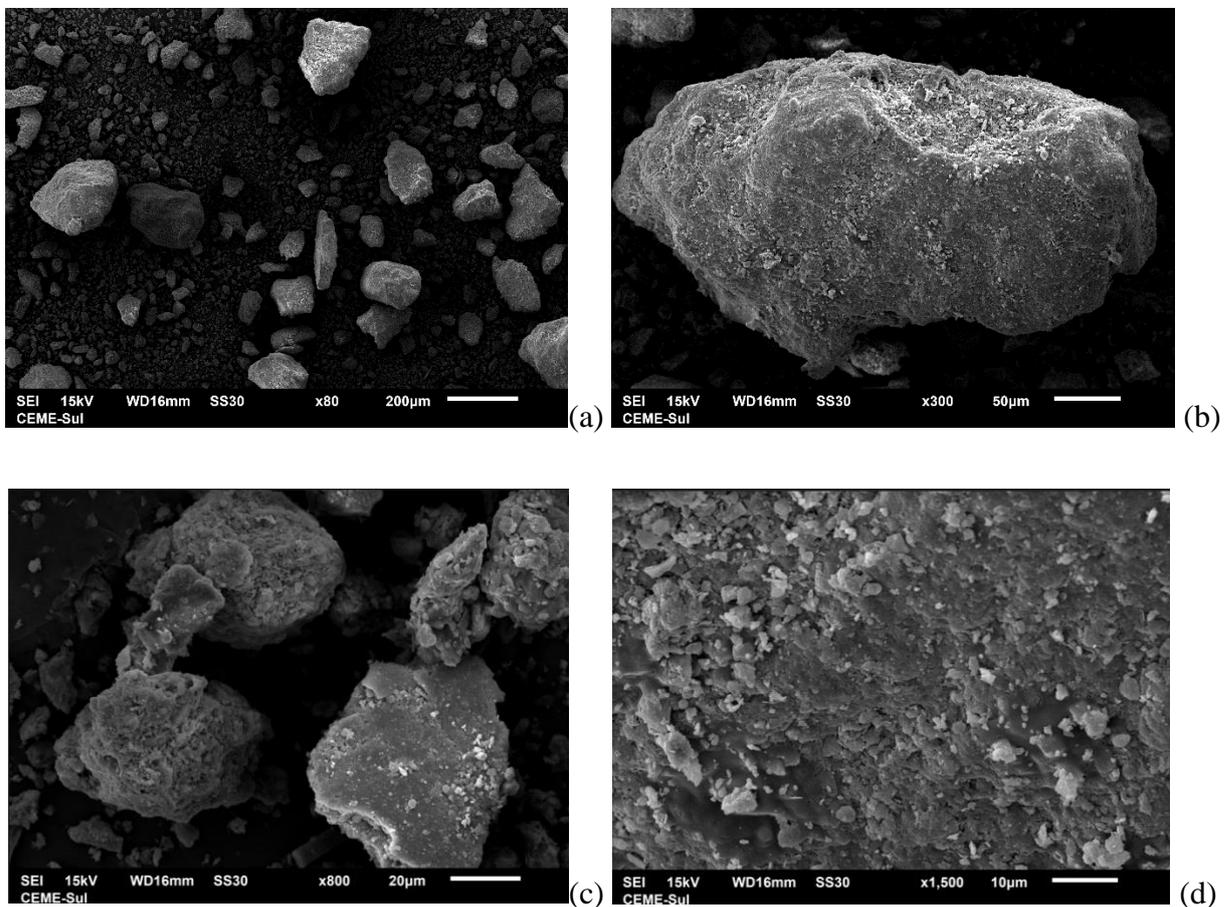


Figura 3.14 – Imagem MEV do solo nas ampliações de (a) 80, (b) 300, (c) 800 e (d) 1500 vezes (AUTORAL, 2021).

Na Figura 3.14 (a) identifica-se que o solo é composto por partículas de diversos tamanhos, provavelmente as maiores de areia média e/ou fina (entre 50 e 600  $\mu\text{m}$ ) e as menores de silte

(menores que 50  $\mu\text{m}$ ), ou então torrões nestas escalas granulométricas resultantes da presença de argila – partículas menores que 2  $\mu\text{m}$  capazes de envolver e agregar outros grãos. As partículas que compõe o solo, sejam elas grãos ou aglomerados, de maneira geral, como enfocam as Figuras 3.14 (b) e (c), apresentam-se como medianamente esféricas, um pouco angulosas e com uma textura rugosa.

Pode-se relacionar a textura superficial das partículas com a presença de grãos de argila as envolvendo. Na Figura 3.14 (d), com ampliação de 1500 vezes, consegue-se enxergar grãos de até 2  $\mu\text{m}$ , comprovando que a superfície da partícula maiores está envolta por pequenos grãos de argila.

No que tange a composição química do material, esta foi analisada a partir de ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX), e é apresentada na Tabela 3.6, em termos de concentração em peso (%) seus óxidos. Percebe-se que os elementos predominantes são Si, Al e Fe.

Tabela 3.6 – Composição química elementar em peso do material dragado (AUTORAL, 2021).

<b>Elemento</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Cl</b>	<b>MgO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>MnO</b>
Concentração (%)	52,63	19,59	7,02	5,6	5,09	3,5	2,49	1,47	0,97	0,91	0,24	0,16

Ainda, a resolução do CONAMA n° 454 (CONAMA, 2012) estabelece que seja feita a caracterização química do material em relação a elementos metálicos e semi-metálicos, para detecção de substâncias poluentes. Esta mesma resolução estabelece limites com níveis de classificação do material dragado para o caso de sua disposição em águas sob jurisdição nacional e direciona a resolução n° 420 (CONAMA, 2009) no estabelecimento de limites dos mesmos elementos em relação a sua disposição em solo.

Portanto, fez-se a análise quantitativa por FRX para detecção dos elementos traço, qual é apresentada na Tabela 3.7 em ppm (parte por milhão). A mesma tabela expõe os limites prescritos pela resolução do CONAMA n° 454 (2012) para disposição em águas

salinas/salobres e também os limites da resolução n° 420 (2019) para reutilização do material no âmbito industrial.

Em comparação os limites pré-definidos pela resolução n° 454 (CONAMA, 2012), o material é classificado como de nível 2, pois a concentração de Níquel (Ni) e de Cromo (Cr) extrapolaram os valores limites do nível 1. Um material assim classificado apresenta um limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

Quando o material é classificado no nível 2, o Artigo 12 desta mesma resolução recomenda que ainda sejam realizados ensaios de ecotoxicidade para sua disposição em águas sob jurisdição nacional. Como não é o objetivo desta pesquisa, essa fase de investigação não foi realizada.

Tabela 3.7 – Análise FRX para elementos traço em PPM (AUTORAL, 2021).

Elemento	Análise do material Concentração (PPM)	Limites (CONAMA, 2012) em ppm		Limites (CONAMA, 2009) em ppm
		Nível 1	Nível 2	
<b>Y</b>	41,7	-	-	-
<b>Pb</b>	37,5	46,7	218	900
<b>Ni</b>	40,3	20,9	51,6	130
<b>Cu</b>	31,4	34	270	600
<b>Sr</b>	138,8	-	-	-
<b>Zr</b>	171,9	-	-	-
<b>Zn</b>	124,2	150	410	2000
<b>Nb</b>	15,1	-	-	-
<b>Rb</b>	147,4	-	-	-
<b>Cr</b>	89,5	81	370	400
<b>Ba</b>	200,2	-	-	750
<b>Cd</b>	-	1,2	7,2	20
<b>Hg</b>	-	0,3	1	70

Entretanto, confirma-se pelos resultados encontrados na Tabela 3.7, que para sua reutilização em processos industriais, como para confecção de BTCs, o material dragado apresenta quantidade de substâncias traço dentro dos limites determinados pelo CONAMA, sendo assim, apto para tal.

Sendo assim, para utilização da lama no programa experimental, secou-se a mesma sobre lona, com espessura afinada, ao ar livre, por 4 dias (Figura 3.15 (a)). Após, o material em forma

planar e endurecido, foi moído no moinho de bolas (Figura 3.15 (b)), moendo aproximadamente 3 kg de material por 2 horas. Por fim, os torrões resistentes eram destorroados com auxílio de almofariz e mão de gral.



Figura 3.15 – (a) Secagem e (b) destorroamento do solo (AUTORAL, 2021).

#### 3.1.4 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) utilizado como ativador alcalino nesta pesquisa foi fornecido pela empresa RF Química, que o comercializa em escamas, na cor branca (Figura 3.16 (a)), com pureza analítica de 98% e densidade de  $2,13\text{g/cm}^3$ . Em relação a sua estequiometria, 1g de NaOH é composta de 0,775 g de  $\text{Na}_2\text{O}$  (álcalis) e 0,225 g de  $\text{H}_2\text{O}$ .

O material foi mantido armazenado em pote plástico e só foi manuseado nos dias de moldagem de corpos de prova, quando então era diluído em água destilada (Figura 3.16), em peso pré-calculado para que a solução atingisse a concentração e teor de álcalis desejados. Ademais, cabe frisar o cuidado em seu manejo por irritar a pele e o fato de sua dissolução ser uma reação

exotérmica (por isso, feita com o becker dentro d'água). A solução, então, só era utilizada após atingir a temperatura ambiente ( $\pm 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), assim certificando que as reações já haviam entrado em equilíbrio.



Figura 3.16 – Solução de hidróxido de sódio (AUTORAL, 2021).

## 3.2 MÉTODOS

Este subitem aborda a organização do programa experimental, além de uma breve conceituação do programa de experimentos adotado, incluindo a respeito do último, a determinação de suas variáveis e dos seus níveis.

### 3.2.1 Programa experimental

O programa experimental adotado nesta pesquisa divide-se em quatro etapas distintas, conforme apresentadas na Tabela 3.8. A **primeira etapa** compreendeu a coleta do material dragado do Porto do Rio Grande em campo, através de uma draga *Backhoe*, bem como a o seu transporte até o laboratório onde a pesquisa foi desenvolvida, e seu acondicionamento, no LGC (FURG), em Rio Grande, como explicado no item 3.1.3. Nesta etapa ainda se inclui a desidratação da lama, isto é, seu beneficiamento até que se tornasse um solo apenas com

umidade higroscópica, através de secagem em laminas ao ar livre, destorroamento e peneiramento.

Na **segunda etapa** foram feitos ensaios de caracterização do material dragado: limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), análise granulométrica (por peneiramento e sedimentação), peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ). Ademais, esta etapa compreendeu a preparação do restante dos materiais utilizados na pesquisa (cal de carbureto e cinza de casca de arroz), além do estudo da microestrutura dos materiais por difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), e o ensaio de compactação das misturas. A partir desta fase foi possível determinar os fatores controláveis do projeto experimental, quais serão especificamente abordados no item 3.2.4.

A **terceira etapa** abrangeu os ensaios relativos ao projeto experimental fatorial  $2^3$  usando a metodologia de superfície de resposta (item 3.2.2), tanto para ensaios de resistência à compressão simples, quanto para durabilidade por molhagem e secagem. Isso permitiu a análise estatística dos efeitos dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta, bem como a determinação da dosagem que “otimiza” as misturas dentro da região dos experimentos. Para mais, foram moldados corpos de prova a partir da dosagem do tratamento que apresentou os melhores comportamentos mecânicos - preconizando as exigências da NBR 10834 (ABNT, 2013) -, variando o tempo de cura, a fim de se estabelecer algumas idades para os BTCs da quarta etapa.

Ainda na terceira etapa, ensaios para análises mineralógicas e de microestrutura das amostras foram feitos (DRX e MEV), buscando não só identificar e caracterizar possíveis produtos de reação formados pela álcali ativação, mas também as modificações na estrutura do solo provenientes da cimentação artificial ao longo do tempo.

Por fim, a aplicação de todo o estudo desenvolvido neste trabalho se deu na **quarta etapa**, onde foram confeccionados BTCs em 3 idades de cura distintas e qualificados tanto em relação a resistência à compressão simples, quanto pela absorção de água.

Tabela 3.8 – Resumo do programa experimental (AUTORAL, 2021).

<b>Primeira etapa</b>	Coleta em campo e preparação das amostras de material dragado	Retirada do material do Canal de Acesso do Porto do Rio Grande por draga Backhoe
		Transporte e armazenamento no laboratório da FURG
		Secagem
		Destorroamento
		Peneiramento
<b>Segunda etapa</b>	Preparação e caracterização dos materiais	Massa específica real dos grãos
		Análise granulométrica
		Limites de Atterberg
		Compactação
		Mineralogia (DRX)
		Análise química (FRX)
		Microscopia eletrônica (MEV)
<b>Terceira etapa</b>	Avaliação dos efeitos dos fatores controláveis na resistência e durabilidade da mistura através de corpos de prova cilíndricos	Resistência à compressão simples
		Durabilidade por molhagem e secagem
		Determinação da dosagem dos materiais para confecção de BTCs
		Análise da resistência à compressão simples da mistura adotada em relação ao tempo de cura
		Mineralogia (DRX)
		Microscopia eletrônica (MEV)
<b>Quarta Etapa</b>	Confecção e qualificação dos BTCs	Resistência à compressão simples
		Absorção de água

### 3.2.2 Projeto de experimentos

A fim de se compreender a influência de algumas variáveis de dosagem para o fabrico dos BTCs, através da menor quantidade possível de ensaios, adotou-se como metodologia de investigação o projeto de experimentos. Este tipo de metodologia utiliza conceitos estatísticos com o intuito de aperfeiçoar tanto o planejamento, quanto a execução e a análise do experimento, entregando um ajuste ótimo dos fatores avaliados que maximizem o desempenho do sistema. Em outras palavras, realiza-se uma sequência de ensaios que assegurem o máximo de informação, com um investimento mínimo de material, tempo e dinheiro (MONTGOMERY, 2017).

A estratégia deste tipo de pesquisa implica que para validar hipóteses teóricas e entender as relações de causa e efeito num sistema, é necessário que se mude as variáveis de entrada (fatores controláveis) e se observe as mudanças no sistema de saída (variáveis de resposta)

Estabilização de material dragado no Porto do Rio Grande por álcali ativação de resíduos regionais para confecção de BTC

(MONTGOMERY, 2017). Quando um projeto envolve vários fatores ( $k$ ), como no caso da álcali ativação aplicada a estabilização de solos, existem abordagens que minimizam o número de experimentos, como o experimento fatorial  $2^k$ , especificamente aqui adotado.

Um projeto fatorial  $2^k$  permite a avaliação dos efeitos de “ $k$ ” fatores em apenas 2 níveis – alto (+1) e baixo (-1), como mostra a Figura 3.17 (a), promovendo o menor número de ensaios que pode ser estudado num projeto fatorial completo. Para tanto, devemos presumir que a resposta é aproximadamente linear ao longo da faixa dos níveis de fator escolhidos, como indica a Figura 3.17 (b) (MONTGOMERY, 2017).

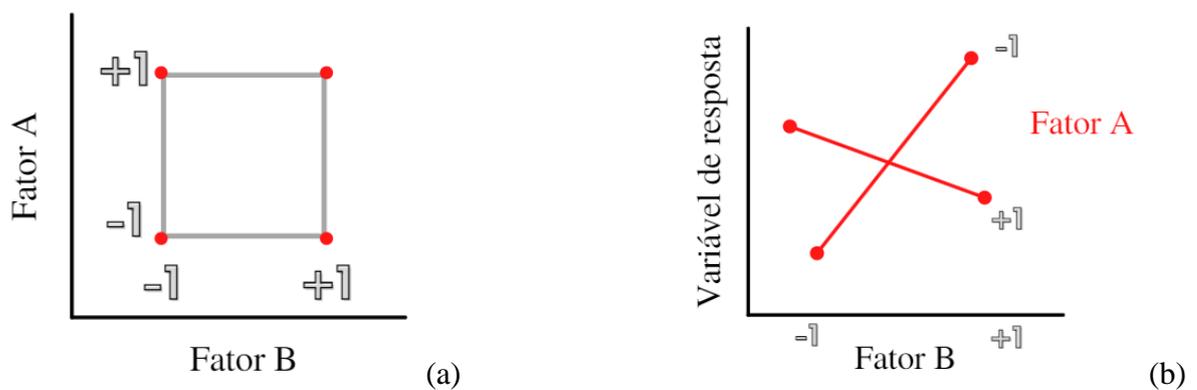


Figura 3.17 – Representação (a) de um experimento  $2^2$  e (b) do efeito dos fatores (k) A e B (AUTORAL, 2021).

Todavia, quando possível, recomenda-se que sejam adicionados ensaios de pontos centrais dos fatores, a fim de comprovar a linearidade dos seus efeitos e/ou detectar a presença de uma curvatura na função de resposta (Figura 3.18 (b)). Os pontos centrais, como o próprio nome indica, consistem na combinação dos pontos do centro de todos os fatores, exemplificados na Figura 3.18 (a).

Além disso, os pontos centrais e suas repetições aumentam os graus de liberdade do termo “erro” na tabela ANOVA, permitindo uma avaliação mais precisa da variância experimental, sem prejudicar o balanço na estimativa, nem os efeitos principais (PULIDO et al., 2012; LOTERO CAICEDO, 2020). Cabe também ressaltar, que quando a implementação deste tratamento detectar uma possível curvatura em ao menos um dos fatores em estudo, estará

indicando efeitos quadráticos ( $A^2$ ,  $B^2$ , ...  $k^2$ ), mas sem conseguir avaliar quais deles são significantes, sendo indicado a adição de pontos axiais ou em estrela (PULIDO et al., 2012; LOTERO CAICEDO, 2020).

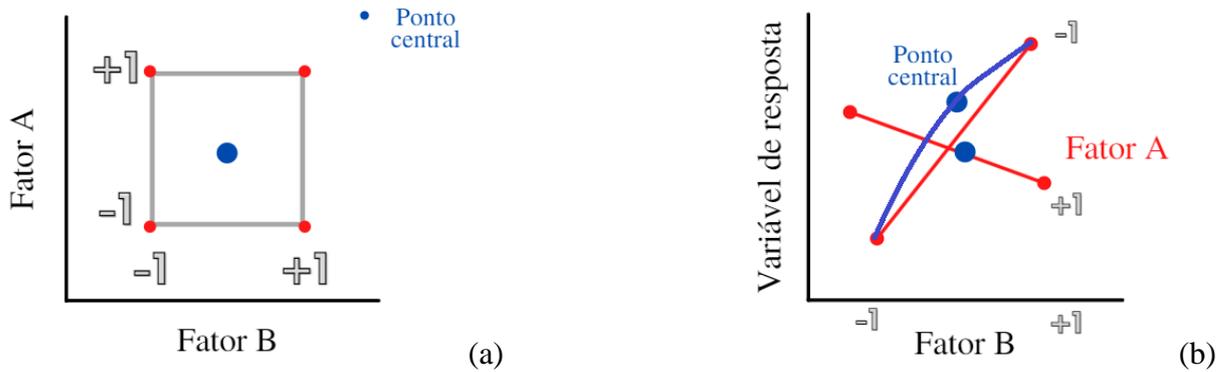


Figura 3.18 – Pontos centrais (a) no experimento  $2^2$  (b) na análise dos efeitos dos fatores (AUTORAL, 2021).

Por exemplo, em um projeto fatorial  $2^3$ , os pontos axiais serão aqueles centrados nas faces do cubo, como demonstra a Figura 3.19, respeitando que  $\alpha$  seja igual a 1, ou seja, que a distância entre o centro do cubo e qualquer ponto utilizado seja de uma unidade. Então, uma vez detectada alguma curvatura no projeto fatorial ( $2^k$ ), o experimento aumenta com mais pontos experimentais para analisá-la, ajustando o modelo de análise para um modelo de regressão de segunda ordem, denominado de Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO).

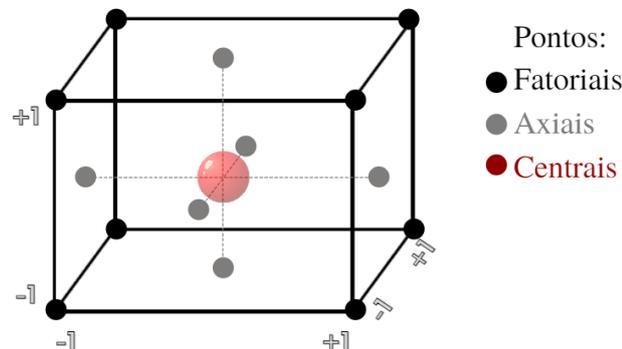


Figura 3.19 – Projeto Composto de Segunda Ordem com pontos axiais para  $k = 3$  (AUTORAL, 2021).

Nesta pesquisa foi utilizado o PCSO a partir de um projeto fatorial completo de 3 fatores ( $2^3$ ) que serão melhor abordados no subitem a seguir (3.2.3), incluindo a análise do ponto central (1 ou 2 tratamentos) e de 6 pontos axiais sobre as faces do cubo. Esse projeto foi adotado para 2 variáveis de respostas: resistência à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem, sendo que respectivamente a primeira foram realizadas três repetições independentes e dois pontos centrais, totalizando 48 experimentos, já a segunda com apenas uma repetição e um ponto central, totalizando 15 análises.

### 3.2.3 Variáveis investigadas

De acordo com a teoria de projetos de experimento, as principais variáveis de um sistema podem ser divididas em 3 grandes grupos: (i) fatores controláveis, que são os fatores investigados no experimento; (ii) fatores constantes, aqueles fixados no experimento, sendo estas duas as variáveis de entrada do sistema; e (iii) fatores de resposta, que são relativas as propriedades em que se está qualificando o sistema.

Ademais, existe um quarto tipo de fator: os fatores de ruído, que são variáveis que não podem ser controladas e podem gerar algum erro ou variabilidade residual no experimento, como por exemplo o cansaço do operador em tal dia e tal hora. Para diminuí-lo, pode-se tratar os ensaios de maneira randomizada, isto é, de maneira estatisticamente aleatória.

Variáveis Controláveis ( $k = 3$ ):

- a) Composição do material precursor sólido (relação CC/PR): relação em peso entre a quantidade de cal de carbureto e o conteúdo de precursor sólido ( $PR = CCA + CC$ );
- b) Concentração molal e de álcalis da solução ativadora (SA): relação de moles de NaOH por litros de  $H_2O$ , combinado com a porcentagem em peso entre o conteúdo de álcalis da solução ativadora ( $Na_2O$ ) e o conteúdo de material precursor sólido;

- c) Teor de precursor sólido na mistura (relação PR/solo): relação em peso entre a quantidade de precursor sólido (CCA + CC) e porção de solo.

Variáveis Fixas:

- a) Tipo de solo, de cal, de cinza de casca de arroz e de ativador alcalino;
- b) Tempo de cura (t);
- c) Temperatura de cura (TC);
- d) Porosidade ( $\eta$ ): expressa através do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ );
- e) Umidade de moldagem (w);
- f) Relação líquidos/sólidos (A/C): relação em peso entre a quantidade de água e de solutos no agente cimentante.

Variáveis de saída:

- a) Resistência à compressão simples ( $q_u$ );
- b) Perda de massa por ciclos de molhagem e secagem (PMA).

### 3.2.4 Definição dos níveis das variáveis de entrada

O processo de determinação dos níveis tanto das variáveis controláveis, quanto das variáveis fixas serão individualmente descritos ao longo deste item. De antemão, apresenta-se um resumo de todas as variáveis envolvidas no projeto em forma da Tabela 3.9, afim de promover um entendimento facilitado da abordagem utilizada.

Tabela 3.9 – Resumo das variáveis estabelecidas para os programas experimentais PCSOs e seus níveis (AUTORAL, 2021).

	Tipo de fatores	Nomenclatura	Níveis			
			1 (baixo)	0 (central)	1 (alto)	
Variáveis controláveis	Composição do material precursor sólido (%)	CC/PR	20	30	40	
	Concentração da solução ativadora	Em moles de NaOH (mol) Em peso de Na <sub>2</sub> O (%)	SA	2	4	6
				4, 9 ou 19	8, 18 ou 38	13, 27 ou 57
	Teor de precursor sólido na mistura (%)	PR/solo	10	20	30	
Variáveis fixas	Tempo de cura (dias)	t		7		
	Temperatura de cura (°C)	TC		23		
	Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$		14		
	Umidade de moldagem (%)	w		28,5		
	Relação líquidos/sólidos	A/C		0,67		
Variáveis de saída	Resistência à compressão simples	RCS				
	Perda de massa por ciclos de molhagem e secagem	PMA				

Considerando a abordagem experimental fatorial  $2^k$  já percorrida no item 3.2.2, busca-se incluir 2 extremos (mínimo e máximo) na definição dos níveis de variáveis controláveis, a fim se obter uma superfície de resposta ampla, mas que ao mesmo tempo apresente contornos críveis à literatura de solos estabilizados por cimentos álcali ativados. Neste sentido, foi definido como nível -1 de **relação de CC/PR** um teor de 20%, ou seja, 20% do peso do precursor sólido constituído de cal de carbureto e 80% em cinza de casca de arroz, valores também estipulados por Servi (2021), que estudou os mesmos precursores. De modo análogo e complementar, determinou-se para o nível +1 da relação de CC/PR um teor de 40%.

Não obstante, os teores de precursores sólidos na mistura (**relação PR/ solo**), foram definidos como 10% para o nível -1, e 30% para o +1, seguindo a proporção de 90% e 70% para o solo.

Sendo estes, valores já estudados por outros autores que utilizaram como precursor a CC e a CCA, como Consoli et al. (2019, 2020), Leon et al. (2020) e Conti (2018).

Para a determinação do **peso específico** e da **umidade de moldagem**, procurou-se encontrar o maior peso específico de moldagem aplicável, e para isso, foi realizada uma curva de compactação a partir da mistura com maior teor de cal de carbureto prevista no programa, sabendo que a adição de cal a mistura, provoca uma queda acentuada no  $\gamma_d$  e um acréscimo na  $w_{ót}$  (TRB, 1987). Portanto, o maior  $\gamma_d$  de moldagem aplicável foi determinado a partir de um precursor composto por 40% de CC e 60% de CCA, em paralelo com a dosagem de 30% de PR e 70% de solo.

Dito isso, realizou-se o ensaio de compactação na energia do Proctor modificado, seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 7182 (ABNT, 2016). Os pontos foram compactados sem reutilização de material e utilizando água destilada.

A Figura 3.20 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio, através das curvas de compactação. O peso específico aparente máximo e correspondente teor de umidade ótimo, respectivamente, em aproximadamente 14 kN/m<sup>3</sup> e 28,5%, sendo estes os valores estabelecidos para as variáveis fixas de **peso específico** e **umidade de moldagem**.

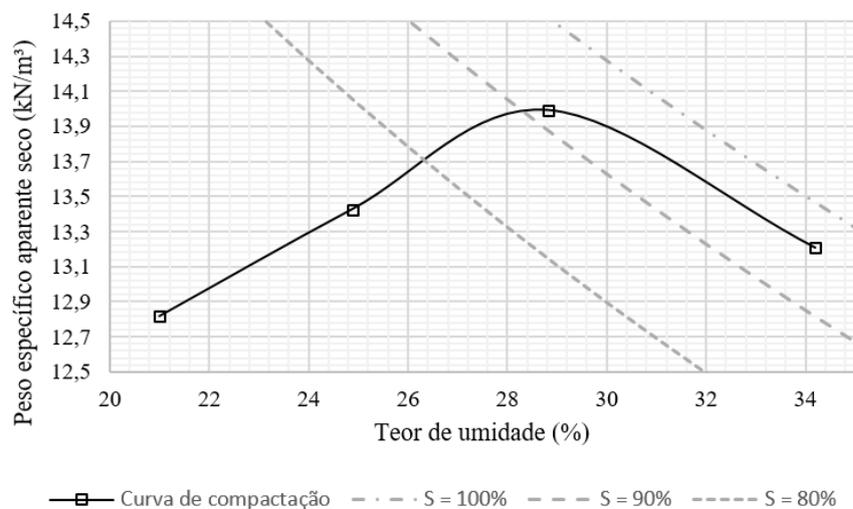


Figura 3.20 – Curva de compactação e curvas de mesmo grau de saturação da mistura com maior teor de CC (AUTORAL, 2021).

Já a **relação água/cimento** foi determinada a partir do estudo de Servi (2021), através do ensaio de consistência normal prescrito pela NBR 16606 (ABNT, 2018), realizado com CC, CCA e água destilada. Essa variável é responsável por fixar o menor valor de água requerida que garanta a homogeneidade e trabalhabilidade das misturas. O valor de A/C obtido que satisfizes todas as misturas foi de 0,67.

Em relação a definição dos níveis de **concentração da solução ativadora** (SA), é sabido que por ser um sistema alto cálcio, demandaria menores concentrações de hidróxido de sódio. Servi (2021), em seu estudo a partir de pastas de CCA e CC, chegou a um teor ótimo em relação à RCS a partir da mistura de 20% de CC, 80 % de CCA, 4% de álcalis, 4 mol de NaOH e 1,2 de módulo de sílica.

Desta feita, estabeleceu-se como o valor mínimo de SA, igual a 2 mol e o máximo, de 6 mol, ou seja, com uma variação de  $\pm 2$  mol em relação a concentração ótima encontrada por Servi (2021). Não obstante, considerando a relação A/C de 0,67, e os 3 níveis de precursor, obteve-se as seguintes concentrações de álcalis apresentadas na Tabela 3.10, combinadas às concentrações de soluções de hidróxido de sódio de 2, 4 e 6 mol.

Tabela 3.10 – Teor de álcalis em relação ao peso de precursor (AUTORAL, 2021).

<b>PR /SA</b>	<b>10 %</b>	<b>20 %</b>	<b>30 %</b>
<b>2 mol</b>	4 %	9 %	19 %
<b>4 mol</b>	8 %	18 %	38 %
<b>6 mol</b>	13 %	27 %	57 %

Em relação à **temperatura de cura** (TC) optou-se por fixar e adotar a temperatura ambiente de  $\pm 23^{\circ}\text{C}$ , apesar de vários trabalhos já terem apontado a temperatura como um agente catalizador no desenvolvimento de cimentos alcalinos, como Scheuermann Filho (2019), Consoli et al. (2019), Leon et al. (2020) e Conti (2018). Quanto à escolha por um **tempo de cura** (t) de 7 dias, se justifica por ser um estudo prévio e mais rápido das misturas que serão aplicadas e avaliadas em relação a esta variável fora da abordagem fatorial, diminuindo um fator “k” ao programa.

### 3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este item refere-se aos procedimentos adotados para a realização dos ensaios do programa experimental, com o intuito de que outro pesquisador consiga reproduzi-los, atingindo resultados análogos ou complementando a presente pesquisa. Para tanto, o item abrange pontos como detalhes de execução, normas utilizadas e características de equipamentos.

Quase todos os ensaios foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), principalmente no Laboratório de Geotecnia e Concreto Professor Claudio Dias (LGC), e também no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL, FURG). Exceto os ensaios de Fluorescência de Raios X, executados no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CT-Pedras, UPF) e no Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica (CPGq, UFRGS).

#### 3.3.1 Mistura, moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos

Os corpos de prova (CP), em sua totalidade, foram moldados a partir da mistura de solo passante na peneira de malha #10 ( $d < 2$  mm), cal de carbureto (passante na malha #200), cinza de casca de arroz, solução de hidróxido de sódio e água destilada. De acordo com as quantidades em peso estabelecidas pela Tabela 3.9.

Para que a moldagem ocorresse de maneira mais ágil, os materiais foram acondicionados em embalagens individuais e lacradas no dia anterior ao ensaio (Figura 3.21), sendo os pesos quantificados através de balança com precisão de 0,01 g. No dia de moldagem, o processo tinha início pela produção da solução ativadora, e aguardava-se até que as reações entrassem em equilíbrio.

Como a quantidade de álcalis de  $\text{Na}_2\text{O}$  e de concentração molal de  $\text{NaOH}$  diferem a cada tratamento, cada CP demandava uma porção específica de solução ativadora. Portanto, o restante de líquidos em peso para se atingir o teor de umidade de moldagem foi complementado por água destilada.



Figura 3.21 – Materiais sólidos separados para mistura e moldagem (AUTORAL, 2021).

As parcelas líquidas, após a devida pesagem foram misturadas com a cinza de casca de arroz e a cal de carbureto em um misturador mecânico (Figura 3.22 (a) e (b)) em velocidade baixa por 30 s, sendo em seguida a parcela de solo adicionada. Por fim, misturava-se por 30 s na velocidade baixa e mais 60 s na velocidade alta, homogeneizando o material de maneira similar a estabelecida para o cimento Portland na NBR 7215 (ABNT, 2016).



(a)



(b)

Figura 3.22 – Misturas produzidas com misturador mecânico (AUTORAL, 2021).

Desta mistura homogeneizada, foram retiradas amostras em 3 cápsulas para aferição da umidade de moldagem. Em seguida, o peso de mistura necessário para o molde do CP era dividido em 3 porções iguais e armazenados individualmente em recipientes fechados, evitando perda de umidade durante o processo de moldagem.

A moldagem foi realizada através de moldes cilíndricos, utilizando: (i) um molde tripartido de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para confecção de amostras para o ensaio de resistência à compressão simples; e (ii) o mesmo molde empregado para ensaio de CBR, confeccionando amostras de 10 cm de diâmetro e 12 cm de altura, para durabilidade por ciclos de molhagem e secagem.

A prensagem do material foi realizada de maneira estática através de prensa hidráulica (Figura 3.23 (c)), dentro de molde metálico lubrificado, e em 3 camadas de mistura. Cada recipiente continha o material de uma camada (Figura 3.23 (a) e (b)), e entre uma prensagem e outra, escarificava-se o topo da camada anterior para garantir a aderência da subsequente.

Ao término da moldagem, foram verificadas a massa total do CP e também as dimensões do mesmo através de paquímetro com precisão de 0,01 mm. As Figuras 3.24 (a) e (b) apresentam os corpos de prova moldados para os ensaios de resistência à compressão simples e de durabilidade, respectivamente.

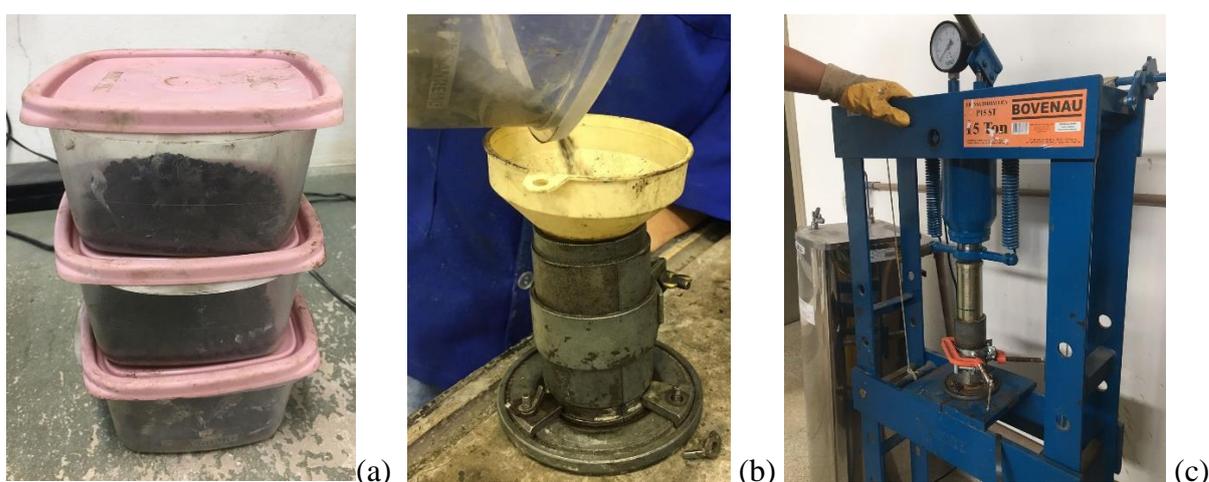


Figura 3.23 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos (AUTORAL, 2021).

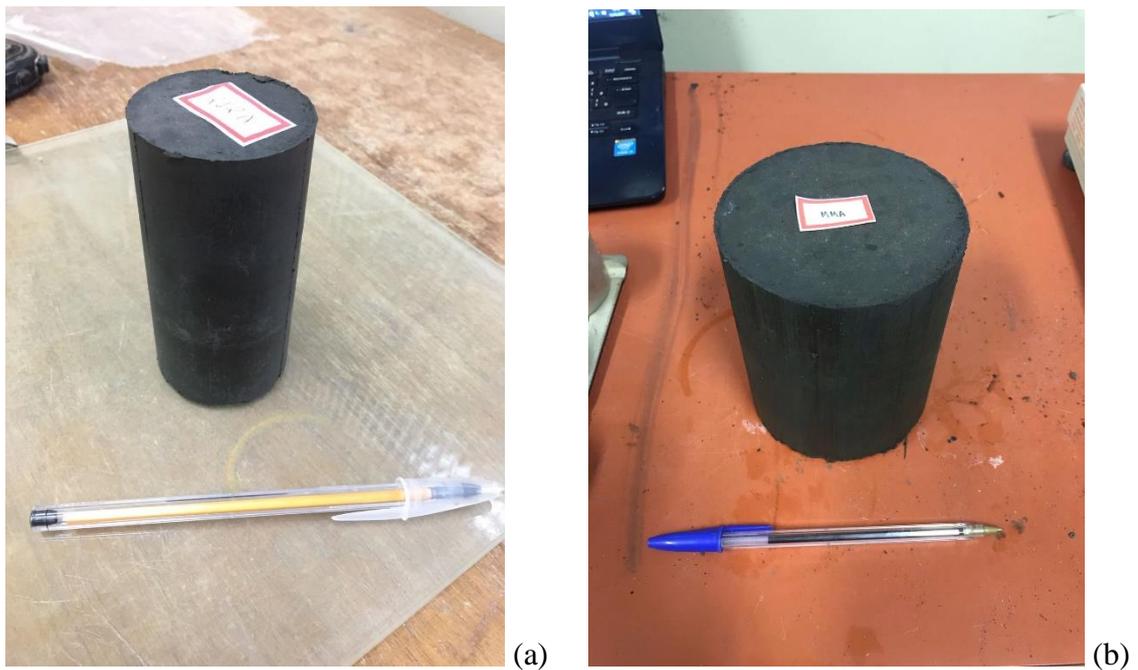


Figura 3.24 – Corpos de prova para (a) ensaio de RCS e (b) ensaio de durabilidade (AUTORAL, 2021).

Por fim, cada corpo de prova era armazenado em 2 sacos plásticos, lacrados e alocados em cômodo sem luz direta, com temperatura controlada para sua cura de  $\pm 23^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.25).



Figura 3.25 – Cura dos corpos de prova cilíndricos (AUTORAL, 2021).

### 3.3.2 Resistência à Compressão Simples de corpos de prova cilíndricos

O ensaio de RCS, também conhecido como compressão não confinada ou uniaxial, determina a resistência à compressão simples sem confinamento lateral de um material, resultando no valor da carga que rompe por cisalhamento um CP cilíndrico submetido a um carregamento axial, isto é, o valor da carga máxima de ruptura do material. Este ensaio é muito utilizado em programas experimentais de melhoramento de solos através de agente cimentante, por ser um ensaio que consegue avaliar o efeito da cimentação de maneira simples, com fácil execução e baixo custo.

Para a realização do ensaio tomou-se como referência normativa a NBR 12025 (ABNT, 2012), e procedeu-se a moldagem dos corpos de provas como explicado no item 3.3.2. No dia anterior ao CP cumprir seu tempo de cura pré-estabelecido, eles foram imersos em água à temperatura ambiente (mesma da cura) por um período de 24 h, de forma a principalmente (mas não só) minimizar os efeitos de sucção, mas também de qualificar de forma indireta a ocorrência de cimentação. Caso esta não ocorresse de maneira suficiente, calharia na desagregação do material na água.

Após a imersão, o corpo de prova era levemente enxugado, e sua massa era novamente aferida, a fim de se comprovar a saturação do material. Por fim, executava-se o rompimento do CP por meio de prensa elétrica de compressão (Figura 3.26 (a)), com velocidade de carregamento de 1 mm/min, e de uma célula de carga com capacidade de 5000 kgf (Figura 3.26 (c)), previamente calibrada, para medir a carga axial aplicada. Em relação à aquisição dos dados, foi realizada por unidade Spider® da HBM e gerenciada pelo software Catman® (Figura 3.26 (b)).

Desta forma, para a determinação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ), verifica-se a carga axial máxima aplicada ( $Q$ ), isto é, aquela verificada pela célula de carga no momento de ruptura do CP, e divide-se pela área em que a carga foi aplicada, ou seja, a área da seção horizontal do CP.

A Equação 3.1 dispõe essas relações de forma resumida, sendo  $D_m$  o diâmetro médio do CP obtido a partir das medições de topo, centro e base.

$$q_u = \frac{Q}{\frac{\pi \times D_m^2}{4}} \quad (3.1)$$

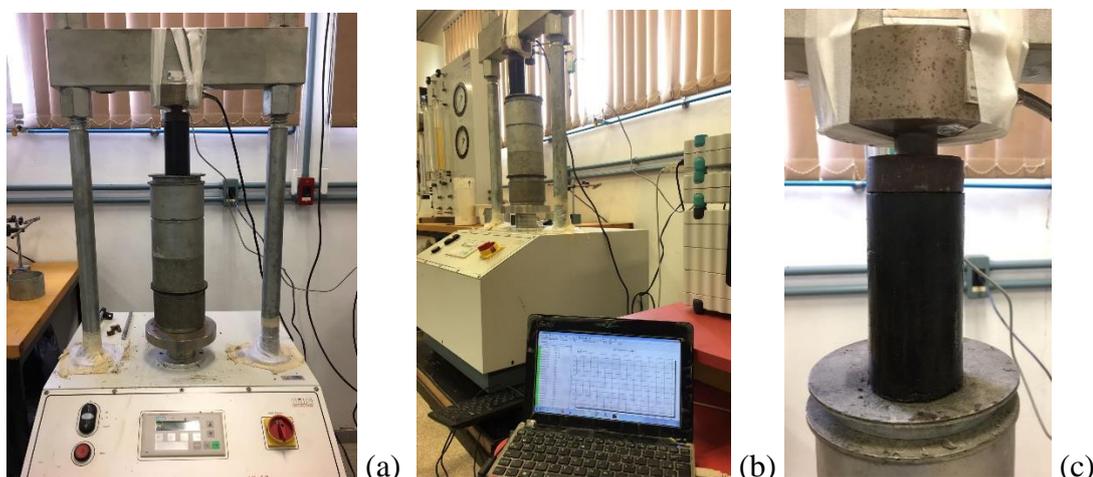


Figura 3.26 – Ensaio de RCS (AUTORAL, 2021).

### 3.3.3 Durabilidade por Ciclos de Molhagem e Secagem

A avaliação da durabilidade é certamente um dos aspectos de desempenho mais importantes - junto com a RCS e a absorção de água - para o desenvolvimento de um novo material de construção, visto que na área da construção civil sua vida útil deve geralmente ser alta. Ademais, sua utilização especificamente como BTC, exige que o material que deva ser durável a exposições externas típicas, como efeitos de chuva e sol, e até mesmo outras intempéries.

Apesar da complexidade dos mecanismos de degradação, a simulação de exposições externas pode ser feita através de um envelhecimento acelerado por ensaios de durabilidade por molhagem e secagem. Para tanto, existe uma diretriz brasileira específica para espécimes de solo-cimento - NBR 13554 (ABNT, 2012) -, além da norma internacional D559-03 (ASTM, 2015), usualmente utilizada para solos estabilizados a partir de agentes cimentantes, que avaliam a durabilidade em relação à perda de massa do material por ciclos de molhagem e secagem.

Apesar das normas serem semelhantes, optou-se por utilizar os procedimentos recomendados pela D559-03 (ASTM, 2015), por conta da sua universalidade e maior uso, propendendo comparações futuras com outros materiais. Os CPs para a realização deste ensaio foram moldados de acordo com o item 3.3.2 e curados por 7 dias.

Ao final do tempo de cura, os CPs foram submetidos aos 12 ciclos de 48 h de molhagem e secagem previstos na norma. Sequenciados da seguinte maneira: (i) 5 h de imersão em água à temperatura ambiente ( $\pm 23^{\circ}\text{C}$ ); (ii) 42 h de secagem em estufa com temperatura controlada de  $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ; (iii) 1 h de intervalo para pesagens e escovação.

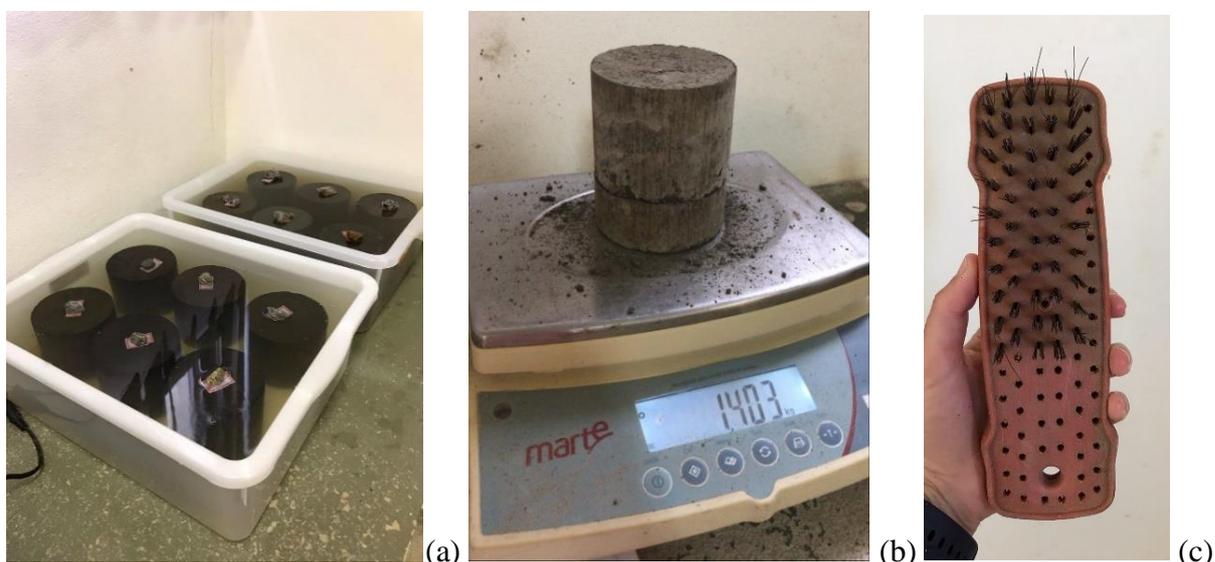


Figura 3.27 – Ensaio de durabilidade: (a) imersão dos CPs, (b) pesagem pós escovação e (c) escova utilizada (AUTORAL, 2021).

Ainda, segundo a norma, a escovação deve ser feita respeitando as seguintes premissas: (i) as amostras devem ser escovadas por 18 a 20 vezes ao longo de sua lateral, cobrindo esta área por pelo menos 2x; (ii) devem ser feitas 4 escovações no topo e na base; (iii) a escova utilizada deve ter cerdas de aço de largura de 0,5 mm (SAE 1020 n° 26) e comprimento de 1,6 mm, reunidas em 50 grupos de 10 tiras cada, montadas em 5 filas longitudinais e 10 fileiras transversais; (iv) a escovação deve ser feita com a intensidade de 13,3 N e, sendo assim, o processo de escovação foi feito controlado sobre balança.

### 3.3.4 Produção dos BTCs

A priori, moldaram-se os BTCs a partir prensa manual modular para tijolos 12,5 cm x 25 cm, da marca Sahara (Figura 3.28 (a)), a partir da mistura ótima encontrada na etapa 3 do projeto experimental. Porém a prensa não conseguiu atingir o peso específico de moldagem ( $\gamma_d$ ) de 14 kN/m<sup>3</sup> (Figura 3.28 (b)). Uma segunda tentativa foi realizada, alterando este parâmetro para 11 kN/m<sup>3</sup>, mas neste caso o BTC se desmanchou logo ao ser desformado.

Como terceira tentativa, adotou-se a unidade de moldagem para BTCs estabelecida na literatura da construção com terra para este tipo de prensa, de 1,1 x  $w_{ót}$  (MINKE, 2015), e adotou-se um  $\gamma_d$  intermediário de 12,5 kN/m<sup>3</sup>, mas o material voltou a ser não moldável pelo equipamento.



Figura 3.28 – Produção de BTC por prensa manual (AUTORAL, 2021).

Diante disso, a solução encontrada foi a confecção de uma fôrma de ferro, com dimensões de 12,5 x 25 cm, e altura de 10 cm, para compactação do material na mesma prensa hidráulica utilizada para os CPs cilíndricos. Sendo tanto a base, quanto o topo, removíveis, facilitando a fôrma e desforma (Figura 3.29). Esta opção permitiu a utilização das mesmas dosagens ótimas

encontradas na etapa 3, além do mesmo método de compactação do CP, de maneira estática e em 3 camadas.



Figura 3.29 – Fôrma para produção de BTC (AUTORAL, 2021).

A produção dos BTCs foi realizada de maneira similar aos CPs cilíndricos (item 3.3.1), desde a quantificação dos materiais, até a etapa de mistura. Neste ponto, por se trabalhar com uma quantidade maior de material, a mistura foi realizada com broca misturadora para argamassa acoplada em uma furadeira (Figura 3.30 (a)). Como supracitado, a compactação se deu de maneira análoga ao item 3.3.1, mudando apenas o molde (Figura 3.30 (b) e (c)).



Figura 3.30 – (a) Mistura, (b) compactação, (c) fôrma e (d) cura dos BTCs (AUTORAL, 2021).

Após desformados, tanto a massa, quanto as dimensões (em 3 pontos distintos) de cada BTC foram aferidas. As médias das dimensões deviam respeitar as grandezas expostas na Figura 3.31, sendo tolerado segundo de acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2015)  $\pm 0,3$  cm para medição média e  $\pm 0,8$  cm de tolerância de medida individual.

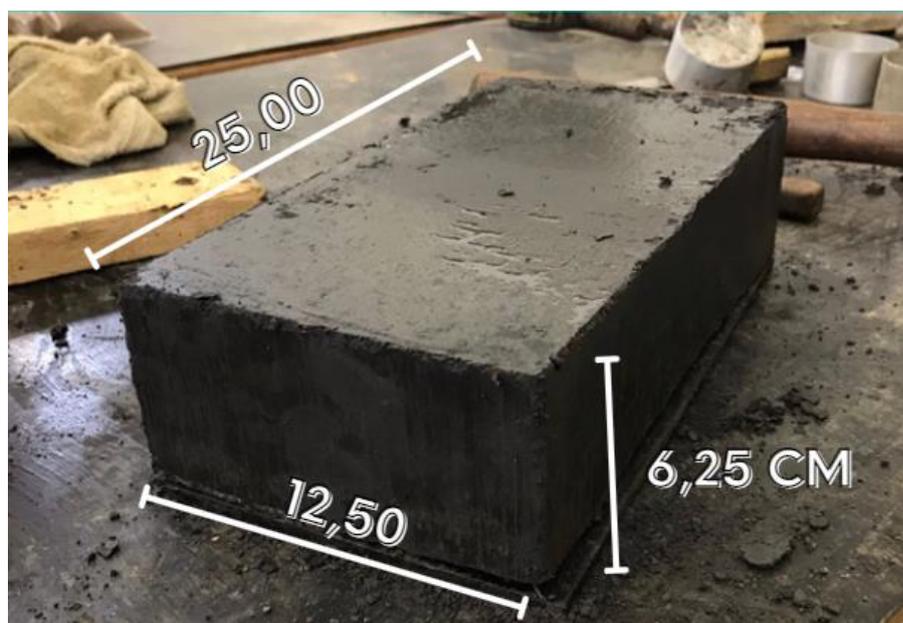


Figura 3.31 – Dimensões de um BTC após a desforma (AUTORAL, 2021).

Por fim, os BTCs foram curados à temperatura ambiente ( $\pm 23^{\circ}\text{C}$ ), na sombra (Figura 3.30 (d)), por 3 tempos de cura distintos: 7, 28 e 60 dias. Optou-se por não os lacrar em sacos plásticos, isto é, utilizar cura seca, mesmo que este fato possibilite troca de umidade e reações com o ambiente, podendo alterar o comportamento da mistura em relação ao CP cilíndrico, em detrimento de tornar o processo industrializável.

### 3.3.5 Resistência à Compressão Simples de BTCs

O ensaio de resistência à compressão dos BTCs foi realizado em prensa hidráulica da marca Solotest, de capacidade de 100.000 kgf e resolução de 10 kgf. Esta máquina aplica carga numa velocidade de 50 kgf/s.

A NBR 8492 (ABNT, 2012) prescreve que sejam ensaiados 7 tijolos por lote, entretanto, por falta de material, rompeu-se 2 tijolos para cada idade de cura. Alguns dias antes do rompimento, as amostras foram capeadas com pasta de cimento (Figura 3.32 (a)), com espessura máxima de 3 mm e de resistência superior à estimada para o BTC – comprovada através da moldagem de CPs de argamassa.



Figura 3.32 – (a) capeamento e (b) rompimento dos BTCs (AUTORAL, 2021).

Um dia antes do ensaio, os BTCs eram imersos em tanques de água por 24 h, sendo retirados e enxugados superficialmente em até 3 min antes do rompimento. Logo, como recomenda a NBR 10836/2013, o BTC era colocado sobre o prato inferior da máquina e outro era posto em cima, garantindo a aplicação uniforme de carga (Figura 3.32 (b)).

Os valores individuais de resistência à compressão simples ( $q_u$ ), foram obtidos dividindo-se a carga máxima observada durante o ensaio ( $Q$ ), pela área da face de trabalho ( $S$ ) (Equação 3.2).

$$q_u = \frac{Q}{S} \quad (3.2)$$

### 3.3.6 Absorção de água de BTCs

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a NBR 8492 (ABNT, 2012), exceto quanto ao número de amostras, de maneira análoga ao item anterior (3.3.5), já que a norma prescreve que sejam ensaiados três tijolos por lote, mas por falta de material, utilizou-se apenas um.

Para cada idade de cura, 7, 28 ou 60 dias, as amostras foram secas em estufa, entre 105 °C e 110 °C por 24 h - período de tempo em que atingiam constância de massa. Então, aferia-se a massa do corpo de prova seco ( $m_1$ ).

Logo em seguida, quando atingiam a temperatura ambiente, os tijolos eram imersos em tanque de água por mais 24 h. Depois de retirados da água, eram enxugados superficialmente e pesados, antes de decorridos 3 min, obtendo a massa do corpo de prova saturado ( $m_2$ ).

Os valores individuais de absorção de água (AA), expressos em porcentagem, foram obtidos através da Equação 3.3:

$$AA = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.3.7 Caracterização química por Espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)

A técnica de FRX consiste num método analítico utilizado para determinação da composição química de uma amostra. Essa técnica, resumidamente, é baseada no fato de que uma amostra após ser excitada por um feixe de raios X, pode ejetar um elétron das camadas mais internas do átomo, deixando um buraco, que é preenchido por outro elétron de uma camada mais externa. Quando um elétron sofre transição, ele libera raios X fluorescentes, os quais são emitidos a longitudes de onda que são características de cada elemento. A análise desta radiação permite identificar o elemento que lhe dá origem. Já a intensidade da radiação, indica a proporção destes elementos (LOTERO CAICEDO, 2020; KHOURY ASFORA, 2010).

A análise elementar do material dragado foi realizada no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do RS (UPF). Para tanto, confeccionou-se pastilhas com auxílio da Prensa Manual Fluxana a 25 ton, do material em pó misturado com o aditivo ácido bórico, nas proporções de 7g de pó e 2g de aditivo.

Após esta etapa, as pastilhas foram dispostas em um porta amostra padronizado, sendo utilizado para as análises o método *Equa\_Oxides* na programação do equipamento de Fluorescência de raios-X. Para obtenção da análise química semi-quantitativa, o espectro gerado a partir da amostra foi avaliado pelo software *Spectra EDX* sem curva de calibração específica.

Já a análise quantitativa dos elementos traço foi realizada no Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica da UFRGS, sendo o preparo da amostra realizado através da técnica em amostra fundida, e a curva de calibração utilizada configurada a partir de padrões de rocha tabelados da *Geostandards*. O espectrômetro de fluorescência de raios-X em funcionamento no laboratório era um WDS e estava equipado com tubo de raios-X de Rh, o seu modelo é RIX 2000 da marca Rigaku.

### 3.3.8 Caracterização mineralógica

As análises microestruturais por DRX e MEV foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL), na FURG. Para tanto, todas as amostras passaram anteriormente por processo de secagem a 60°C durante 48h, e destorroamento através de mão de gral e almofariz.

#### 3.3.8.1 Difração de Raios X (DRX)

A análise por DRX do CEME-SUL viabiliza a arguição microestrutural das amostras, permitindo identificar as fases presentes do material com geometria Bragg-Brentano e detector LYNXEYE. A técnica fornece a posição dos picos, intensidade e forma que são características de uma amostra específica.

A difração de raios X foi realizada em um difratômetro modelo D8 Advance, do fabricante Bruker, utilizando um tubo de ânodo fixo de cobre (Cu) ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ), operando a uma voltagem de 40 kV e corrente 40 mA. Os difratogramas foram coletados entre  $2\theta = 5$  e  $70^\circ$ , com um passo de  $0,02^\circ$  e um tempo de integração de 2 segundos por passo.

Foi utilizado o método do pó para análise dos materiais, por ser amplamente empregado neste âmbito. Os resultados foram analisados pelo *software X'Pert HighScore Plus* e plotados no *Origin*. O banco de dados utilizado foi o *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*.

### 3.3.8.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através da técnica de MEV é possível visualizar tridimensionalmente a morfologia da superfície das amostras, sua homogeneidade e o tamanho das partículas. O equipamento utilizado foi o JEOL JSM 6610 LV (Figura 3.33 (c)), este equipamento pode operar com tensões que podem variar de 0 a 30 kV, com ampliações entre 30 a 300.000 X.

As imagens são obtidas pelo equipamento através da detecção de elétrons secundários. Para tanto, as amostras foram previamente secas a vácuo em aparelho de secagem a ponto crítico modelo Autosamdri-815, e recobertas em ouro sobre uma fita adesiva de carbono. A metalizadora utilizada foi da Dentun Vacuum (Desk V), onde as amostras ficaram expostas por 240 segundos a uma corrente de 50 mA (Figura 3.33 (a) e (b)).

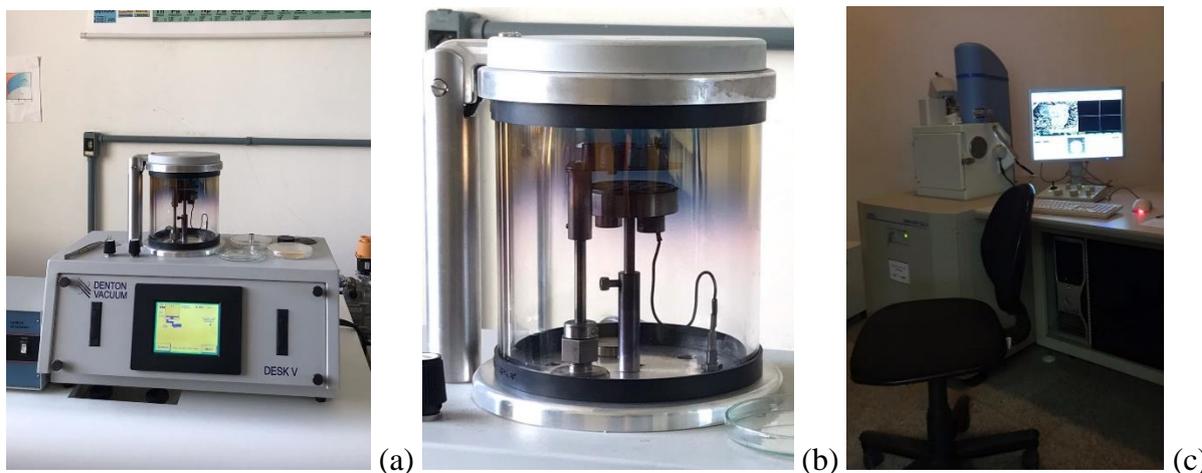


Figura 3.33 – Ensaio de MEV (AUTORAL, 2021).

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos conforme o planejamento experimental proposto na Tabela 3.8, correspondendo a terceira e a quarta etapa. Portanto, primeiramente faz-se a avaliação qualitativa das variáveis controláveis conforme as respostas mecânicas de resistência à compressão simples e de durabilidade, além da determinação da dosagem que leva aos melhores resultados dentro da região experimental (itens 4.1 e 4.2).

A partir disso, e de um conjunto com as normativas vigentes sobre blocos de terra comprimida (BTCs), no item 4.3 determinou-se a dosagem pela qual os BTCs serão moldados. Essa dosagem ainda é estudada no item 4.4 em relação à evolução de sua resistência ao longo do tempo, e acerca da formação de produtos de reação característicos de materiais álcali ativados por ensaios de microestrutura.

Por fim, os BTCs são qualificados de acordo com a NBR 10834/2013 no que concerne a resistência à compressão simples (item 4.5) e absorção de água (item 4.6), em 3 idades distintas. Observa-se também, que como critério de aceitação para todos os ensaios do capítulo, foi estipulado que os resultados individuais de cada amostra não deveriam desviar em mais de 10% da média.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

A análise da resistência à compressão simples (RCS) foi realizada, a priori, utilizando uma abordagem de projeto fatorial  $2^3$  com ponto central. A posteriori, verificada a curvatura dos fatores principais, pontos axiais foram adicionados, configurando um projeto composto de segunda ordem (PCSO).

#### 4.1.1 Projeto fatorial $2^k$ com pontos centrais

Para este projeto fatorial completo, com os 3 fatores já definidos na Tabela 3.9, foram utilizados os 8 pontos fatoriais (correspondentes aos vértices do cubo) e 2 pontos centrais, com 3 repetições independentes ( $nc=3$ ), totalizando 10 tratamentos. A Tabela 4.1 resume os valores das variáveis controláveis adotadas para cada um deles.

Tabela 4.1 – Níveis das variáveis controláveis para cada tratamento do projeto fatorial  $2^3$  com ponto central (AUTORAL, 2021).

Tratamento	variável controlável			
	CC/PR (%)	SA		PR/solo (%)
		(mol)	(%)	
<b>1</b>	20	6	57	30
<b>2</b>	20	6	13	10
<b>3</b>	20	2	4	10
<b>4</b>	20	2	19	30
<b>5</b>	40	2	4	10
<b>6</b>	40	6	57	30
<b>7</b>	40	6	13	10
<b>8</b>	40	2	19	30
<b>9</b>	30	4	18	20
<b>10</b>	30	4	18	20

A Figura 4.1 apresenta os resultados encontrados para resistência a compressão simples de cada tratamento, aos 7 dias de cura. A resistência máxima atingida pelas misturas foi de 0,87 MPa, a partir do tratamento 9, qual corresponde ao ponto central do projeto experimental.

Ainda, através dos resultados obtidos, foi realizada uma análise estatística pelo *software* Minitab 17, afim de se examinar os efeitos principais de cada fator (de primeira ordem) e suas interações (de segunda e terceira ordem). Essas análises estão resumidas no gráfico de Pareto (Figura 4.2) em conjunto com a tabela ANOVA (Tabela 4.2).

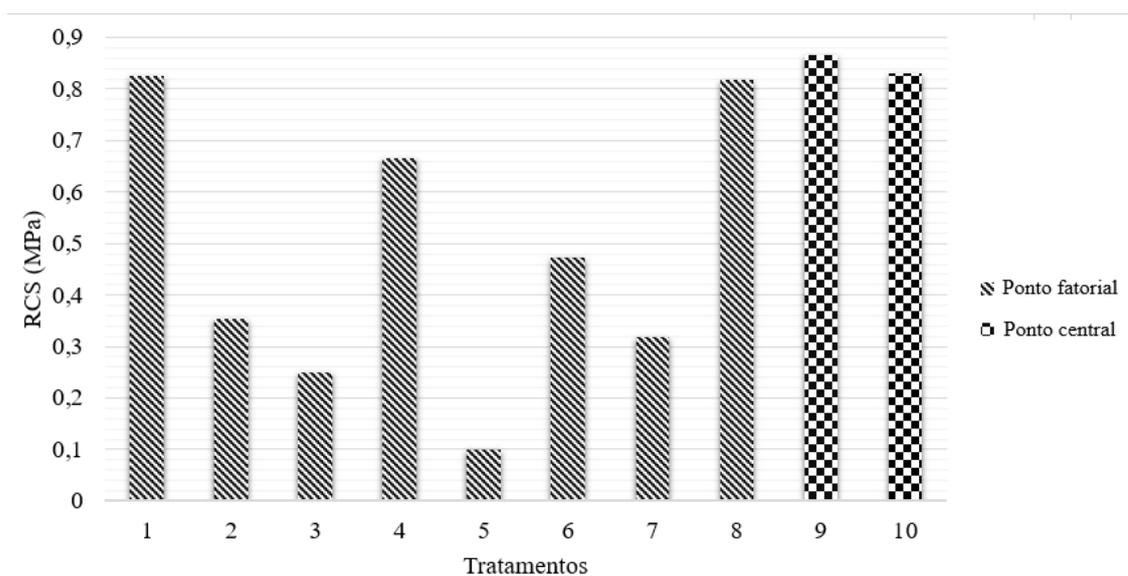


Figura 4.1 – Média da resistência à compressão simples para os tratamentos do projeto fatorial  $2^3$  com ponto central (AUTORAL, 2021).

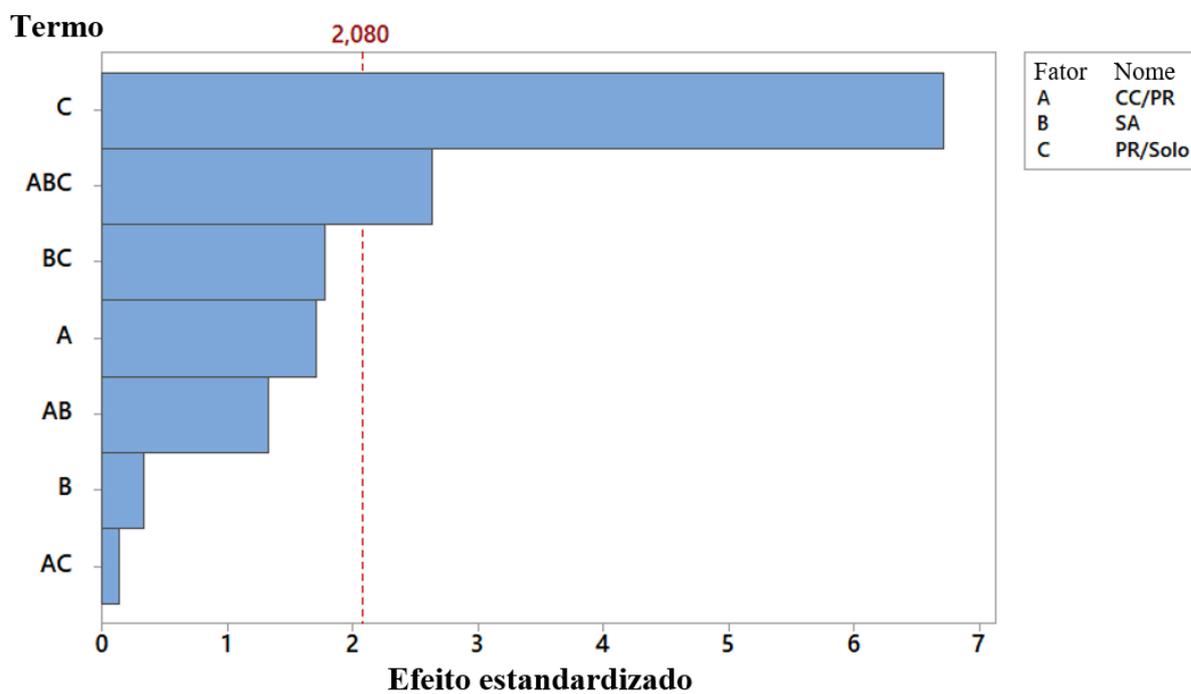


Figura 4.2 - Gráfico de Pareto do projeto fatorial  $2^3$  com pontos centrais para RCS (AUTORAL, 2021).

O gráfico de Pareto de efeitos estandardizados revela quais fatores principais e interações são estatisticamente significantes para o nível de significância adotado de 5% ( $\alpha = 5\%$ ), representado pela reta vermelha - qual tem o valor de T-tabelado. Para tanto, a barra correspondente ao fator ou interação deve cruzar a reta.

Já em relação a análise de variância ANOVA (Tabela 4.2), é interessante observar que todos os valores-P menores de 0,05 (nível de significância  $\alpha = 5\%$ ) são estatisticamente significantes. Quando o valor-P respeita esta condição, significa que o valor-F também respeita à condição de ser maior que F-tabelado. Em suma, quanto maior o valor-F ou menor o valor-P, maior o nível de significância do fator e/ou interação.

Tabela 4.2 - Tabela ANOVA do projeto fatorial  $2^3$  para RCS (AUTORAL, 2021).

Fonte	Graus de liberdade (DF)	Somas ajustadas dos quadrados (Adj SS)	Quadrados médios ajustados (Adj MS)	Valor-F	Valor-P
<b>A: relação CC/PR</b>	1	0,07164	0,07164	2,94	0,101
<b>B: concentração da SA</b>	1	0,00265	0,00265	0,11	0,745
<b>C: relação PR/solo</b>	1	1,09643	1,09643	45,05	0,00
<b>AB</b>	1	0,04311	0,04311	1,77	0,197
<b>AC</b>	1	0,00047	0,00047	0,02	0,891
<b>BC</b>	1	0,07713	0,07713	3,17	0,09
<b>ABC</b>	1	0,16957	0,16957	6,97	0,015
<b>Curvatura</b>	1	0,64094	0,64094	26,34	0,00
<b>Erro</b>	21	0,51105	0,02434		
<b>Total</b>	29	2,61297			
S (desvio padrão) = 0,156 MPa					
$R^2 = 60,16\%$					
$R^2$ aj (ajustado para graus de liberdade) = 72,99%					

Explica-se ainda que, dentro da análise de variância ANOVA, é gerada uma equação que relaciona todos os fatores e suas interações com a variável de resposta a partir dos dados (para valores reais), chamada de modelo de regressão. Para esta, segundo a Tabela 4.2, obteve-se uma capacidade de previsão do modelo  $R^2$  de 60,16% e um  $R^2$  ajustado de 72,99%, ou seja, quase 73% de variabilidade dos dados consegue ser explicada pelo modelo gerado. Cabe ressaltar que

ainda há a possibilidade de retirar termos não significativos do modelo, melhorando o  $R^2$  ajustado.

Superado isso, observa-se através da Figura 4.2, que para a variável de resposta de resistência à compressão simples, o fator principal relação PR/solo (C), bem como a interação de todos os fatores (ABC, de terceira ordem) influenciam significativamente no desempenho das misturas, sendo maiores que o T-tabelado de 2,080. O Fator relação PR/solo (C) se mostrou o fator de magnitude mais significativa, relevância já esperada para cimentos álcali ativados, visto a relação direta entre as reações pozolânicas desenvolvidas e o teor de agente cimentante, levando ao incremento da RCS, semelhante ao que ocorre com agentes cimentantes convencionais (CONSOLI et al., 2007; 2018; LOTERO CAICEDO, 2020; BRUSCHI, 2020; MARTINATTO, 2021).

A significância da interação de todos os fatores (ABC), isto é, dosagem do precursor (A), formado pela mistura de uma pozolana reativa e uma cal com alto conteúdo de cálcio livre, alcalinidade do meio (B) a partir da dissolução de hidróxido de sódio e dosagem do material cimentante em relação ao solo a ser estabilizado (C), sustenta a epistemologia da álcali ativação. Isto é, quando se trata da formação de ligantes álcali ativados, deve-se considerar a indissociável relação entre a composição e quantidade do material precursor, em conjunto com a concentração da solução alcalina.

Neste sentido, o resultado confirma aquilo que Palomo et al. (1999) já haviam apontado: que as duas principais características de um sistema álcali ativado são a composição dos precursores e a concentração do ativador.

Além disso, observa-se na Tabela 4.2 que o valor-P correspondente a curvatura do modelo é menor que 0,05, ou seja, significativa, apontando a não linearidade entre as variáveis de resposta e os fatores controláveis. Adicionalmente, pode-se observar a partir do diagrama de efeitos principais (Figura 4.3), que os valores de RCS para o ponto central do modelo se encontram longe da tendência linear para os pontos fatoriais, indicando que existe um valor entre os níveis mínimos e máximos que tende a otimizar a resposta mecânica.

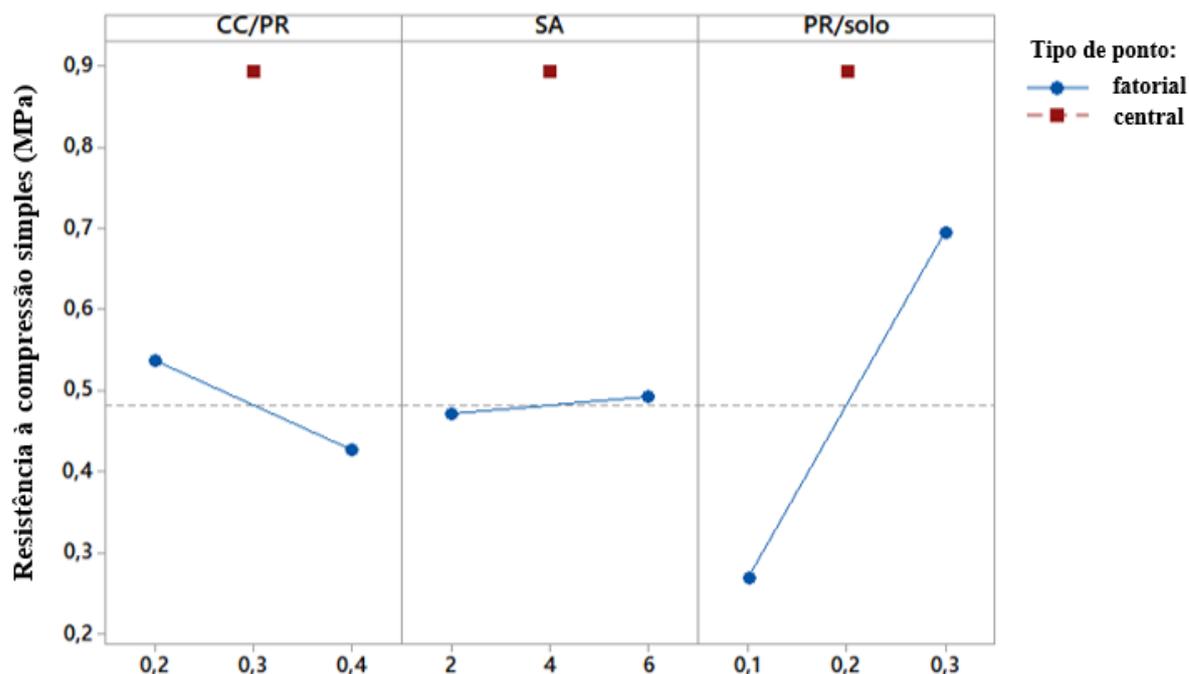


Figura 4.3 - Gráfico de efeitos principais para RCS do projeto fatorial  $2^3$  (AUTORAL, 2021).

#### 4.1.2 Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO)

Comprovada a curvatura dos fatores no item 4.1.1, adotou-se uma análise complementar de experimentos a partir de modelagem de superfícies de respostas n-dimensionais, conhecida como Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Para tanto, foram adicionados ao experimento os 6 pontos axiais do cubo, vide item 3.2.2.

A adição dos pontos axiais define quais termos quadráticos são estatisticamente significativos e faz o ajuste quadrático do modelo. Este tipo de experimento é conhecido como projeto composto de segunda ordem (PSCO). Desta feita, conforme resumido na Tabela 4.3, foram realizados ao todo 16 tratamentos distintos, em 3 repetições, totalizando 48 corpos de prova.

O resultado de cada tratamento é exposto na última coluna da Tabela 4.3, em relação à média dos valores unitários obtidos no ensaio de resistência à compressão simples, para cada corpo de prova. A Figura 4.4 apresenta os mesmos valores em forma de gráfico de barras.

Tabela 4.3 – PCSO para Resistência à Compressão Simples (AUTORAL, 2021).

Tratamento	Variável controlável				Níveis			Ponto	Var. de saída RCS (MPa)
	SA		PR/solo (%)	CC/PR (%)	SA	PR/solo			
	CC/PR (%)	(mol) (%)							
1	20	6	57	30	-1	+1	+1	fatorial	0,83
2	20	6	13	10	-1	+1	-1	fatorial	0,35
3	20	2	4	10	-1	-1	-1	fatorial	0,25
4	20	2	19	30	-1	-1	+1	fatorial	0,67
5	40	2	4	10	+1	-1	-1	fatorial	0,10
6	40	6	57	30	+1	+1	+1	fatorial	0,47
7	40	6	13	10	+1	+1	-1	fatorial	0,32
8	40	2	19	30	+1	-1	+1	fatorial	0,82
9	30	4	18	20	0	0	0	central	0,87
10	30	4	18	20	0	0	0	central	0,83
11	30	2	9	20	0	-1	0	axial	0,41
12	20	4	18	20	-1	0	0	axial	1,07
13	30	6	27	20	0	+1	0	axial	0,91
14	40	4	18	20	+1	0	0	axial	1,06
15	30	4	38	30	0	0	+1	axial	1,75
16	30	4	8	10	0	0	-1	axial	0,92

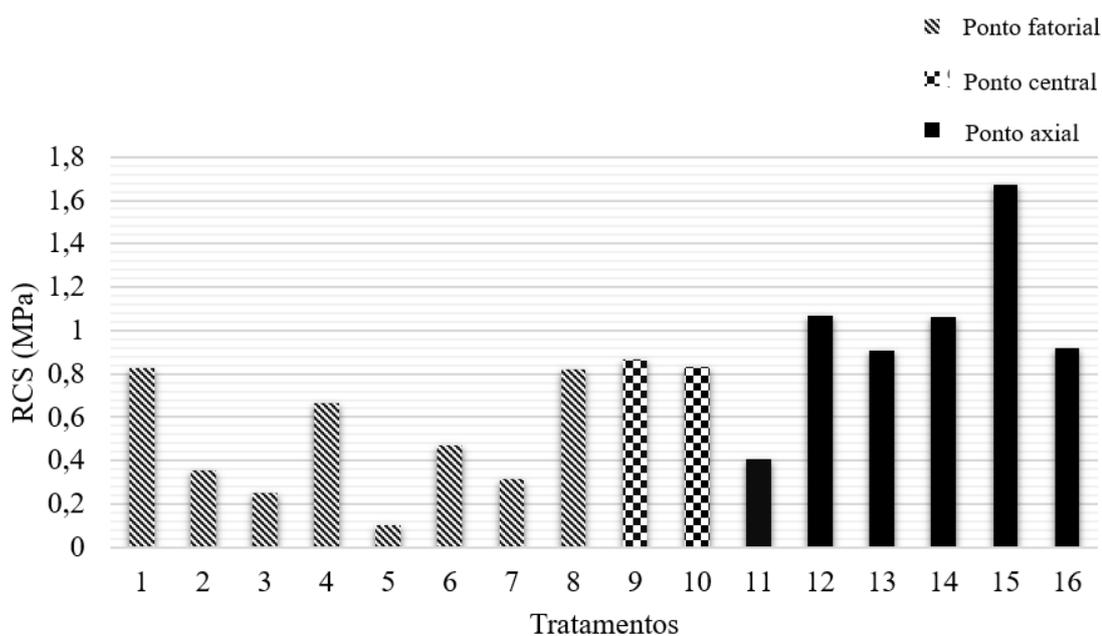


Figura 4.4 – Resistência à compressão simples dos tratamentos do PCSO (AUTORAL, 2021).

A resistência à compressão máxima atingida foi da ordem de 1,75 MPa, a partir da dosagem do tratamento 15, ou seja, uma mistura com 30% de precursor sólido, sendo 30% deste precursor formado por cal de carbureto e concentração de solução de NaOH de 4 mol.

Como já comentado, Servi (2021) em seu estudo de pastas com os mesmos precursores, já havia encontrado a RCS máxima através de dosagem semelhante, sendo CC/PR = 20%, 4 mol de solução de NaOH e 1,2 de módulo de sílica, para o mesmo tempo e temperatura de cura. Já Lotero Caicedo (2020), em seu estudo de pastas com alto teor de cálcio e resíduos cerâmicos vermelhos, encontrou CC/PR = 30% e 3 mol de solução de NaOH.

Em relação a magnitude da variável de resposta, foi muito próxima a obtida por Scheuermann Filho (2019), qual alcançou uma RCS entre 1,5 e 2 MPa na estabilização de um solo dispersivo (areia argilosa) com adição de 22% de precursores. Se comparado a outros solos provenientes de dragagem, Cheng et al. (2021), ao estudarem a estabilização destes através de cimento Portland, encontraram como resistência máxima 0,6 MPa para 13% de teor de cimento, em misturas curadas por 28 dias.

#### 4.1.2.1 Análise de Variância (ANOVA)

A partir da análise de variância apresentada na Tabela 4.4, verifica-se a significância dos efeitos quadráticos puros em cada um dos fatores controláveis, além dos efeitos principais e suas interações, de maneira análoga ao item 4.1.1 (valor-P < 0,05).

Com base nos valores obtidos para o valor-P no PCSO, é possível concluir a significância do efeito principal PR/solo (C) e do efeito quadrático puro do fator concentração da solução ativadora (B). Esse comportamento pode ser melhor compreendido através do gráfico de efeitos principais para o projeto composto de segunda ordem, apresentados na Figura 4.5.

Tabela 4.4 – Tabela ANOVA para RCS do PCSO (AUTORAL, 2021).

Fonte	Graus de liberdade (DF)	Somas ajustadas dos quadrados (Adj SS)	Quadrados médios ajustados (Adj MS)	Valor-F	Valor-P	Signif.
<b>A: relação CC/PR</b>	1	0,04728	0,04728	0,89	0,352	Não
<b>B: concentração da SA</b>	1	0,12145	0,12145	2,28	0,139	Não
<b>C: relação PR/solo</b>	1	2,08985	2,08985	37,62	0,000	Sim
<b>AA</b>	1	0,19954	0,19954	3,22	0,051	Não
<b>BB</b>	1	2,5219	2,5219	45,50	0,000	Sim
<b>CC</b>	1	0,13781	0,13781	1,99	0,167	Sim
<b>AB</b>	1	0,0582	0,0582	1,09	0,302	Não
<b>AC</b>	1	0,00008	0,00008	0,00	0,969	Não
<b>BC</b>	1	0,09622	0,09622	1,81	0,187	Não
<b>Erro</b>	38	2,10029	0,05527			
<b>Falta de ajuste</b>	5	1,32717	0,26543	11,33	0,000	Sim
<b>Erro puro</b>	33	0,77311	0,02343			
<b>Total</b>	47	8,52273				

S (desvio padrão) = 0,235 MPa  
 $R^2 = 75,36\%$   
 $R^2$  aj (ajustado para graus de liberdade) = 69,52%

Observa-se que a quantidade de precursor (fator C) é o fator de maior influência para a maximização da resistência à compressão simples, em que pese não possua um comportamento quadrático dentro do intervalo estudado. Sendo assim, o modelo de regressão quadrática por PCSO utilizado, a princípio, não consegue otimizar a resposta (encontrar o ponto ótimo do sistema), sendo necessária a definição de outros níveis de estudo para essa variável (fator C) até encontrar uma região de influência quadrática.

Ademais, o modelo apresentou significância da falta de ajuste dos dados (12° linha da Tabela 4.4), e um  $R^2$  aj da regressão de 69,52 %, o que sentença a invalidade de sua capacidade de previsão, uma vez que este valor está abaixo dos mínimos 70 % sugeridos para fins de predição (PULIDO et al., 2012). Apesar disso, ressalta-se que o modelo de regressão obtido ainda que não possa ser empregado em análises quantitativas, pode ser utilizado para análises qualitativas das variáveis e, mais tarde, também pode ser melhorado.

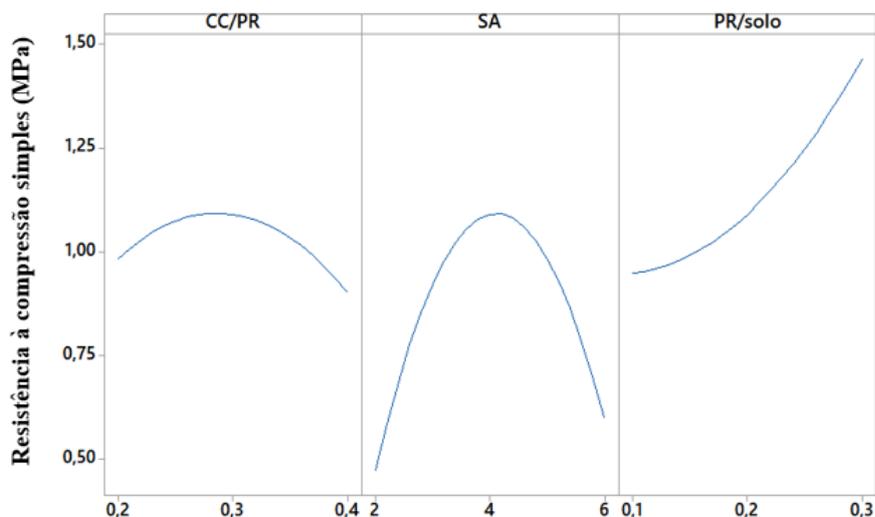


Figura 4.5 – Gráfico de efeitos principais para RCS do PCSO (AUTORAL, 2021).

O segundo fator mais importante no comportamento de resistência do material, de acordo com a análise ANOVA, é a concentração da solução ativadora (fator B), apresentando significância puramente quadrática. Isto é, como demonstra a Figura 4.5, o conjunto de dados requer um termo quadrático para modelar a curva de efeito deste fator.

A influência significativa da solução ativadora para a RCS, principalmente em idades iniciais (7 dias), pode ser explicada pelo fato de que é ela quem faz com que haja a dissolução do material precursor de forma suficiente, no começo das reações (Loterio Caicedo, 2020). Em contrapartida, altas concentrações dessa solução podem provocar o efeito contrário.

Outros estudos como o de Robayo et al. (2016), Fernández Jiménez et al. (2006), Reig et al. (2013) e Mitsuuchi Tashima (2012) já haviam demonstrado que existe uma concentração ótima para as soluções alcalinas, em virtude de que o excesso de álcalis pode gerar problemas de carbonatação e eflorescências no conglomerante, produzindo uma diminuição da RCS. Ou seja, a significância quadrática do fator aqui encontrada, corrobora que a ativação alcalina contendo alto cálcio (de 20 a 40% do PR) não requer um meio com alta concentração alcalina, indo ao encontro do estado da arte de materiais álcali ativados (CAICEDO LOTERO, 2020; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 2003, 2006; PUERTAS et al., 2000).

A não significância do fator teor de cal (A) no precursor, para esse projeto experimental, indica que dentro do intervalo de níveis pré-estabelecidos, o efeito de sua variação não impacta significativamente a variável de saída. Esse resultado, pode ser observado na Figura 4.5, onde a RCS correspondente a seus níveis mínimo, máximo e central, não foge da média de  $1 \pm 0,25$  MPa.

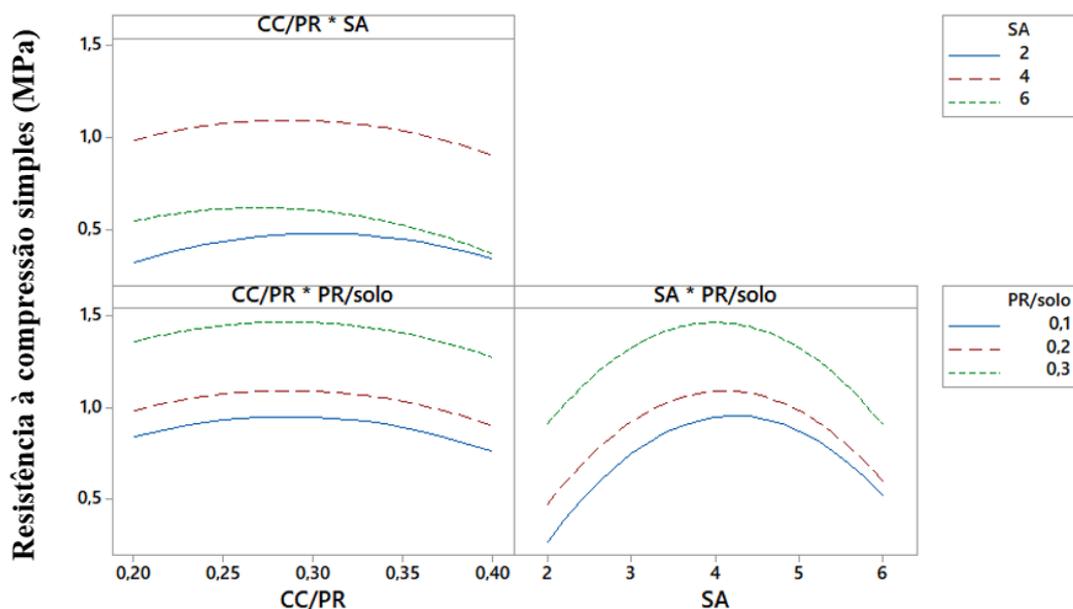


Figura 4.6 – Gráfico de interações para RCS do PCSO (AUTORAL, 2021).

Ademais, como o PCSO não considera efeitos de terceira ordem, não consegue detectar se existe efeito de interação entre os três fatores, como no projeto inicial fatorial  $2^k$ . A Figura 4.6 confirma o já exposto pela Tabela 4.4, de que dentro deste modelo não há nenhuma interação com significância estatística, e por isso, nenhum gráfico se cruza dentro dos limites do experimento.

#### 4.1.2.2 Equação de Regressão e Superfície de Resposta

A equação de regressão é um modelo que descreve a relação entre a variável de resposta e os fatores controláveis determinados no projeto de experimento. A partir dela, pode-se prever o resultado de RCS de diferentes misturas, mesmo não ensaiadas.

Para o PCSO essa equação é gerada em função dos efeitos significativos de primeira e de segunda ordem, bem como de suas interações, através da análise dos dados do experimento em algum *software* de estatística, como o Minitab 17. Além disso, o modelo permite a obtenção da modelagem da superfície de resposta e a otimização (no caso, a maximização) da variável de resposta resistência à compressão simples.

Como já comentado, o modelo de regressão apresentado pela análise ANOVA aponta a significância da falta de ajuste do modelo (valor-P = 0), e um  $R^2$  aj baixo, não sendo indicada sua utilização para fins de predição. Entretanto, há a possibilidade de se melhorar o modelo dentro do mesmo *software*, através da análise de regressão múltipla, qual ajusta a equação de regressão, podendo retirar fatores e interações não significativas, além de pontos residuais.

A Equação 4.1 apresenta o modelo de regressão múltipla ajustado pelo Minitab 17 para este experimento, onde A representa a relação CC/PR, B a concentração da solução ativadora e C a relação PR/solo.

$$RCS (MPa) = -2,569 + 6,27 A + 1,151 B + 2,378 C - 11,38 A^2 - 0,1391 B^2 \quad (4.1)$$

Percebe-se que a equação de regressão gerada pelo PCSO é uma equação polinomial de grau dois, ou seja, as variáveis podem ter coeficiente linear, constante ou quadrático. A significância do ajuste dos dados à equação é analisada a seguir

O melhoramento da equação de regressão é comprovado através das Figuras 4.7 e 4.8. A primeira imagem indica que o novo modelo apresenta uma relação entre as variáveis de entrada e de saída estatisticamente significantes, com valor-P menor que 0,001; já a segunda, demonstra que 81,80 % da variação de resposta podem ser explicadas pelo modelo.



Figura 4.7 – Significância da relação entre x e y do modelo de regressão para RCS (AUTORAL, 2021).

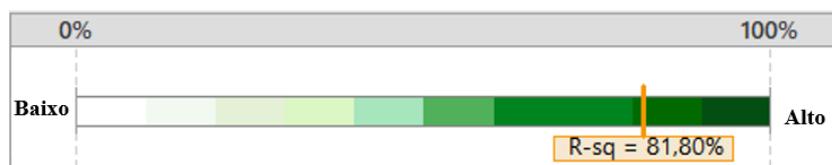


Figura 4.8 - % de variação explicada pelo modelo para RCS (AUTORAL, 2021).

O Minitab também disponibiliza um relatório de regressão múltipla onde examina vários fatores importantes para a obtenção de um modelo válido. O boletim obtido na presente análise dispõe que existe quantidade suficiente de dados para fornecer precisão ao modelo e que o tamanho amostral é suficiente para o fornecimento de resultados confiáveis (com base na distribuição normal). Entretanto, alerta que existem 2 pontos residuais que podem estar afetando o resultado da análise e que ainda poderiam ser ajustados.

Comprovado o bom ajuste dos dados, superfícies de respostas previstas pelo mesmo são geradas e expostas pela Figura 4.9, para as diferentes combinações dos fatores controláveis. Já a Figura 4.10 apresenta o gráfico de contorno das variáveis de entrada.

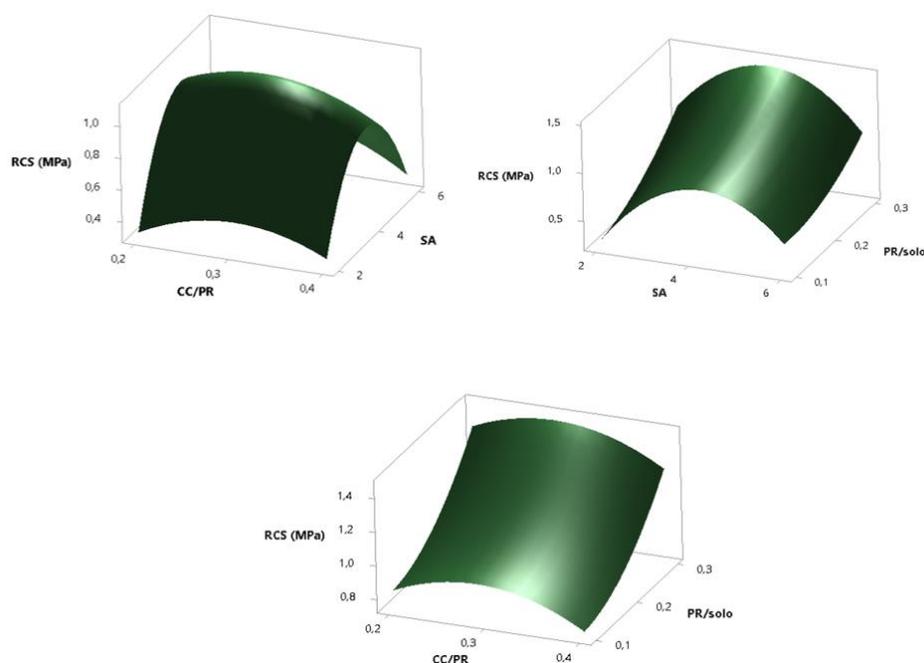


Figura 4.9 – Superfícies de resposta para RCS (AUTORAL, 2021).

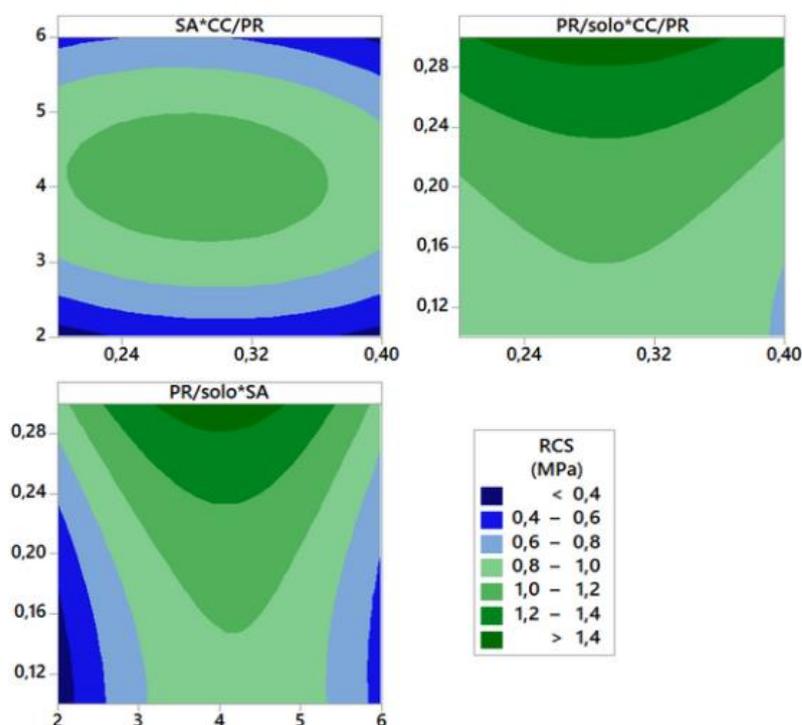


Figura 4.10 – Gráfico de contorno da variáveis para RCS (AUTORAL, 2021).

Pode-se inferir através dos gráficos que os melhores resultados para resistência à compressão simples encontram-se em áreas de dosagens de solução ativadora ao redor de 4 mol, a partir de 28% de precursor, composto com uma média de 30 % de cal de carbureto.

#### 4.1.2.3 Validação das suposições do modelo

Mesmo com valores de coeficiente de determinação e significância do ajuste do modelo obtidos no melhoramento do item anterior, que estabeleceram a boa qualidade global do modelo de regressão, ainda se faz necessária a validação das suposições estabelecidas pelo modelo.

O modelo de análise por regressão linear parte de 5 pressupostos: (i) A relação entre a variável dependente e independente deve ser linear; (ii) não deve haver correlação entre as variáveis independentes; (iii) os resíduos devem ter uma distribuição normal; (iv) Os resíduos devem ter variância constante (homocedasticidade); e (v) os resíduos não devem apresentar auto correlação, isto é, devem ser independentes.

O não cumprimento de algum desses pressupostos conduz a interpretações erradas, ou seja, a não validade do modelo estatístico. Para verificar se os pressupostos estão sendo atendidos, bem como se o modelo está bem ajustado aos dados, e com isso validar definitivamente o modelo, os gráficos de resíduos devem ser analisados (Figura 4.11 (a-d)).

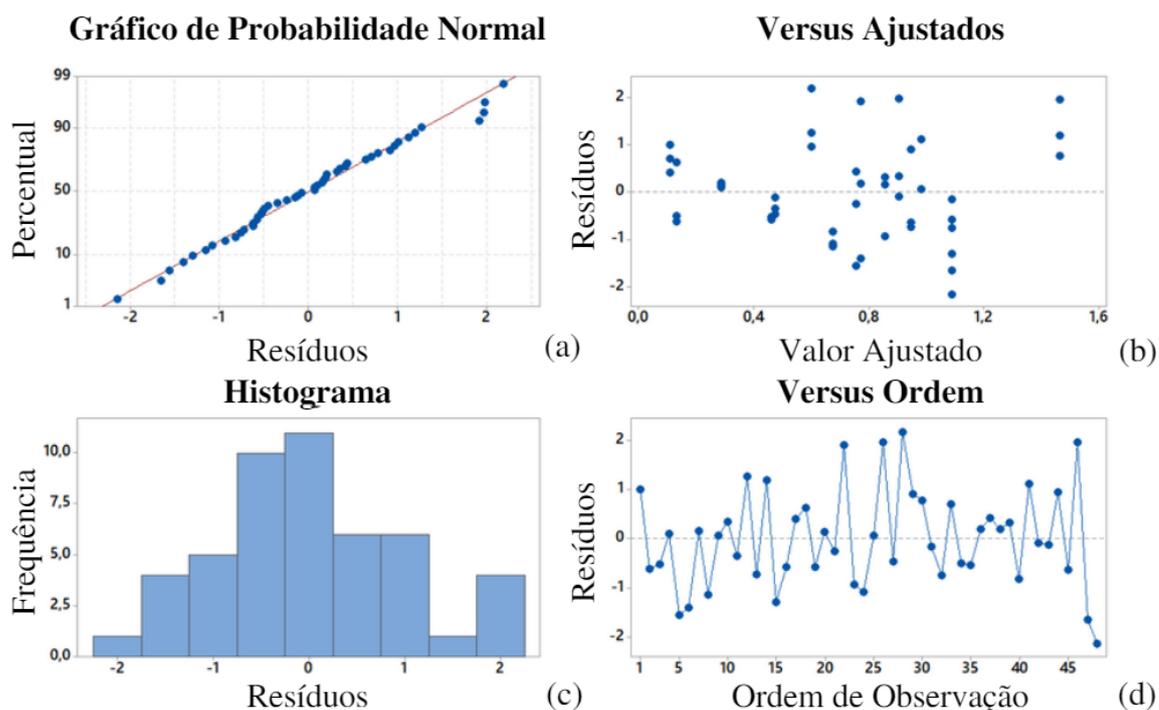


Figura 4.11 – Gráficos de resíduos do PCSO para RCS (AUTORAL, 2021).

Os pressupostos de normalidade (i, ii e iii) se cumprem de maneira satisfatória (Figura 4.11 (a)) visto que os pontos de resíduos seguem aproximadamente uma linha reta. No mesmo sentido, o histograma de frequência de resíduos (Figura 4.11 (c)) corrobora ao formar uma geometria símil à curva Gaussiana.

O pressuposto de homocedasticidade (iv) se verifica através do gráfico de resíduos versus valor ajustado (Figura 4.11 (b)), comprovando que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente e têm uma variância constante, isto é, não possuem um padrão de distribuição dos pontos, mas estão dispersos dentro da mesma banda horizontal. Já o pressuposto de independência (v) é comprovado pelo gráfico da Figura 4.11 (d), qual relaciona os resíduos versus a ordem em que

os ensaios foram realizados, indicando que não existe um padrão entre os pontos, e, portanto, estes são independentes.

#### 4.1.2.4 Determinação do Melhor Tratamento dentro da Região Experimental

A dosagem que proporciona a resistência máxima, prevista pelo modelo dentro da região experimental estudada (determinadas pelos níveis de cada fator), pode ser aferida através do *software* Minitab, utilizando o assistente de análise de regressão múltipla. O programa busca a combinação de variáveis que irá resultar no máximo valor da variável de saída da região experimental, a partir da regressão múltipla já ajustada.

A Figura 4.12 apresenta o relatório de previsão do modelo. O valor de RCS máximo predicado foi de 1,38 MPa, com um intervalo de previsão de 95 %, isto é, tem-se 95 % de confiança de que o valor obtido para RCS estará no intervalo entre 0,99 MPa e 1,76 MPa.

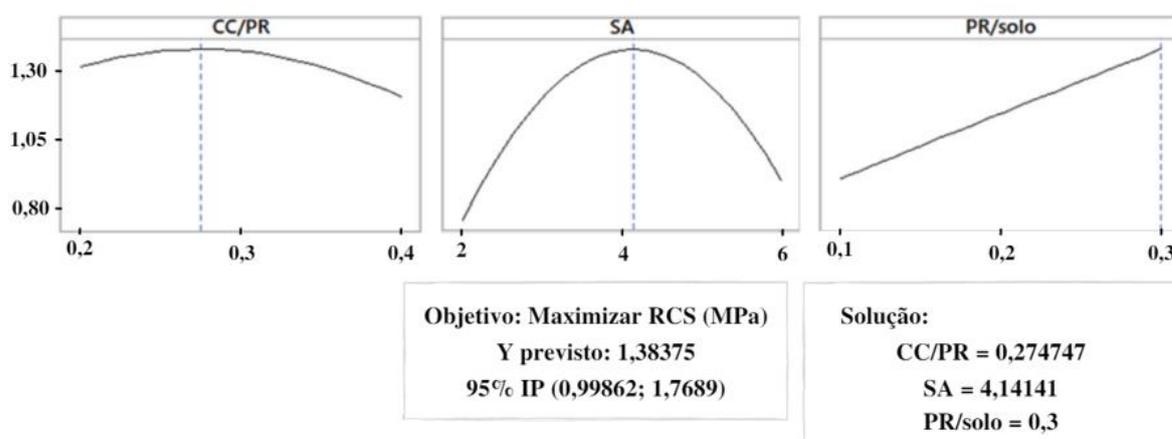


Figura 4.12 – Determinação do melhor tratamento dentro da região experimental para RCS (AUTORAL, 2021).

O valor máximo da resposta na região experimental, como indica a Figura 4.12, se dá pela mistura de 30% de precursor ao solo, sendo composto por 27,47% de cal de carbureto e utilizando uma solução ativadora de 4,14 mol de NaOH. A dosagem encontrada pelo modelo foi semelhante à melhor de moldagem, obtida pelo tratamento 15 (Figura 4.4), qual alcançou em uma resistência de 1,75 MPa, resultado maior que o previsto pelo modelo.

Este resultado pode ser relacionado ao fato de que nem todos os pontos experimentais estão sobre a curva de regressão gerada pelo programa, ao mesmo tempo em que o ponto máximo do modelo é obtido a partir da equação de regressão.

Cabe ressaltar que o fato da superfície da variável PR/solo não ter apresentado curvatura, comprova que o melhor tratamento dentro da região experimental não é o ponto ótimo da superfície de resposta, considerando toda a região de operacionalidade. Para achar tal valor, deve-se realizar uma estratégia de experimentos mais completa, o que inclui a possibilidade de realizar vários experimentos de forma sequencial e o uso de outras técnicas de análise.

Explica-se ainda que, para encontrar o ponto ótimo do sistema, pode-se utilizar este modelo para detectar a melhor direção de movimento, transferindo a região experimental (através de novos projetos) até que se detecte uma mudança de tendência (Figura 4.13). Neste caso, pode-se concluir que a direção ótima, e do planejamento de um segundo experimento, está no aumento dos níveis de material precursor, em que pese esse trabalho não o faça.

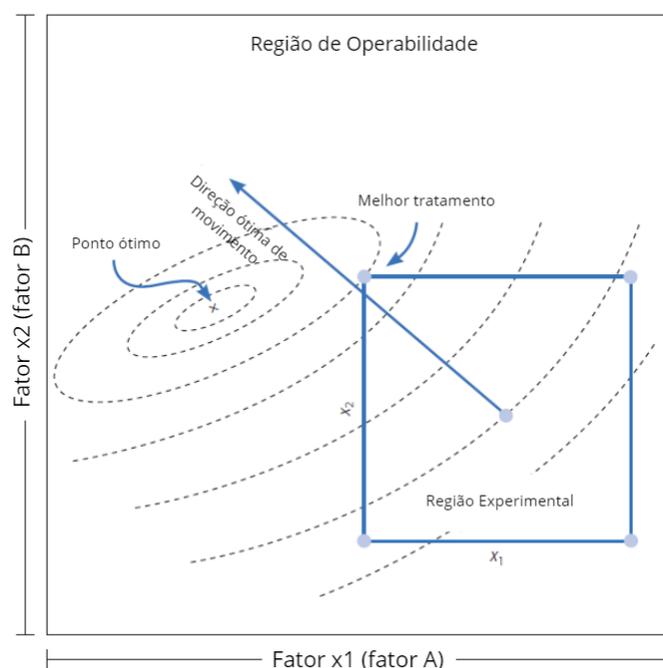


Figura 4.13 – Melhor tratamento, ponto ótimo, região experimental e de operabilidade (adaptado de PULIDO et al., 2012).

## 4.2 DURABILIDADE POR CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM

Para o ensaio de durabilidade também foi utilizado um PCSO, de acordo com as variáveis estabelecidas na Tabela 3.9, compreendendo 8 pontos fatoriais, 6 pontos axiais na face do cubo e 1 ponto central. Por se tratar de um procedimento que demanda elevadas quantidades de material, as amostras foram ensaiadas sem répeticões, totalizando 15 tratamentos.

Optou-se por numerar os tratamentos de acordo com o PCSO para RCS (Tabela 4.3), conquanto este não abranja o tratamento 10 (segundo ponto central). A Tabela 4.5 e a Figura 4.14 apresentam os resultados obtidos em termos de perda de massa acumulada por ciclo (PMA).

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de durabilidade referente a PMA por tratamento (AUTORAL, 2021).

Tratamento	Variável controlável			Níveis			Ponto	Var. de saída PMA (%)	
	CC/PR (%)	SA (mol) (%)	PR/solo (%)	CC/PR (%)	S	PR/solo			
<b>1</b>	20	6	57	30	-1	+1	+1	fatorial	0,70
<b>2</b>	20	6	13	10	-1	+1	-1	fatorial	1,60
<b>3</b>	20	2	4	10	-1	-1	-1	fatorial	100,00
<b>4</b>	20	2	19	30	-1	-1	+1	fatorial	6,00
<b>5</b>	40	2	4	10	+1	-1	-1	fatorial	100,00
<b>6</b>	40	6	57	30	+1	+1	+1	fatorial	0,41
<b>7</b>	40	6	13	10	+1	+1	-1	fatorial	3,71
<b>8</b>	40	2	19	30	+1	-1	+1	fatorial	4,04
<b>9</b>	30	4	18	20	0	0	0	central	2,80
<b>11</b>	30	2	9	20	0	-1	0	axial	11,86
<b>12</b>	20	4	18	20	-1	0	0	axial	2,33
<b>13</b>	30	6	27	20	0	+1	0	axial	1,98
<b>14</b>	40	4	18	20	+1	0	0	axial	3,48
<b>15</b>	30	4	38	30	0	0	+1	axial	1,49
<b>16</b>	30	4	8	10	0	0	-1	axial	14,13

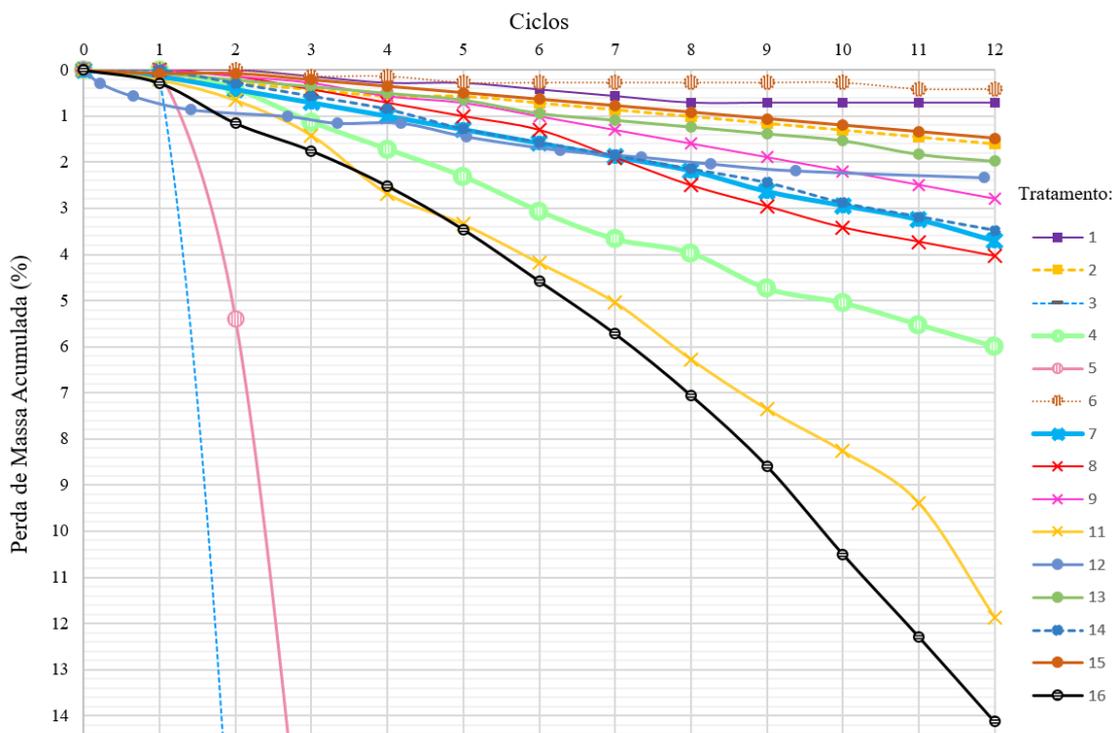


Figura 4.14 – Perda de Massa Acumulada (PMA) ao longo dos ciclos (AUTORAL, 2021).

O tratamento 3 acabou por mostrar desagregação do corpo de prova no meio do quarto ciclo, e o tratamento 5, de maneira similar, em meados do oitavo ciclo. Optou-se por limitar a PMA no gráfico da Figura 4.14, em 14,5 %, permitindo uma melhor visualização do comportamento dos demais tratamentos.

Tanto o tratamento 3, quanto o tratamento 5, são caracterizados por dosagens nos níveis baixos das variáveis de concentração da solução alcalina e de porcentagem de material precursor. Como evidenciado no projeto experimental para RCS, existe uma grande influência dos fatores SA e PR/solo nas misturas, que evidencia prejuízo à resposta mecânica das amostras quando em níveis baixos.

Reitera-se então a importância da solução alcalina, por ser responsável que ocorram as primeiras reações de matrizes cimentantes no âmbito da álcali ativação, e a quantidade de

agente cimentante (PR/solo), por ser diretamente proporcional a quantidade de produtos de reação gerados.

No que concerne as amostras que apresentaram menores perdas de massa, como também se pode observar na Figura 4.14, são referentes aos tratamentos 6 e 1, quais constituem-se do nível mais alto das variáveis SA e PR/solo, indo ao encontro do recém explanado.

#### 4.2.1 Análise de variância (ANOVA) do PCSO

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da análise de variância para PMA adotando um nível de significância igual ao utilizado para resistência à compressão simples,  $\alpha = 5\%$ . Segundo os resultados obtidos, as variáveis (B) concentração da solução ativadora e (C) relação PR/solo são estatisticamente significativas (valor-P < 0,05), bem como a interação entre elas.

Tabela 4.6 – ANOVA para PCSO de PMA (AUTORAL, 2021).

Fonte	Graus de liberdade (DF)	Somas ajustadas dos quadrados (Adj SS)	Quadrados médios ajustados (Adj MS)	Valor-F	Valor-P	Signif.
<b>A: relação CC/PR</b>	1	0,1	0,1	0,00	0,985	Não
<b>B: concentração da SA</b>	1	4558	4557,99	18,54	0,008	Sim
<b>C: relação PR/solo</b>	1	4276,8	4276,78	17,40	0,009	Sim
<b>AA</b>	1	118,3	118,28	0,48	0,519	Não
<b>BB</b>	1	299,9	299,86	1,22	0,320	Não
<b>CC</b>	1	351,1	351,06	1,43	0,286	Não
<b>AB</b>	1	1,8	1,79	0,01	0,935	Não
<b>AC</b>	1	2,4	2,38	0,01	0,926	Não
<b>BC</b>	1	4313,5	4313,52	17,55	0,009	Sim
<b>Erro</b>	5	1229,1	245,83			
<b>Total</b>	14	16121,9				
S (desvio padrão) = 15,68 %						
R <sup>2</sup> = 92,38 %						
R <sup>2</sup> aj (ajustado para graus de liberdade) = 78,65 %						

A falta de significância estatística do fator teor de cal de carbureto no precursor (A), assim como para variável de saída de RCS, simboliza que dentro dos níveis de teor de cal

estabelecidos no projeto, a variação do mesmo não produz um efeito significativo na formação e evolução do ligante álcali ativado.

Já a determinação do efeito de interação estatisticamente significativo entre os fatores B e C, simboliza que não é só o efeito da concentração da solução ativadora ou só o efeito do teor de precursor no solo, de forma isolada, que influenciam esta variável de resposta, mas também seu efeito conjunto. Esta conclusão ainda pode ser feita a partir do gráfico de efeito de interações entre os fatores (Figura 4.15), onde os efeitos de SA e PR/solo se cruzam.

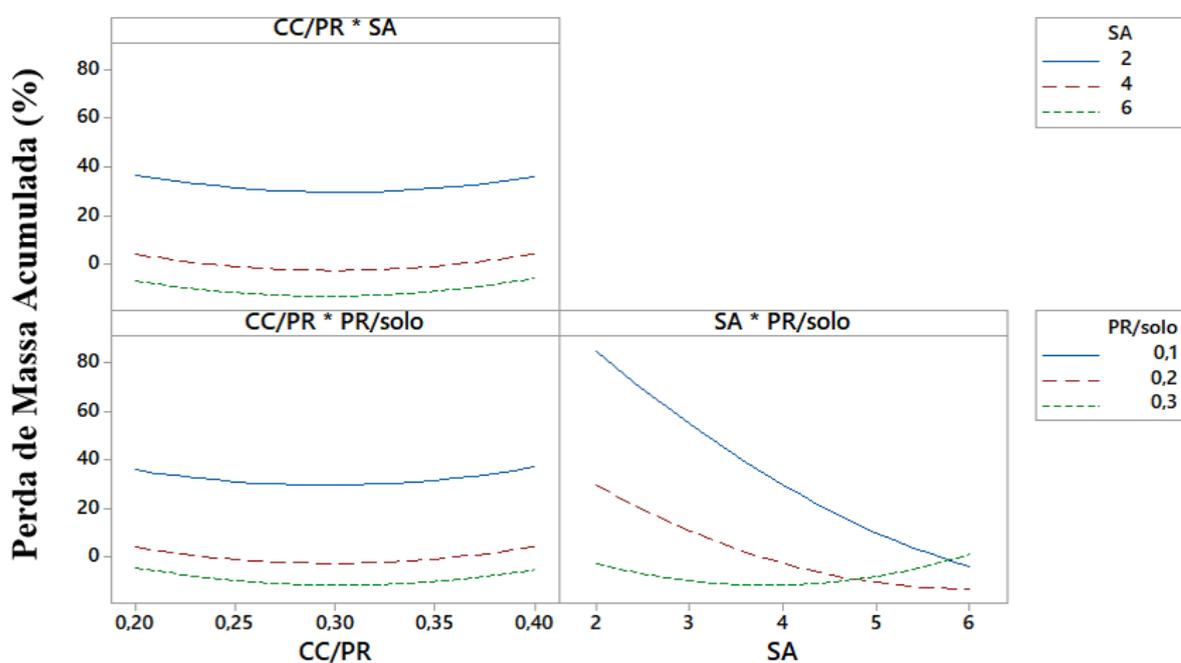


Figura 4.15 – Efeito de interação entre os fatores para durabilidade (AUTORAL, 2021).

Outra observação importante a partir análise ANOVA (Tabela 4.6) é a impossibilidade de avaliar a significância do ajuste dos dados ao modelo de regressão. Este caso pode ser explicado pelo fato de que para um nível de significância de 5 %, o tamanho amostral de 15 tratamentos não consegue dar precisão ao modelo, e com isso, o mesmo não consegue fornecer previsão confiável.

Diante disso, o modelo não é apto a fazer previsões, pois não há como melhorar sua precisão a partir dos dados experimentais por ajustes estatísticos na regressão, a não ser que se adicionem novos pontos, como as repetições dos tratamentos. Entretanto, como esta alternativa não é viável à pesquisa, em vista da dificuldade na preparação do material dragado dentro do tempo hábil, utilizou-se o modelo de regressão apenas para análises qualitativas dos efeitos das variáveis na resposta de durabilidade.

Então, seguindo a análise qualitativa, a Figura 4.16 expõe os gráficos obtidos para efeitos principais dos fatores. Observa-se que quanto maior a concentração da solução ativadora, e maior o teor de agente cimentante adicionado ao solo, menor a perda de massa acumulada resultante, sendo estes os fatores mais influentes, e nada obstante, estatisticamente significativos.

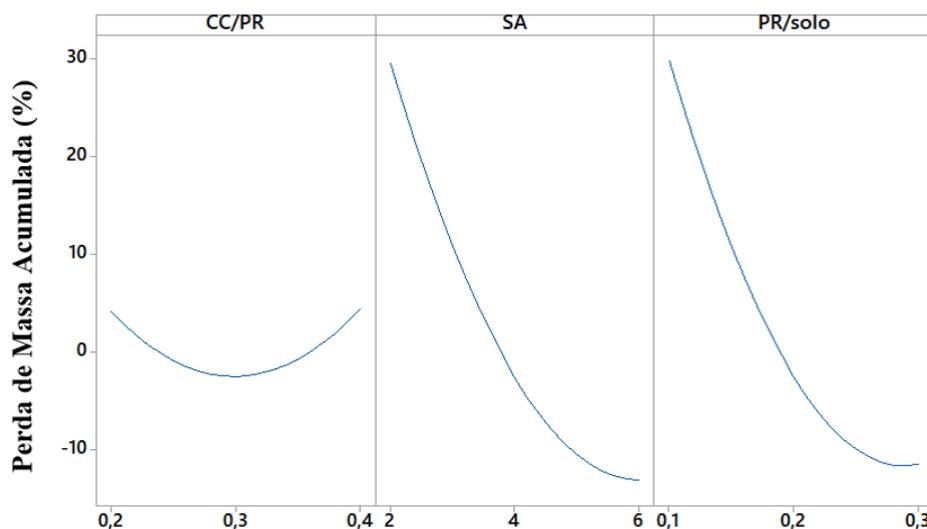


Figura 4.16 – Gráfico de efeitos principais para PCSO de durabilidade (AUTORAL, 2021).

A demanda por alto nível concentração de solução alcalina e de material precursor, pode ser relacionada às características do ensaio de durabilidade, onde as amostras são expostas a temperaturas elevadas (ciclos de secagem a 71°C) e é disponibilizada mais quantidade de água ao sistema após moldagem (ciclos de molhagem por imersão em água). Ou seja, a temperatura age como um catalizador das reações, somada à disponibilidade de água após moldagem, que

contribui na etapa de hidratação, facilitando a precipitação de quantidades maiores de compostos cimentantes hidratados.

Neste contexto, um ambiente com maior disponibilidade de alumino-silicatos reativos e álcalis é demandado, resultando no desenvolvimento de maiores quantidades de produtos de reações, contribuindo diretamente para o acréscimo de durabilidade relatado. Ainda, acrescenta-se que, para a resposta de PMA o fator B (SA) se mostra mais significativo que o fator C, ou que a interação entre eles (Tabela 4.6).

Autores como Caicedo Lotero (2020), Puertas (1995) e Fernandez-Jimenez (2000), que também estudaram cimentos álcali ativados através de hidróxidos alcalinos, salientam a importância do uso desse tipo de solução ativadora. Visto que tanto os cátions ( $\text{Na}^+$ ), quanto os ânions ( $\text{OH}^-$ ) da dissolução alcalina são essenciais em diferentes fases do processo de copolimerização para formação dos produtos de reação. Os cátions mantêm os níveis de pH e formam parte da estrutura do gel, enquanto os ânions induzem a hidrólise das ligações.

#### 4.2.2 Determinação do Melhor Tratamento Dentro da Região Experimental

Como já comentado, mesmo que o modelo de regressão apresente um  $R^2$  aj maior que 70%, ele não pode ser utilizado para fins de predição pela insuficiência do tamanho amostral no fornecimento de precisão. Este fato ainda pode ser observado pelo desvio padrão muito alto para variável de resposta, de 15,68 % (Tabela 4.6).

Complementa-se ainda, que pelo tamanho amostral não ser grande o suficiente, medidas de  $R^2$  e  $R^2$  aj podem variar muito, não sendo confiáveis. O *software* Minitab 17 indica que para este tipo de modelo sejam usadas no mínimo 45 amostras.

À vista disso, a equação de regressão não foi gerada, e conseqüentemente, tampouco se realizou possíveis análises a partir da mesma. Assim sendo, o melhor tratamento da região experimental foi determinado entre as amostras ensaiadas, sendo ele o tratamento 6 – composto por uma solução alcalina de 6 mol, 30% de material precursor e 40% de teor de cal no precursor.

### 4.3 DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DOS MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DE BTCS

Para determinação da dosagem de moldagem dos BTCs, de posse dos resultados de resistência à compressão simples e de perda de massa por imersão, ponderou-se segundo prerrogativas estabelecidas pela NBR 10834 (ABNT, 2013), sendo a principal, neste momento, a resistência a compressão simples. Portanto, entre o resultado de melhor tratamento obtido pelo modelo dentro da região experimental e pelas amostras ensaiadas, destacou-se a dosagem que apresentou/previu a maior resistência, sendo correspondente a moldada pelo tratamento 15.

Além disso, o tratamento 15 apresentou ótimos resultados no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, classificando-se como a mistura que produziu a terceira menor perda de massa acumulada ao término do 12º ciclo, na ordem de 1,49 % de peso perdido. A Figura 4.17 apresenta o aspecto físico da amostra deste tratamento antes e depois dos 12 ciclos de molhagem e secagem.

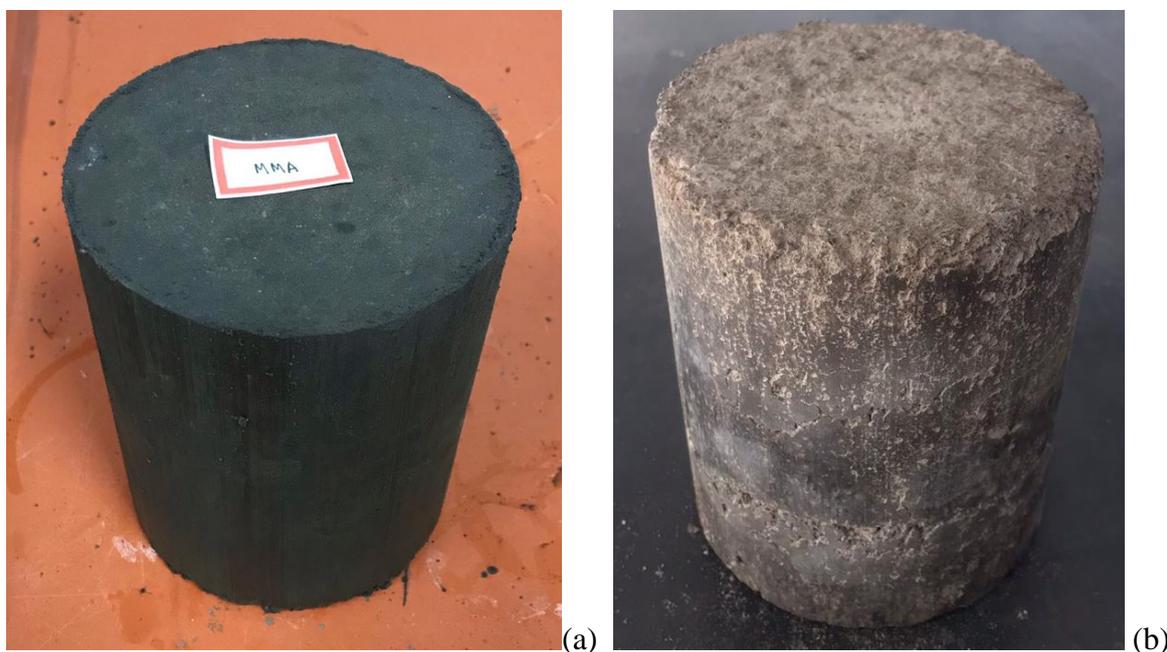


Figura 4.17 – Tratamento 15 (a) antes e (b) após 12 ciclos de molhagem e secagem (AUTORAL, 2021).

Posto isso, determinou-se que a dosagem dos materiais que compõem os BTCs fosse a mesma utilizada no tratamento 15, isto é, uma mistura de CC/PR = 30%, PR/solo = 30% e solução ativadora com concentração de 4 mol e 38 % de teor de álcalis.

#### 4.4 ANÁLISE DA MISTURA ADOTADA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE CURA

Após a determinação da dosagem de moldagem dos BTCs, elaboraram-se análises referentes às respostas de resistência à compressão simples e microestruturais das amostras ao longo do tempo.

##### 4.4.1 Resistência à Compressão Simples

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples em amostras cilíndricas moldadas a partir da dosagem adotada para a produção de BTC, em triplicata, para tempos de cura de 7, 28, 60 e 120 dias. A maior idade que pôde ser estudada foi de 120 dias, limitada pelo tempo hábil nesta etapa da pesquisa de mestrado.

Os resultados encontrados são expostos na Tabela 4.7 e na Figura 4.18.

Tabela 4.7 – Valores de RCS frente ao tempo de cura para a mistura ótima (AUTORAL, 2021).

<b>tempo (dias)</b>	<b>RCS média (MPa)</b>
<b>7</b>	1,75
<b>28</b>	3,27
<b>60</b>	4,10
<b>90</b>	4,32
<b>120</b>	4,37

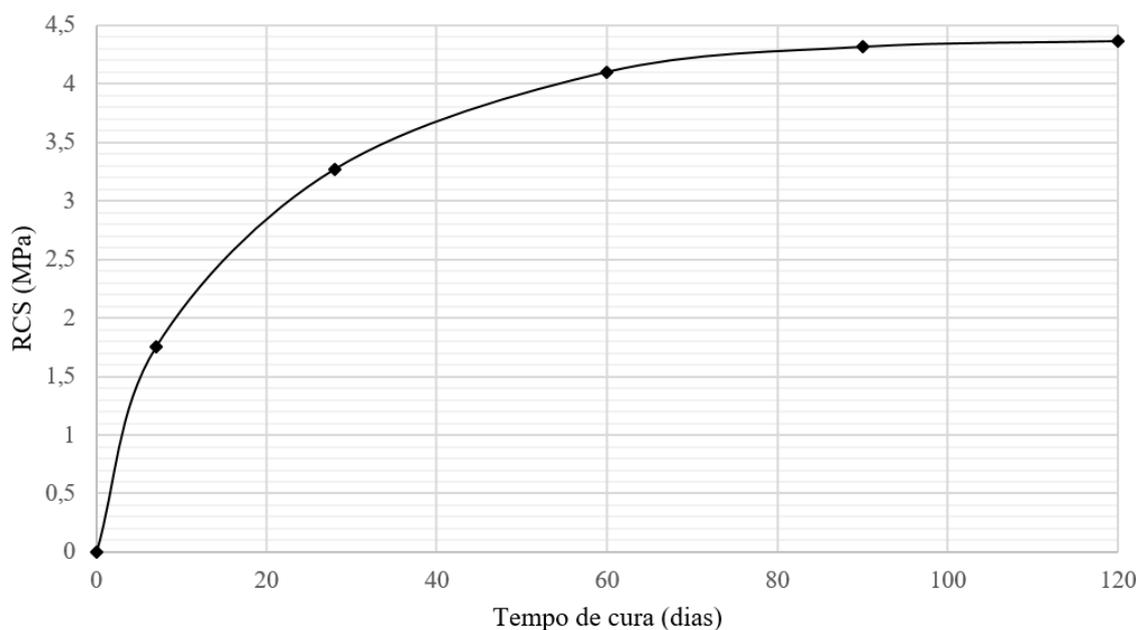


Figura 4.18 – RCS *versus* tempo de cura para a mistura ótima (AUTORAL, 2021).

Dada a natureza das reações de álcali ativação, onde tempos de cura maiores permitem uma maior quantidade de produtos de reação formados (géis ligantes), resistências maiores ao longo do tempo já eram esperadas. Notadamente, identificou-se que fator tempo conseguiu propiciar um incremento de até 60% na resposta de RCS.

Contudo, este melhoramento progressivo depende das condições de material precursor, de solução ativadora e de água disponíveis. Logo, a partir de certo momento, o incremento de resistência diminuiu. Este comportamento é evidenciado pelo gráfico da Figura 4.18, onde a RCS aumentou aproximadamente 87% entre o 7° e o 28° dia, 25 % entre o 28° e o 60° dia, 6% entre o 60° e 90° dia e 1% entre o 90° e o 120° dia.

#### 4.4.2 Ensaios de Microestrutura

De modo a avaliar as modificações na microestrutura do solo devido a formação de produtos de reação e sua evolução, foram realizados ensaios de difração de raios-X (DRX), aliadas à análises microscópicas através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os experimentos foram realizados a partir da mistura adotada, ao 7° dia de cura e ao 90°, seguindo os mesmos procedimentos do ensaio de resistência à compressão simples.

#### 4.4.2.1 Análise Mineralógica por Difração de Raios-X

A análise por Difração de Raios-X tem como intuito avaliar a transformação mineralógica das misturas. Para tanto, os resultados obtidos pelo ensaio foram tratados no *software X'Pert HighScore Plus*, utilizando a base de dados gratuita *Crystallography Open Database (COD)*. As fases cristalinas individuais foram identificadas apenas de forma qualitativa, a partir das posições angulares  $2\theta$  e distância interplanar (*d-spacing*).

A Figura 4.19 apresenta os difratogramas correspondentes à mistura escolhida para confecção dos BTCs, no 7° e no 90° dia de cura, bem como o difratograma original do solo dragado no Porto do Rio Grande, para fins de comparação.

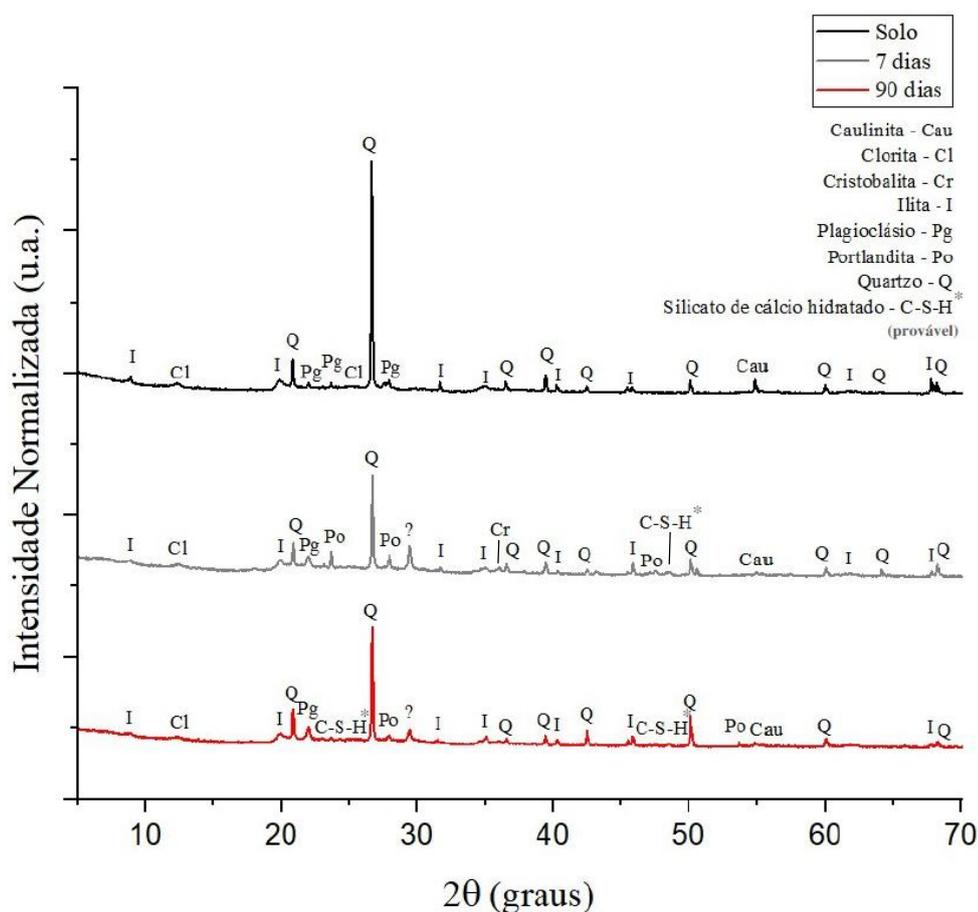


Figura 4.19 – DRX do solo e da mistura ótima em relação ao tempo de cura (AUTORAL, 2021).

De forma geral, é evidenciada a mudança dos picos cristalinos do solo através da adição de agente cimentante álcali ativado e pelo fator tempo, principalmente relacionados a diminuição de seus picos, como por exemplo, o de quartzo (Q) em  $2\theta = 26,88^\circ$ . Aliás, a diminuição de alguns, sobretudo relativos aos argilominerais, foi tão grande, que chegaram a desaparecer, como a clorita (Cl) em  $2\theta = 25,22^\circ$ .

Também se observa a presença de portlandita (Po), proveniente da cal de carbureto, e indícios de formação de produtos de reação tradicionais da técnica de álcali ativação. Neste último caso, simbolizados tanto na forma de estrutura amorfa, pelo aumento da intensidade do halo do difratograma, quanto cristalina, pela presença de pequenos picos relacionados ao silicato de cálcio hidratado (gel C-S-H) em forma de tobermorita.

Notadamente, ao se comparar os difratogramas do solo e da mistura aos 7 dias, percebe-se que a adição de agente cimentante propiciou o aparecimento de picos de hidróxido de cálcio (portlandita, COD 1001787), de dióxido de silício (cristobalita, COD 9015087) e indícios de silicato de cálcio hidratado na forma de tobermorita (COD 152489), além diminuição na intensidade e/ou desaparecimento de outros picos já comentada. A presença de cristobalita está relacionada a adição da cinza de casca de arroz, sendo já esperada, pois como a Tabela 3.2 já havia indicado, existe porção de estrutura cristalina de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) no material.

A medida que o tempo de cura foi aumentado, como mostra o difratograma de 90 dias, os mesmos comportamentos foram constatados. Em particular, incluiu-se o consumo da cristobalita, em  $2\theta = 36,04^\circ$ , e da portlandita em  $2\theta = 23,64^\circ$  e  $47,54^\circ$ , através do desaparecimento de seus picos cristalinos.

A diminuição dos picos cristalinos, tanto de minerais que compõem o solo, quanto o precursor (em especial, a portlandita), coincidem com os indícios de formação de produtos de reação. Estabelecendo-se assim, como um indicador do consumo dos mesmos para a produção dos compostos ligantes.

Por conseguinte, os indícios de formação dos géis C-S-H foram identificados na Figura 4.19, assumindo estruturas do tipo: (i) cristalinas, caracterizadas em forma de pequenos picos de

tobermorita; e (ii) amorfa, associados ao crescimento de géis ligantes de caráter amorfo em meios alcalinos com alto teor de cálcio, quais são prognosticadas pelo aumento da intensidade curvatura côncava do difratograma, especialmente no intervalo de  $2\theta = 5^\circ$  a  $20^\circ$  e pelo pequeno aumento na intensidade do halo no intervalo de  $2\theta = 22,5^\circ$  a  $26^\circ$ .

A notável aparição de um pico de maior intensidade no intervalo de  $2\theta = 29^\circ$  a  $30^\circ$ , legendado com um ponto de interrogação, se deve ao fato de que esse produto de reação tem posição compatível (de  $2\theta = 27,5^\circ$  a  $30^\circ$ ) e mesma distância interplanar ( $d\text{-spacing} = 3,03 \text{ \AA}$ ) do grupo da tobermorita, ao mesmo tempo que pode indicar a formação de calcita e vaterita. Neste sentido, Caicedo Lotero (2020) explicou que, as fases cristalinas da calcita, produto de reação secundário formado pela carbonatação da cal de carbureto ou interação de dióxido de carbono com íons de cálcio, são difíceis de se distinguir nos difratogramas por sua grande coincidência e interpolação com as linhas de difração do gel C-S-H.

Em suma, a análise por DRX apontou uma possível formação de géis de silicatos alcalinos (C-S-H) no material, quais ocorrem, tipicamente, em processos de ativação alcalina através de precursores com alto conteúdo de cálcio, estando de acordo com a mistura estudada. Caso comprovada, poderia explicar a melhora de propriedades mecânicas das amostras, vistas nos itens 4.1 e 4.2, bem como a evolução da sua resistência com o tempo (item 4.4.1).

Neste sentido, ressalva-se que, os indícios encontrados se deram através de associações com produtos de reação de menor ordem estrutural, amorfos ou pequenos picos. Portanto, pela dificuldade na identificação da tobermorita nos difratogramas, e pelo fato da análise realizada não utilizar nenhuma técnica de refinamento de estrutura para caracterização de materiais cristalinos, ela não é confiável. Em outras palavras, a partir dos resultados obtidos, assim como estão, não se pode confirmar a formação de compostos ligantes, apenas se ter indícios.

Dessa maneira, a identificação microestrutural deve ser complementada de forma a validar a possível formação dos produtos de reação indicados. Como por exemplo, através da utilização de técnicas de refinamento, como o Método de Rietveld, ou outros tipos de análises, como por microscopia eletrônica.

#### 4.4.2.2 Análise Microscópica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por MEV busca estimar, de maneira visual, a formação de produtos de reação e sua evolução em relação ao tempo de cura, através de transformações morfológicas na microestrutura dos componentes. Para tanto, foram estudadas amostras dosadas a partir do tratamento escolhido para a moldagem dos BTCs, para as idades de 7 e de 90 dias, curadas a temperatura de  $\pm 23^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 4.20, expõe o resultado de MEV para a amostra de 7 dias, com uma ampliação de 1500 vezes, a fim de se comparar com a imagem de mesma ampliação do solo (Figura 3.14 (d)). De antemão, se justifica a presença visual de outros materiais por ser uma mistura com cal de carbureto e cinza de casca de arroz.

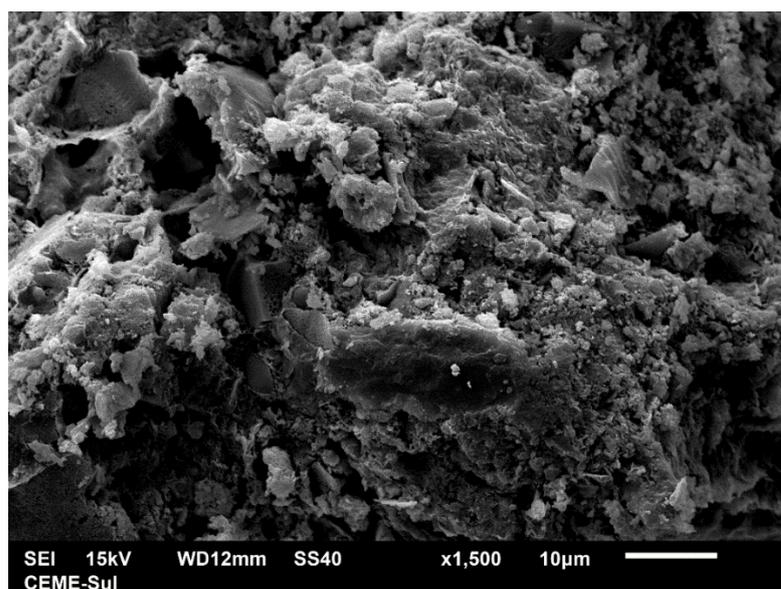


Figura 4.20 – Imagem de MEV com ampliação de 1500 vezes da mistura curada por 7 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).

De maneira geral, percebe-se que as partículas se encontram em estado maior de agregação do que no solo original, o que pode ser explicado por diversas razões: pela compactação do material, pela mudança na granulometria (que antes era composta apenas pelo material dragado), pelo fenômeno de floculação relacionado à adição de cal e pela possível formação de produtos de reação.

Os fenômenos de floculação e aglomeração dos argilominerais podem ser identificados a partir da Figura 4.21, onde os grãos assumem um contato borda-a-borda entre eles. A mesma tendência foi observada por Scheuermann Filho (2019) na estabilização de uma areia argilosa por adição de cal de carbureto e vidro moído, aos 7 dias de cura, à temperatura ambiente ( $\pm 23^{\circ}\text{C}$ ).

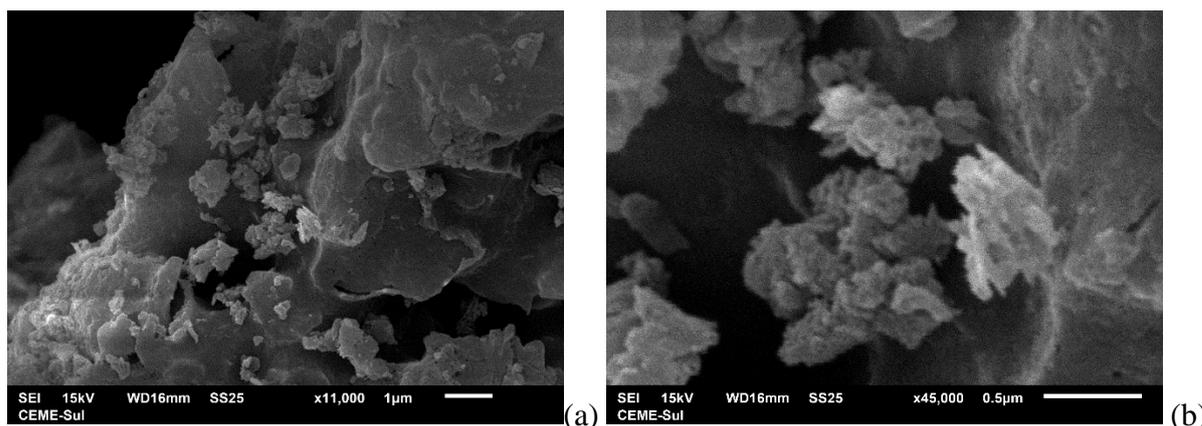


Figura 4.21 - Imagem de MEV com ampliação de (a) 11.000 e (b) 45.000 vezes da mistura curada por 7 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).

Ainda, ressalta-se que, mesmo havendo mais pontos de ligação aparente entre as partículas, percebe-se pelas Figuras 4.20 e 4.22, que o material se encontra bastante poroso.

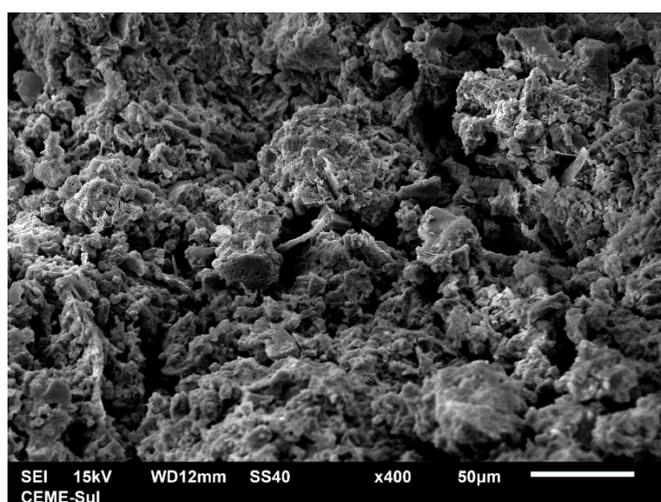


Figura 4.22 - Imagem de MEV com ampliação de 400 vezes da mistura curada por 7 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).

Pondo fim a análise aos 7 dias de cura, conclui-se, que a identificação do silicato de cálcio hidratado (gel C-S-H) não foi possível de ser confirmada por análise visual nesta idade.

Isso posto, parte-se para a análise da mistura aos 90 dias de cura. As Figura 4.23 e 4.24 apresentam sua morfologia através de ampliações de 1500 e 400 vezes, respectivamente.

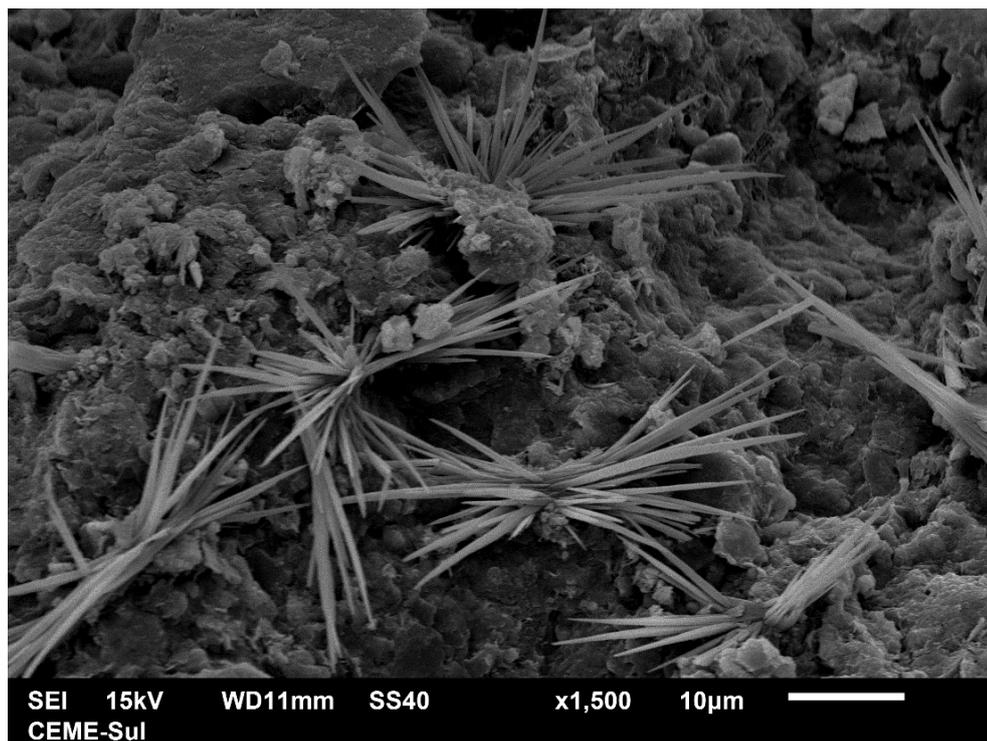


Figura 4.23 - Imagem de MEV com ampliação de 1500 vezes da mistura curada por 90 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).

Ao compararmos as imagens com ampliação de 1500 vezes, de imediato se nota a formação de grandes estruturas cristalinas fibrilares, relacionadas ao mineral etringita, sendo também conhecidas como agulhas de etringitas. A formação desse composto é muito comum e acontece nos primeiros momentos de hidratação do agente cimentante, no caso temperaturas de cura menores que 60°C, pela combinação de ânions de sulfato e íons de OH com silicatos e aluminatos, sendo essa reação uma das responsáveis pela pega e endurecimento do cimento.

As etringitas primárias são quimicamente instáveis, e com o tempo tendem a se decompor, transformando-se em C-S-H. Ademais, são compostos muito porosos, gerando estruturas com baixa resistência (MALAGUTI, 2016).

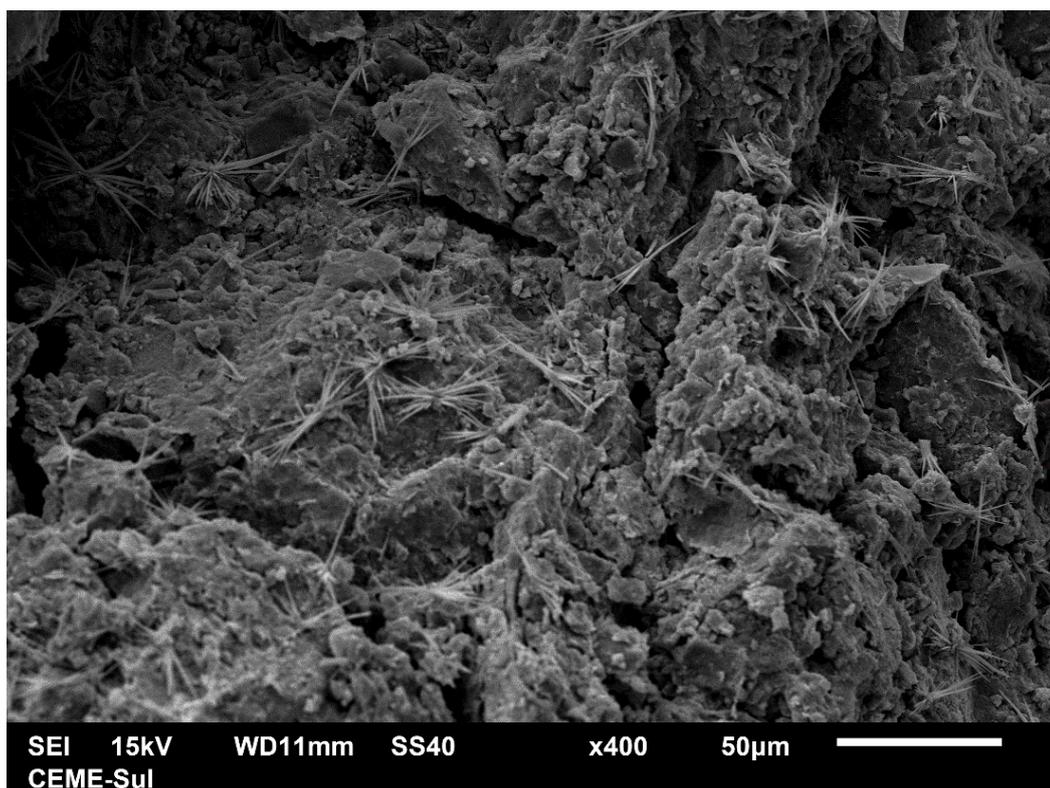


Figura 4.24 - Imagem de MEV com ampliação de 400 vezes da mistura curada por 90 dias à temperatura ambiente (AUTORAL, 2021).

A relação pressuposta entre os cristais fibrilares vistos nas imagens MEV (Figuras 4.23 e 4.24) e a etringita ainda deve ser confirmada a partir do uso da técnica de espectroscopia por energia dispersiva por feixes de raios X (EDS), que permite identificar a composição química da região amostrada. Entretanto, ressalta-se a presença de 1,47 % em peso de solo composto por óxido sulfúrico (Tabela 3.6), também conhecido como anidrido sulfúrico, isto é, existe a presença de sulfatos no material que poderiam levar a formação deste mineral.

Ainda, a partir da análise das imagens da mistura com 90 dias de cura, em comparação às imagens de mesma ampliação ao 7º dia de cura, observa-se que para a maior idade, há certa dificuldade na identificação dos grãos individuais, que vieram majoritariamente a apresentar um formato mais arredondado e com superfície menos rugosa. Além disso, constata-se que aos 90 dias, o material se encontra com bem menos poros em relação ao seu 7º dia de cura, o que induz ao reconhecimento da formação de géis C-S-H em seus vazios, também devendo ser confirmada também pelo uso de EDS.

#### 4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS BTCS

Para a qualificação dos BTCs em relação à resistência à compressão simples, foram ensaiadas amostras com 3 idades distintas (tempo de cura de 7, 28 e 60 dias), em duplicata. Selecionouse a idade de 7 dias para avaliar se o BTC poderia ser utilizado em um período de tempo próximo a sua moldagem, ganhando resistência *in situ*, e de 60 dias como sendo uma idade ótima ao se ponderar que os blocos não passariam tanto tempo armazenados, mas que a maioria das reações já teriam ocorrido de maneira a incrementar a RCS da mistura (como visto no item 4.4.1).

Ainda, como comentado no item 3.3.4, a cura desses espécimes difere daquela empregada para os corpos de prova cilíndricos, pois foram feitas ao ar livre e não em embalagens lacradas, a fim de tornar o processo mais próximo da prática na fabricação industrial destes BTCs. Essa cura se deu à sombra, com temperatura de  $\pm 23^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa (UR) média de 75 %.

A Tabela 4.8 apresenta os valores obtidos para os 3 tempos de cura em análise. Observa-se que para os tempos de cura previstos pela NBR 10834 (ABNT, 2013) ( $\geq 28$  dias) as resistências individuais e médias dos BTCs superaram as mínimas exigidas pela norma (Tabela 2.3), sendo aproximadamente 50% superior à média aos 28 dias e 100% aos 60 dias.

Tabela 4.8 – Resistência à compressão simples dos blocos (AUTORAL, 2021).

<b>Tempo de cura (dias)</b>	<b>RCS individual (MPa)</b>	<b>RCS média (MPa)</b>
<b>7</b>	1,06	1,05
<b>7</b>	1,04	
<b>28</b>	3,05	3,05
<b>28</b>	3,06	
<b>60</b>	3,99	4,00
<b>60</b>	4,02	

Para além das normas brasileiras, ressalta-se, que desde os 28 dias, os BTCs superaram os limites de resistência à compressão mínimos estabelecidos pelas normas da Espanha, da França, da Austrália e da Nova Zelândia (Tabela 2.4). Caracterizando-se como resistentes tanto no Brasil, como em nível mundial.

Entretanto, mesmo com resultados satisfatórios, ressalta-se que a mudança na umidade relativa da cura provocou efeitos visíveis de carbonatação na superfície dos BTCs (Figura 4.25 (a)). A formação do carbonato de cálcio, como comentado no item 2.4, fragiliza as misturas de solo-cal, pois diminui os efeitos de curto prazo da cal (troca iônica, floculação e aglomeração), e prejudica as reações pozolânicas, formando compostos de menor resistência.

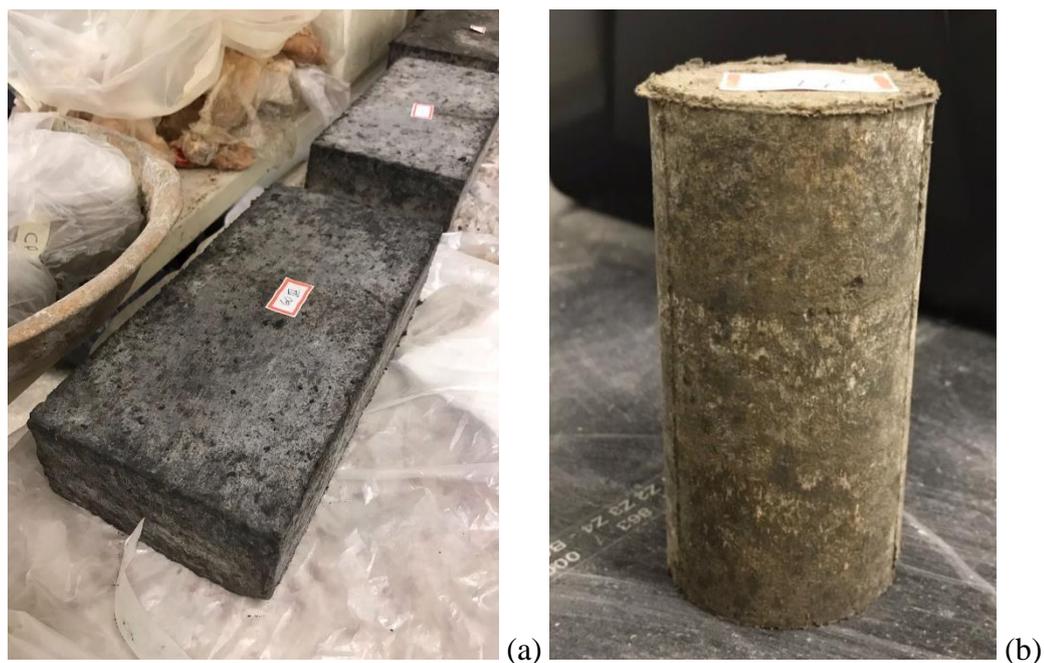


Figura 4.25 – Amostras secas ao ar livre (AUTORAL, 2021).

Além disso, Sun et al. (2021) demonstraram em seu trabalho que a mudança da umidade ambiental, interfere não só na superfície das amostras, mas também em sua umidade interna. Quando a umidade relativa é reduzida, há a desaceleração da hidratação do agente cimentante nos poros do material, que pode praticamente cessar quando a UR for menor que 80%, mesmo que quantidade significativa de água ainda esteja presente (WYRZYKOWSKI; LURA, 2016).

Posto isso, para fins de comparação com amostras cilíndricas curadas em saco plástico, moldaram-se um CP de mesmo formato com idade de cura de 7 dias, e outro, com idade de 28 dias (Figura 4.25 (b)). A Tabela 4.9 resume os resultados encontrados para RCS.

Tabela 4.9 – RCS em relação a umidade de cura (AUTORAL, 2021).

<b>Resistência à compressão simples (MPa)</b>		
<b>t (dias)</b>	<b>Cura em saco plástico</b>	<b>Cura ao ar livre</b>
<b>7</b>	1,75	0,21
<b>28</b>	3,27	0,69

Percebe-se através dos resultados obtidos (Tabela 4.9), que a resistência à compressão simples diminui quando a cura é realizada em ambientes abertos, configurando-se como 12% da total obtida aos 7 dias de cura em saco plástico, e 21%, analogamente, aos 28 dias. O mesmo comportamento foi verificado por outros autores como Sun et al. (2020, 2021), Wyrzykowski e Lura (2016) e Champiré et al. (2016).

Dessa forma, finaliza-se comentando que, a resistência à compressão simples dos BTCs ainda pode ser aumentada em relação aos resultados encontrados na Tabela 4.8, utilizando outro método de cura, como a cura úmida. Neste caso, a NBR 10833 (ABNT, 2013) indica que a umidificação dos elementos deve acontecer desde 6 h após a moldagem e durante os sete primeiros dias, sem especificar de que maneira.

#### 4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BTCS

Os resultados de absorção de água para os BTCs de 7, 28 e 60 dias, são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Absorção de água dos BTCs (AUTORAL, 20201).

<b>Tempo de cura (dias)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
<b>7</b>	26,86
<b>28</b>	21,18
<b>60</b>	18,27

Observa-se na Tabela 4.10, que na idade mínima prevista pela NBR 10834 (ABNT, 2013), aos 28 dias, o BTC atinge a faixa de absorção de água mínima exigida pela mesma (Tabela 2.3), de 22 %, o validando em relação a esta propriedade.

A absorção de água é uma propriedade ligada diretamente à porosidade do material. Diante disso, como a revisão bibliográfica introduziu e como se pôde observar nas imagens MEV do item 4.4.2.2, para as idades iniciais é natural que o material estabilizado por agentes álcali ativados encontre-se muito poroso. Entretanto, com o passar do tempo, e aumento da hidratação do agente cimentante, a estrutura tende a ficar mais compacta pela formação de géis ligantes em seus vazios, o que explica a diminuição da absorção de água.

Assim sendo, conclui-se que o BTC produzido pela estabilização do material dragado do Porto do Grande através da técnica de álcali ativação, a partir da idade de 28 dias atinge todas as condições exigidas pela NBR 10834 (ABNT, 2013), sendo apto à execução de alvenaria sem função estrutural.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos com a pesquisa oportunizam algumas conclusões, a respeito (i) da potencial aplicação do material dragado no Porto do Rio Grande para confecções de Blocos de Terra Comprimida (BTCs), (ii) da estabilização mediante ao emprego e desenvolvimento de um novo material cimentante, através da técnica de ativação alcalina, reutilizando outros resíduos industriais regionais: cinza de casca de arroz (CCA) e a cal de carbureto (CC).

Ao longo do trabalho, estudou-se a influência de alguns fatores e obteve-se a dosagem que levou ao melhor comportamento do material frente às respostas mecânicas de resistência à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem. Ademais, para além da relevância acadêmica, o material se mostrou aplicável em obras de engenharia a partir de 28 dias de cura, em forma de BTC, atingindo uma resistência média de 3 MPa e uma absorção de água menor que 22 %, atendendo as exigências prescritas pela NBR 10834 (ABNT, 2013). Sendo assim, considerando-se as médias de produção anuais de CCA e CC encontradas na bibliografia para a região, e estimando-se uma média de retirada de 3 milhões de metros cúbicos de volume de material por dragagem no Porto do Rio Grande a cada 2 anos, pode-se prever que 38 milhões de BTCs poderiam ser produzidos por ano na região.

Destarte, comprova-se como alternativa aplicável de disposição final de volume de material dragado, a criação de sítios continentais destinados ao reuso do recurso mineral na confecção de BTCs, que por um lado evita que o mesmo seja disposto em mar aberto, e, por outro, demonstra potencial de assegurar que muitas famílias sejam tiradas do desabrigo na região. Ainda, destaca-se que o uso da técnica de solo-cimento já ganhou espaço, evitando o processo de queima dos tijolos tradicionais, e que o novo material cimentante, produzido através de outros resíduos regionais, respondeu como substituto competente ao emprego do cimento Portland e da cal hidratada, melhorando propriedades mecânicas do solo.

Além disso, a partir da análise específica dos resultados obtidos através dos ensaios realizados, estabelecem-se, os seguintes comentários:

**Resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos:**

- (a) A análise estatística dos resultados por meio do projeto fatorial inicial  $2^3$  com ponto central verificou significância da curvatura do modelo, indicando a realização do ajuste quadrático do mesmo, através de um projeto composto de segunda ordem (PCSO). Além disso, demonstrou a significância da interação de todos os fatores principais testados: teor de cal no precursor (A), concentração da solução alcalina (B) e quantidade de agente cimentante (C), corroborando que as principais e indissociáveis características de um sistema álcali ativado são: a concentração do ativador, e a composição/quantidade dos precursores;
- (b) A análise estatística através do PCSO demonstrou a significância do efeito principal do fator C e do efeito quadrático puro do fator B. O fator C se mostrou o mais influente, e não apresentou um comportamento quadrático, indicando que este projeto não prevê a otimização do sistema, e que esta deve estar direcionada no aumento da dosagem de material precursor. Já a modelagem do fator B a partir de um coeficiente quadrático, indica que existe uma concentração que maximiza a resistência à compressão simples (RCS) entre os níveis baixo e alto pré-definidos pelo projeto, atestando a existência de uma concentração ótima para as soluções alcalinas;
- (c) O valor encontrado para o coeficiente de determinação de 81,80%, a significância do ajuste dos dados à equação e a validação das suposições estabelecidas pelo modelo, determinaram a boa qualidade global do modelo de regressão gerado pelo experimento e a possibilidade de seu uso para fins de predição;
- (d) A dosagem que maximiza a RCS, prevista pelo modelo dentro da região experimental estudada, foi de 30% de precursor, sendo este composto por 27,47% de cal de carbureto e utilizando uma solução ativadora de 4,14 mol de NaOH, levando a uma resistência de 1,38 MPa. Já o melhor tratamento experimental, alcançou uma resistência de 1,75 MPa (maior que a prevista), a partir da dosagem do tratamento 15, de 30% de precursor, 30% de CC no precursor e 4 mol de concentração de solução alcalina. Este resultado é relacionado ao fato de que nem todos os pontos experimentais estão sobre a curva de regressão gerada para o PCSO, ao mesmo tempo em que o ponto máximo do modelo é obtido a partir da equação de regressão. Sendo assim, o tratamento 15 foi determinado

como o melhor tratamento dentro da região experimental, em relação a maximização da RCS;

- (e) Quanto à influência do tempo de cura, foi verificada a partir do tratamento 15, e foi demonstrado ganhos de até 60 % de resistência à compressão simples, ao se comparar o menor e o maior tempo de cura estudados, de 7 e 120 dias, respectivamente. Ademais, constatou-se que sua influência é maior nos primeiros 60 dias de cura, e após, tende a proporcionar incrementos menores, levando a uma resistência quase constante com o tempo. Estes resultados permitem concluir que, as reações no sistema se estendem pelo menos até 120 dias, e que os incrementos de RCS obtidos através da provável formação de produtos de reação, dependem da disponibilidade de material precursor reativo, água e álcalis do meio, por isso tendem a diminuir após certo consumo;

#### **Durabilidade por ciclos de molhagem e secagem:**

- (a) Quanto aos resultados obtidos pela análise individual de perda de massa acumulada (PMA) das amostras, constatou-se que, os tratamentos 3 e 5, ambos contendo baixo nível de precursor (PR/solo) e de concentração de solução alcalina (SA), acabaram por mostrar desagregação do corpo de prova em meados do quarto e do oitavo ciclo. Em sentido contrário, os tratamentos que apresentaram as menores perdas de massa, foram respectivos aos tratamentos 6 e 1, quais constituem-se do nível mais alto das variáveis SA e PR/solo;
- (b) No que concerne à análise estatística, realizada diretamente a partir de um PCSO, confirmou a importância dos mesmos dois fatores (PR/solo e SA) ao verificar a significância estatística da variável B, da C e da interação entre elas (BC). Ademais, para a resposta de PMA, o fator B se mostrou mais significativo que o fator C, ou que BC. A demanda observada por SA, e até mesmo por PR/solo, pode ser relacionada às características do ensaio de durabilidade, onde as amostras são expostas a temperaturas elevadas (ciclos de secagem a 71°C) e é disponibilizada mais quantidade de água ao sistema após moldagem dos CPs (ciclos de molhagem por imersão em água). Neste contexto, um ambiente com maior disponibilidade de álcalis e de alumino-silicatos reativos é requisitado se comparado ao ensaio de RCS, resultando no desenvolvimento

de maiores quantidades de produtos de reações, contribuindo diretamente para o acréscimo de durabilidade relatado;

- (c) Em relação à equação de regressão obtida pelo modelo experimental, não se aplicou ajuste aos dados, por ter um tamanho amostral de 15 pontos, menor que o mínimo estipulado pelo modelo para um nível de significância de 5 %, de 45. Diante disso, o modelo de regressão gerado caracteriza-se como incapaz de fazer previsões confiáveis, podendo ser utilizado apenas para análises qualitativas dos efeitos das variáveis na resposta de durabilidade. Ainda, alerta-se ao fato de que nenhum fator significativo apresentou comportamento quadrático, sendo indício de que os dados requerem outro tipo de modelo para seu ajuste, ou de que a região experimental se encontra longe do ponto ótimo, devendo ser confirmado a partir da adição de pontos amostrais e talvez de uma abordagem mais ampla;
- (d) A determinação do melhor tratamento obtido na região experimental em relação à durabilidade, foi realizada entre as amostras ensaiadas, visto a incapacidade de previsão do modelo estatístico. Sendo assim, a dosagem que minimizou a PMA, foi obtida através do tratamento 6, sendo composta por solução de 6 mol de NaOH, 30% de precursor e um teor de 40 % de cal de carbureto. Ademais, verificou-se que o tratamento 15, qual apresentou a maior RCS da região experimental, perdeu 1,49 % de massa acumulada nos 12 ciclos de molhagem e secagem, classificando-se como a terceira menor PMA;

### **Ensaio de microestruturas**

- (a) Quanto às transformações mineralógicas averiguadas por DRX: de maneira geral foi evidenciada a diminuição dos picos cristalinos dos minerais que compõem originalmente o solo. Esse comportamento, em paralelo com o consumo da portlandita adicionada à mistura pelo precursor, em específico, pela cal de carbureto, podem indicar o consumo dos mesmos para formação de produtos de reação;
- (b) Quanto à detecção de compostos ligantes por DRX: analisando os difratogramas obtidos pelo ensaio, sem utilizar técnicas de refinamento, percebe-se um aumento do halo amorfo e o aparecimento de pequenos picos cristalinos relacionados à formação do gel

silicato de cálcio hidratado (C-S-H), correspondente à expectativa de compostos ligantes formados a partir de um sistema álcali ativado com alto teor de cal. Essas evidências explicam as melhorias das propriedades mecânicas averiguadas pelos experimentos relativos à RCS e durabilidade por ciclos de molhagem e secagem, e a mudança de estrutura do solo verificada pelas imagens MEV. Entretanto, pela falta de refinamento dos dados e a dificuldade na identificação dessas fases cristalinas, não foi possível atestar com total certeza a formação desses ligantes;

- (c) Quanto às transformações morfológicas averiguadas por MEV: através das imagens obtidas, foi possível verificar, desde o 7º dia de cura, um maior estado de agregação das partículas de solo estabilizadas por compressão e adição de agente cimentante. Ademais, fenômenos de floculação e aglomeração, associados à adição de cal de carbureto, puderam ser vistos nesta idade. No que toca as transformações decorridas no tempo, comparando a mesma mistura aos 90 dias de cura, observa-se que os grãos, em quase totalidade, passaram a apresentar um formato mais arredondado e com superfície menos rugosa, dificultando sua identificação individual. Além disso, constatou-se que aos 90 dias, o material se encontra com bem menos poros em relação aos seus 7 dias de cura, o que induz ao reconhecimento da formação de géis C-S-H em seus vazios, devendo ser confirmada pelo uso da técnica de espectroscopia por energia dispersiva por feixes de raios X (EDS). Não obstante, as imagens de 90 dias de cura também retrataram com clareza o surgimento de estruturas cristalinas fibrilares, associadas à etringita, produtos de hidratação comuns em composto cimentantes contendo sulfatos (no caso, inseridos pelo solo) e às baixas temperaturas de cura, quais tendem a se decompor com o tempo, transformando-se em C-S-H;

### **Determinação da dosagem e qualificação dos BTCs**

- (a) A determinação da dosagem de moldagem dos BTCs foi realizada de acordo com os resultados obtidos pelos programas experimentais de resistência à compressão simples e de perda de massa por imersão, ponderando segundo as exigências estabelecidas pela NBR 10834 (ABNT, 2013), qual apenas considera, dentre as duas variáveis, a RCS. Para essa propriedade, entre o resultado de melhor tratamento obtido pelo modelo de regressão dentro da região experimental e pelas amostras ensaiadas, destacou-se a

dosagem que apresentou/previu a maior resistência, sendo correspondente ao tratamento 15. Não obstante, o tratamento 15 apresentou o terceiro melhor desempenho frente à durabilidade por ciclos de molhagem e secagem. Por esses motivos, determinou-se que a dosagem dos materiais que compõem os BTCs fosse a mesma utilizada no tratamento 15, isto é, uma mistura de CC/PR = 30%, PR/solo = 30% e solução ativadora com concentração de 4 mol;

- (b) No que se refere aos resultados obtidos tocantes à resistência à compressão simples dos BTCs: efeitos deletérios em relação a esta propriedade foram constatados devido a cura ao ar livre dos blocos, sendo associados a carbonatação e perda de umidade. Entretanto, mesmo com este tipo de cura não ideal, mas mais próxima a um processo industrial de menor nível tecnológico, os BTCs apresentaram resistências superiores as mínimas exigidas tanto por normativas brasileiras, quanto internacionais, alcançando em média 3,05 MPa aos 28 dias e 4 MPa aos 60 dias de cura;
- (c) Tocantes à absorção de água: verificou-se que os BTCs diminuem sua absorção de água quanto maior o tempo de cura e que só adquirem uma absorção de água que satisfaça a NBR 10834 (ABNT, 2013) aos 28 dias, resultando na ordem de 21,18 %. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que, em idades iniciais o material estabilizado por agentes álcali ativados encontra-se muito poroso, mas com o passar do tempo, e com o provável aumento da hidratação do agente cimentante, a estrutura fica mais compacta, diminuindo a absorção de água obtida nos ensaios. O efeito de diminuição dos poros com o tempo, pôde ser comprovado a partir das imagens MEV;
- (d) Desempenho geral dos BTCs: pode ser considerado satisfatório frente às propriedades de resistência à compressão simples e absorção de água, de acordo com as prescrições da NBR 10834 (ABNT, 2013), a partir dos 28 dias de cura. Por isso, os BTCs podem ser utilizados na execução de alvenaria sem função estrutural. Ademais, o material apresentou uma boa durabilidade, visto sua pequena perda de massa acumulada de 1,49 %, após 12 ciclos de molhagem e secagem, quais simulam um envelhecimento acelerado do material.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira a complementar e dar um prosseguimento ao trabalho realizado nesta pesquisa, ampliando o conhecimento sobre cimentos alternativos por álcali ativação de cinza de casca de arroz, cal de carbureto e hidróxido de sódio, alternativas de reutilização do material dragado no Porto do Rio Grande e, especificamente, sobre a técnica de BTC, sugerem-se os seguintes tópicos de pesquisa:

- (a) Utilização de uma abordagem experimental estatisticamente mais completa, a fim de otimizar a variável de resposta de resistência à compressão simples;
- (b) Execução de um projeto experimental para a variável de saída absorção de água, e após, otimizar as variáveis de RCS e absorção de água em conjunto, para determinação da dosagem de materiais utilizada nos BTCs;
- (c) Adicionar duas repetições aos tratamentos do programa composto de segunda ordem para durabilidade, verificando o ajuste do modelo;
- (d) Realização de ensaios de lixiviação e solubilização do solo dragado no Porto do Rio Grande, bem como o efeito da estabilização pelo agente cimentante álcali ativado, a fim de caracterizar o solo quanto a sua toxicidade e analisar o encapsulamento de possíveis elementos traço;
- (e) Empregar outro tipo de cura para os BTCs, como a cura úmida, e avaliar a mudança nas respostas de RCS e absorção de água;
- (f) Realização de maior número de ensaios para RCS e absorção de água dos BTCs, de acordo com as recomendações da NBR 8492 (ABNT, 2012);
- (g) Ampliar o estudo de microestrutura das misturas, através do refinamento dos difratogramas, como pelo método de Rietveld, e pela adição de maior variedade de ensaios DRX e MEV utilizando EDS.

## 6 REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada a enfoque logístico e ambiental**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1ª ed. p. 687, 2005.

ALAM, S.; DAS, S. K.; RAO, B. H. Strength and durability characteristic of alkali activated GGBS stabilized red mud as geo-material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 932-942, 2019.

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Estatístico Aquaviário**. Ano: 2019. Disponível em: < <http://web.antaq.gov.br/anoario/>>.

ANTONELLI, J. F. C., DOS ANJOS AZAMBUJA, M. Análise de cenário atual de produção de Bloco de Terra Comprimida (BTC). **Anais do V Simpósio Brasileiro de Online de Gestão Urbana**. p 884 – 901, 2021.

ARAUJO, M. M. F., FAGUNDES, D. F., MULLER, M. Evaluation of the confinement technique using a closed geotextile system to the dewatering of dredged sediments in the port of Rio Grande. **Proceedings of 4<sup>th</sup> Pan American Conference on Geosynthetics**. Rio de Janeiro, 26-29 ap, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2016

\_\_\_\_\_. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio**. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6473: Cal virgem e cal hidratada: análise química**. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6484: Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio**. 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – Requisitos.** 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8492: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.** 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004. Resíduos sólidos: classificação.** 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10832: Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual.** 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento.** 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10834/2013: Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Requisitos.** 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10835: Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Forma e dimensões – Padronização.** 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 10836: Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio.** 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio.** 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 13554: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio.** 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 13600: Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.** 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 16606: Cimento portland – Determinação da pasta de consistência normal.** 2018.

\_\_\_\_\_. **NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** 2000.

ASTM. D2487: **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).** American Society for Testing and Materials, [s. l.], p. 15, 2017.

ASTM. D4972: **Standard Test Method for pH of Soils.** American Society for Testing and Materials, American Society for Testing and Materials, [s. l.], 2013.

ASTM. D559/D559M: **Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures.** American Society for Testing and Materials, [s. l.], 2015.

AYTEKIN, M.; NAS, E. Soil stabilization with lime and cement. **Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 471-477, 1998.

BAISCH, P. 1994. **Les oligo-elements metalliques du systeme fluvio-lagunaire dos Patos, Flux et devenir (Brasil).** Tese de Doutorado em Geologia Marinha. Universidade de Bordeaux, Bordeaux. 345p.

BASAGLIA, T.; VIEIRA, J. A pesca amadora recreativa de caniço na praia do cassino, RS: necessidade de informações ecológicas aliada à espécie alvo. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, 9(1):25-29, 2005.

BAUMGARTEN, M. G. Z., NIENCHESKI, L. F. H., VEECK, L., 2001. Nutrientes na coluna da água e na água intersticial de sedimentos de uma enseada rasa estuariana com aportes de origem antrópica (RS-Brasil). **Atlântica**, v. 23, n. December, p. 101-116, 2001.

BRANDL, H. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. In: **Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Volume 3, Stockholm. 1981.

BRASIL; BRASIL. Lei nº 12.815, de 5 de junho de 2013. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 2013.

BRASIL. Secretaria de Portos da Presidência da República. **Plano mestre do Porto do Rio Grande.** Florianópolis, 2013.

BRUSCHI, G. J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

BURGUEÑO, L. E., TEIXEIRA, L. D. S., DA SILVA, J. B., DIAS, C. R. Estudo da ocorrência de contaminantes nos sedimentos de dragagem, dispostos em bacias de sedimentação, no Porto de Rio Grande, RS. **Anais do III SEMENGO-Seminário e Workshop de Engenharia Oceânica**. Rio Grande, RS: FURG–Universidade Federal de Rio Grande. 2008.

BURGUEÑO, L. E. T. **Estimativas da contaminação dos sedimentos dragados no porto de Rio Grande para disposição em solo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2009.

BURRIS, L. E., ALAPATI, P., MOSER, R. D., LEY, M. T., BERKE, N., KURTIS, K. E. **Alternative cementitious materials: Challenges and opportunities**. American Concrete Institute, ACI Special Publication. p. 1 - 10, 2015.

CALLIARI L.J., FACHIN S. Laguna dos Patos. Influência nos Depósitos Lamíticos Costeiros. **Pesquisas em Geociências**, 20:57-69. 1993.

CALLIARI L.J., GRIEP M.F. **Uma análise histórica dos efeitos produzidos por modificações antrópicas no estuário da Lagoa dos Patos – Natural versus Provocado**. In: FLORES, F.F.(ed). Por uma história multidisciplinar do Rio Grande. Edigraf FURG, Brasil. 97-105. 1999.

CALLIARI, L. J., MACHADO, A. A., MARROIG, P., VINZON, S., GIANUCA, N. Mud deposits at Cassino beach: role of dredging. **Geo-Marine Letters**, v. 40, n. 6, p. 1031-1043, 2020.

CALLIARI, L.J., SPERANSKI, N.S., TORRONTÉGUY, M., OLIVEIRA, M.B. The mud banks of Cassino beach, Southern Brazil: characteristics, processes and effects. **J. Coast. Res.** 29, 1–9. 2000.

CALLIARI, L.J., WINTERWERP, J.C., FERNANDES, E., CUCHIARA, D., VINZOND, S.B., SPERLEE, M., HOLLANDF, K.T. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. **Cont. Shelf Res.** 29, 515–529. 2009.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica de solos e suas**

**aplicações – Fundamentos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 1, 2015.

CARMAN, P. C. Constitution of colloidal silica. **Trans. Faraday Soc.**, 36, 964–972, 1940.

CID, J. F.; MAZARRÓN, F. R.; GUERRERO, I. C. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. **Informes de la construcción revista de información técnica**, v. 63, n. 523, p. 159-169. 2011.

CHAMPIRÉ, F., FABBRI, A., MOREL, J. C., WONG, H., MCGREGOR, F. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 70-78, 2016.

CHENG, X., CHEN, Y., CHEN, G., & LI, B. Characterization and prediction for the strength development of cement stabilized dredged sediment. **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 39, n. 9, p. 1015-1024, 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n 420, de 28 de dezembro de 2009**. Ano: 2009. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-ac.s.pdf> >.

CONAMA. **Resolução n 454, de 1 de novembro de 2012**. Ano: 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=693>>.

CONSOLI, N. C., FOPPA, D., FESTUGATO, L., HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197–205, 2007.

CONSOLI, N. C., SCHEUERMANN FILHO, H. C., LEON, H. B., DA SILVA CARRETTA, M., CORTE, M. B., CORDEIRO, R. E., ... & LOURENÇO, D. E. General relationships controlling loss of mass, stiffness and strength of sustainable binders amended sand. **Transportation Geotechnics**, v. 27, p. 100473, 2021.

CONSOLI, N. C., LEON, H. B., DA SILVA CARRETTA, M., DARONCO, J. V. L., & LOURENÇO, D. E. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. **Soils and Foundations**, 2019.

CONTI, M. **Durability, strength and stiffness of green stabilised sand**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. [S.l.]: **Fuel**, v. 84, 2005. 2048-2054 p.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymers cements. In: Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concretes. Kiev, Ukraine: **Scientific Research Institute on Binders and Materials**; p. 131–49, 1994.

DAVIDOVITS, J. **Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites**. SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center; p. 151–4., 1979.

DEJA, J., ULIASZ-BOCHENCZYK, A., MOKRZYCKI, E. CO<sub>2</sub> emissions from Polish cement industry. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 4, p. 583-588, 2010.

DELLA, V. P., KÜHN, I., HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agro-industriais: Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 2, p. 22-25, 2005.

DELLA, V. P., HOTZA, D., JUNKES, J. A., & OLIVEIRA, A. P. N. D. **Comparative study of silica obtained from acid leaching of rice husk and the silica obtained by thermal treatment of rice husk ash**. *Quimica Nova*, v. 29, n. 6, p. 1175-1179, 2006.

DERMATAS, D., DUTKO, P., BALORDA-BARONE, J., & MOON, D. H. Evaluation of engineering properties of cement treated Hudson River dredged sediments for reuse as fill material. **Journal of marine environmental engineering**, v. 7, n. 2, p. 101-124, 2003.

DE-ZOTTI, C. **Identificação de depósitos de lama fluida na antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil) utilizando métodos geofísicos e medições diretas**. Dissertação de mestrado em Oceanologia. Universidade Federal de Rio Grande. 2021.

DUARTE, E. M. M. B. **Plano de gerenciamento de resíduos sólidos do Porto do Rio Grande: proposta preliminar**. Rio Grande, 1997.

DU PLESSIS, C. **Agenda 21 for: Sustainable construction in developing countries-a discussion document**, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB; United Nations Environment Programme International Environmental

Technology Centre, UNEP-IETC. Petoria South Africa: International Environment Technology Centre, 2002.

DUXSON, P., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., MALLICOAT, S. W., KRIVEN, W. M., & VAN DEVENTER, J. S. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A. AND DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science, Advances in Geopolymer Science and Technology**. 42, p. 2917–2933, 2007.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Rankins Countries by commodity**. Ano: 2019. Disponível em: <[http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)>.

FEDERICO, A., VITONE, C., MURIANNI, A. On the mechanical behaviour of dredged submarine clayey sediments stabilized with lime or cement. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 12, p. 2030-2040, 2015.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A, CRIADO, M. Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. **Mater. Constr.** vol. 56, núm. 281, p. 51-65, 2006.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; SOBRADOS, I. AND SANZ, J. Structure of calcium silicate hydrate formed in alkaline activated slag: influence of the type of alkaline activator, **J. Am. Ceram. Soc.** 86, 1389–1394, 2003.

FERREIRA, F.; FREITAS, J.; LUCENA, A. **A lama na zona costeira da praia do cassino (rio grande/rs): o caso de dezembro de 2018**. Saindo da zona de conforto: a interdisciplinaridade das zonas costeiras. Rio de Janeiro: FGEL-UERJ, p. 87-98, 2019.

FLATT, R. J.; ROUSSEL, N.; CHEESEMAN, C. R. Concrete: an eco material that needs to be improved. **Journal European Ceramic Society**, [S.L.], v. 32, n. 11, p. 2787-2798, ago. 2012.

FOLETTTO, Edson Luiz et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 1055, 2005.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. In **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**; Pacheco-Torgal, F.; Labrincha, J.; Leonelli, C.; Palomo, A.; Chindaprasit, P.; Eds.; Elsevier: Cambridge, MA, USA; pp. 555–604, 2015.

GHADIR, P., RANJBAR, N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 361-371, 2018.

GLUKHOVSKY, V. D. **Soil silicates**, in Russian, Gosstroyizdat Publish., Kiev, 1959.

GOVRS – Governo Estadual do Rio Grande do Sul. **Com homologação do novo calado, porto do Rio Grande poderá receber os maiores navios do mundo**. 2020. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/com-homologacao-do-novo-calado-porto-do-rio-grande-podera-receber-os-maiores-navios-do-mundo>>.

GRANATO. **Subsídios técnicos para o estabelecimento de um plano de gerenciamento ambiental integrado do processo de dragagem do porto de Rio Grande – RS**. Dissertação de Mestrado. Rio Grande: FURG, 138p, 2005.

GRIM, R. E. Clay Mineralogy: The clay mineral composition of soils and clays is providing an understanding of their properties. **Science**, v. 135, n. 3507, p. 890-898, 1962.

HARTMANN, C. **Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos**. Tese de Doutorado em Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 363 p. 1996.

HERRIN, M. M. H. Lime-soil mixtures. In: **40th Annual Meeting of the Highway Research Board**. Washington DC, United States. 1961.

HERRIN, M.; MITCHELL, J. K. Lime – soil mixtures. **Highway Research Board Bulletin**, v. 304, p. 99 – 138, 1961.

HORPIBULSUK, S., PHETCHUAY, C., CHINKULKIJNIWAT, A., & CHOLAPHATSORN, A. Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash. **Soils and Foundations**, v. 53, n. 4, p. 477–486, 2013.

HUNTER, K., KIFFMEYER, D. **Earthbag building: The tools, tricks and techniques**. New society publishers, 2004.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal – PAM**.

Ano: 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=sobre>>.

ILER, R. K. **The Chemistry of Silica**, Wiley, New York, 1955.

ISOTTON, F. **A atividade portuária brasileira e a importância do porto concentrador**. Trabalho de conclusão de curso de Comércio Exterior do Centro de Ciências Sociais Aplicadas - Gestão da Universidade do Vale do Itajaí. 2009.

JOHN, V., SJÖSTRÖM, C., AGOPYAN, V. Durability in the built environment and sustainability in developing countries. **Building Research and Information: Special issue on Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries**, 2001.

KARLSSON R, HANSBO S. **Soil classification and identification**. Swedish Council Build Research, Stockholm. 1981.

KANG, G., TSUCHIDA, T., ATHAPATHTHU, A. M. R. G. Strength mobilization of cement-treated dredged clay during the early stages of curing. **Soils and Foundations**, v. 55, n. 2, p. 375-392, 2015.

KHOURY ASFORA, V. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2010.

KRIVENKO, P. In: Krivenko PV (ed) **Proceedings of the first international conference on alkaline cements, concretes**. VIPOL Stock Company, Kiev, Ukraine, pp 11– 129, 1994.

KUA, T. A., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S., DU, Y. J., SHEN, S. L. Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement utilizing slag and fly ash precursors. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 115, p. 565 575, 2016.

LEE, F. H., LEE, Y., CHEW, S. H., YONG, K. Y. Strength and modulus of marine clay-cement mixes. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 131, n. 2, p. 178-186, 2005.

LEITÃO, D., BARBOSA, E., SOARES, E., MIRANDA, T., CRISTELO, N., BRIGA-SÁ, A. Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkaliactivated fly ash. **Energy Build**. V. 139, p. 44-52, 2017.

LEON, H. B., DA SILVA CARRETTA, M., AZEVEDO, M. B., CONTI, M., & CONSOLI, N. C. Statistical analysis of the influence of curing time and temperature on compressive strength of sandy soil stabilized with sustainable binder. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 48, n. 3, 2020.

LIMA, F. T.; J., S. F.; THAUMATURGO, C. Xanes na borda-k do Si do sistema caulim-metaculim-geopolímero. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v. 24, n. 2, p. 90-92, 2005.

LOCAT, J., BÉRUBÉ, M., CHOQUETTE, M. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n. 3, p. 294-304, 1990.

LOTERO CAICEDO, A. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

MAHER, A., BENNERT, T., JAFARI, F., DOUGLAS, W. S., GUCUNSKI, N. Geotechnical properties of stabilized dredged material from New York-New Jersey Harbor. **Transportation research record**, v. 1874, n. 1, p. 86-96, 2004.

MALAGUTI, V. S. **Reuso de água e resíduos gerados pela lavagem de caminhões betoneiras: análise do efeito na resistência à compressão de concreto usinado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.

MARTINATTO, C. S. **O efeito do teor de umidade de compactação no comportamento de solo arenoso estabilizado com álcali ativação visando a pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2021.

MARTINS, L.R., MARTINS, I.R., VILLWOCK, J.A., CALLIARI, L.J., 1978. Ocorrência de lama na praia do Cassino, (RS). **An. Hidrográf.** 35, 159–170.

MCDOWELL, C. Stabilization of soils with lime, lime-fly ash and other lime reactive materials. **Highway Research Board Bulletin**, v. 231, n. 1, p. 60-66, 1959.

MEIRELLES, S. **Atenuação de ondas superficiais de gravidade sobre fundos lamosos: estudo de caso da praia do cassino, RS**. Dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica.

COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.

MITSUUCHI TASHIMA, M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS)**. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de València. 2012.

MINKE, G.T. **Manual de Construção em terra: Uma arquitetura sustentável**. 1ª ed. São Paulo: B4. 2015.

MIRLEAN, N.; CALLIARI, L.; JOHANNESSON, K. Dredging in an estuary causes contamination by fluid mud on a tourist ocean beach. Evidence via REE ratios. **Marine Pollution Bulletin**, v. 159, p. 111495, 2020.

MÖLLER JR., O. O. **Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30°S, Brésil): mesures et modélisation**. Tese de Doutorado. França, Universidade de Bordeaux 1, 204p. 1996.

MÖLLER, O. O.; FERNANDES, E.H.; MONTEIRO, I.O.; MARQUES, W.C. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Continental Shelf Research**, v.29, p. 556-571, 2009.

MÖLLER, O. O.; MARQUES, W.C.; FERNANDES, E. H. L.; MORAES, B. C.; MALCHEREK, A. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 1-22, 2010.

MÜLLER, C. J. **Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics**. 111 f. Tese (Doctor of Technical Science) – Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2005.

NEVES, C. M. M.; FARIA O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C.; HOFFMANN, M. V. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero-americana PROTERRA. 2010.

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

PACHECO-TORGAL, F., LABRINCHA, J. A., LEONELLI, C., PALOMO, A., CHINDAPRASIRT, P. **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. [S.l.: s.n.], p 830, 2014.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.; KOVALCHUK, G.; ORDOÑEZ, L. M.; NARANJO, M. C. OPC-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during alkaline hydration. **Journal of Materials Science**, 42, 2958-2966, 2007.

PALOMO, A; GRUTZECK, M W; BLANCO, M T. Alkali-activated fly ashes a cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1323–1329, 1999.

PHUMMIPHAN, I., HORPIBULSUK, S., SUKMAK, P., CHINKULKIJNIWAT, A., ARULRAJAH, A., SHEN, S. L. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. **Road Materials and Pavement Design**, v. 17, n. 4, p. 877–891, 2016.

PINTO, A T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 2004.

PINTO, C. S. **Curso Básico em Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos. 2002.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers, structure, processing, properties and industrial applications**. 1. ed. Great Abington: Woodhead Publishing Limited, 2009.

PUERTAS F. Cementos de escorias activadas alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro. **Materials and Construction**, 45, No. 239, 53–64, 1995.

PUERTAS, F.; MARTÍNEZ-RAMIREZ, S.; ALONSO, S. AND VÁZQUEZ, T. Alkaliactivated fly ash/slag cement: strength behaviour and hydration products. **Cem. Concr. Res.** 30, 1625–1632, 2000.

PUERTAS, F., PALACIOS, M., MANZANO, H., DOLADO, J. S., RICO, A., RODRÍGUEZ, J. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043-2056, 2011.

PULIDO, H. G., DE LA VARA S. R., GONZÁLEZ, P. G., MARTÍNEZ, C. T., PÉREZ, M. D. C. T. **Análisis y diseño de experimentos**. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.

RAJASEKARAN, G.; RAO, S. N. Lime stabilization technique for the improvement of marine clay. **Soils and foundations**, v. 37, n. 2, p. 97-104, 1997.

RAMASAMY, P., PERIATHAMBY, A., IBRAHIM, S. Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration. **Waste Management & Research**,

20(6), 536-540. 2002.

REIG, L., TASHIMA, M. M., BORRACHERO, M. V., MONZÓ, J., CHEESEMAN, C. R., PAYÁ, J. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 98-106, 2013.

REKIK, B., BOUTOUIL, M. Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio. **Geo-Marine Letters**, v. 29, n. 3, p. 171-179, 2009.

RENDÓN, M. B.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; MARTÍNEZ, M. M.; TORRES, A. C.; PÉREZ, J. T. Q. **Desarrollo de nuevos cementos: “Cementos alcalinos y cementos híbridos”**. Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Publicación técnica núm. 444 Sanfandila, Qro., 2015.

RIVERA, J. F., GUTIÉRREZ, R. M., RAMIREZ-BENAVIDES, S., OROBIO, A. Compressed and stabilized soil blocks with fly ash-based alkali-activated cements. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120285, 2020.

ROBAYO, R. A., MULFORD, A., MUNERA, J., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 163-169, 2016.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. Modification of clay soils using lime. In: **Proceedings of the institution of civil engineers – geotechnical engineering**. 1996.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. Lime Requirement for Stabilization. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, v. 1721, n. 1, p. 9 18, 2000.

RUIZ-SANTAQUITERIA C. **Materias primas alternativas para el desarrollo de nuevos cementos: activación alcalina de vidrios silico-aluminosos**. Tese de doutorado, Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica e Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, 2013.

SABBAG, P. Y. **Solo-Cimento: O Estudo da Retração e suas Implicações**. Dissertação de Mestrado. São Paulo - SP: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, 1980.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante, Cal de Carbureto e Cloreto de Sódio: Comportamento da Resistência à Compressão Simples, Durabilidade e Lixiviação em**

**Coluna.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2018.

SALDANHA, R. B., SCHEUERMANN FILHO, H. C., MALLMANN, J. E. C., CONSOLI, N. C., REDDY, K. R. Physical – Mineralogical – Chemical Characterization of Carbide Lime : An Environment-Friendly Chemical Additive for Soil Stabilization. **J. Mater. Civ. Eng**, v. 30, n. 6, p. 1–7, 2018.

SAMARA, M., LAFHAJ, Z., CHAPISEAU, C. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 2-3, p. 701-710, 2009.

SANTOS, C. P. **Estabilização de rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2021.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2019.

SECCO, M. P. **Estudo da Utilização de um Cimento Alcalino Híbrido para Estabilização de Base de Fundações Superficiais.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2020.

SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES. **Dragagem do Porto do Rio Grande.** Ano: 2018. Disponível em: <<https://transportes.rs.gov.br/dragagem-do-porto-do-rio-grande>>.

SECRETARIA DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES. **Porto do rio grande começa dragagem para 18 metros.** Ano: 2010. Disponível em: < <https://transportes.rs.gov.br/porto-do-rio-grande-comeca-dragagem-para-18-metros>>.

SERVI, S. P. **Comportamento mecânico de resíduo de minério de ferro estabilizado com agentes cimentantes.** Qualificação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2021.

SHERWOOD, P. T. Effect of sulfates on cement-and lime-stabilized soils. **Highway Research Board Bulletin**, n. 353, 1962.

SHERWOOD, P. T. The stabilization with cement of weathered and sulphate-bearing clays. **Geotechnique**, v. 7, n. 4, p. 179-191, 1957.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V; ROY, D. **Alkali-Activated Cements and Concretes**. New York: Taylor & Francis, 2006. v. 1, p. 1–388.

SIHAM, K., FABRICE, B., EDINE, A. N., PATRICK, D. Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. **Waste Management**, v. 28, n. 5, p. 919-928, 2008.

SILITONGA, E., LEVACHER, D., MEZAZIGH, S. Effects of the use of fly ash as a binder on the mechanical behaviour of treated dredged sediments. **Environmental technology**, v. 30, n. 8, p. 799-807, 2009.

SILITONGA, E., LEVACHER, D., MEZAZIGH, S. Utilization of fly ash for stabilization of marine dredged sediments. **European journal of environmental and civil engineering**, v. 14, n. 2, p. 253-265, 2010.

SILCCA. Apresentação e estudos. Ano: 2021. Disponível em : <[http://silcca.com.br/arquivos/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20Silcca\\_completa.pdf](http://silcca.com.br/arquivos/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20Silcca_completa.pdf)>.

SILVA, M. C. A. **Melhoramento de um solo argiloso com recurso à ativação alcalina de resíduos para aplicação em infraestruturas de transporte**. 2016. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Uniersidade do Minho, Portugal, 2016.

SILVA, R. A., SOARES, E., OLIVEIRA, D. V., MIRANDA, T., CRISTELO, N. M., & LEITÃO, D. Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 349-358, 2015.

SILVA, R. A. OLIVEIRA, D. V., MIRANDA, T., SOARES, E., CRISTELO, N., LOURENÇO, P. B. Caraterização do comportamento ao corte de alvenaria de blocos de terra compactada com junta seca. **Anais do 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental**. Aveiro, 15-17 Out., 2014.

SIMÕES, M. H. **Sistematização dos aspectos ambientais de dragagens portuárias marítimas no Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.

SOARES, E., SILVA, R. A. M., MIRANDA, T. F., OLIVEIRA, D. V., LEITÃO, D., CRISTELO, N., & OLIVEIRA, J. Desempenho mecânico de alvenaria de BTC estabilizados através da ativação alcalina de cinzas volantes. **Anais do Congresso Nacional de Geotecnia**,

2016.

SOFI, M., VAN DEVENTER, J. S. J., MENDIS, P. A., LUKEY, G. C. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 251–257, 2007

SOPESP – SINDICATO DOS OPERADODERS PORTUÁRIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Portos Brasileiros, 175 instalações portuárias de carga**. Ano: 2020. Disponível em: <<https://www.sopesp.com.br/2020/09/24/portos-brasileiros-175-instalacoes-portuarias-de-carga/>>.

SUMNER, M.E; NAIDU, R. **Sodic Soils: Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences**. Oxford University Press, New York, 149-172. 1998.

SUN, B., NOGUCHI, T., CAI, G., CHEN, Q. Prediction of early compressive strength of mortars at different curing temperature and relative humidity by a modified maturity method. **Structural Concrete**, v. 22, p. E732-E744, 2020.

SUN, B., NOGUCHI, T., CAI, G., ZHAO, W. Effect of temperature and relative humidity on the development of the compressive strength of surface-layer cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122626, 2021.

SUPERG - Superintendência dos Portos. **Porto do Rio Grande**. Ano: 2021. Disponível em: <<http://www.portosrs.com.br/site/index.php#>>.

TANG, Y. X.; MIYAZAKI, Y.; TSUCHIDA, T. Practices of reused dredgings by cement treatment. **Soils and Foundations**, v. 41, n. 5, p. 129-143, 2001.

TAYLOR, W. H.; ARMAN, A. Lime stabilization using preconditioned soils. **Highway Research Board Bulletin**, v. 262, p. 1-19, 1960.

TEIXEIRA, L. S. **Estudo das propriedades químicas dos rejeitos de dragagens para utilização como solo fabricado para fins agrícolas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. 2009.

THEODORO, S. H. (org.). **Mediação de conflitos socioambientais**. Rio de Janeiro: Garamond, 2005.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. **Revista Ingeniería**

**de Construcción. Santiago**, v.32, n. 2, pp 5-12, Aug. 2017.

TORRES, R. J. **Uma Análise Preliminar dos Processos de Dragagem do Porto de Rio Grande, RS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul. 179 p. 2000.

TRB. Lime stabilization – reactions properties, design and construction. **State of the Art Report 5**, n. 5, p. 1–64, 1987.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P.; BRICE, D. G. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials, **Waste Biomass Valor**, 1:145–155, 2010.

VILLWOCK, J.A., MARTINS, L.R.. Depósitos Lamíticos de Pós-Praia, Cassino - RS. **Pesquisas em Geociências** 1, 69–85. 1972.

WANG, D. X., ABRIAK, N. E., ZENTAR, R., XU, W. Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. **Environmental technology**, v. 33, n. 1, p. 95-101, 2012.

WILKINSON, A.; HAQUE, A.; KODIKARA, J. Stabilization of clayey soils with industrial by-products: part A. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement**, v. 163, n. 3, p. 149 163, 2010.

WREGE, M. S., COUTINHO, E. F., STEINMETZ, S., REISSER JUNIOR, C., DE ALMEIDA, I. R., MATZENAUER, R., RADIN, B. Zoneamento agroclimático para oliveira no Estado do Rio Grande do Sul. **Embrapa Clima Temperado-Documents (INFOTECA-E)**, 2009.

WYRZYKOWSKI, M.; LURA, P. Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 75-81, 2016.

YANG, K.-H., JUNG, Y.-B., CHO, M.-S., TAE, S.-H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete. **J. Clean. Prod.** 2014.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 59, n. 3, p. 247 266, 2000.

ZHANG, M., GUO, H., EL-KORCHI, T., ZHANG, G., TAO, M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. **Construction and Building**

**Materials**, [s. l.], v. 47, p. 1468 1478, 2013