

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estabilização alcalina de um solo granular com resíduo de telha
esmaltada e cal de carbureto ativados com silicato e hidróxido de
sódio**

Bruna Martins Lima

Porto Alegre
2022

BRUNA MARTINS LIMA

**ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE UM SOLO GRANULAR
COM RESÍDUO DE TELHA ESMALTADA E CAL DE
CARBURETO ATIVADOS COM SILICATO E HIDRÓXIDO
DE SÓDIO**

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 Mestra em
Engenharia.

Porto Alegre
2022

BRUNA MARTINS LIMA

**ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE UM SOLO GRANULAR
COM RESÍDUO DE TELHA ESMALTADA E CAL DE
CARBURETO ATIVADOS COM SILICATO E HIDRÓXIDO
DE SÓDIO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRA 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, 29 de março de 2022

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

Prof. Lucas Festugato
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. 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. Cezar Augusto Burkert Bastos (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Andres Mauricio Lotero Caicedo (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a Deus, minha família e ao meu amado Hewerton, agradecendo pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Não poderia iniciar os meus agradecimentos sem engrandecer o nome do meu Deus, que até aqui me ajudou, me fortaleceu e me sustentou. Tudo que há de bom neste trabalho é dEle e proveio dEle. A Ele rendo graças, a Ele entrego o meu louvor a gratidão por tudo que fez e tem feito na minha vida. Foi Ele quem me deu a vida e mais do que isso, me deu a Sua graça que me salvou. Obrigada Jesus!

Em seguimento agradeço aqueles a quem Deus me presenteou, para me ensinarem, me instruírem e serem responsáveis pela formação do meu caráter. Meus pais.

Mãe, obrigada pelo auxílio e apoio durante esses anos. Teu amor em forma de serviço, intencionado em tornar o ambiente mais confortável possível, não passaram em vão. Tu és uma fortaleza, uma guerreira, batalhadora a quem respeito e admiro. Agradeço a Jesus pelo privilégio de tê-la e não só isso, de ter me formado em teu ventre. Te amo mãezinha.

Pai, também te agradeço pelo apoio e auxílio durante estes anos. Teu amor em forma de palavras e conversas sempre atingiu fundo ao meu coração. Tu és a sensibilidade, o abraço que cativa e o sorriso necessário nos dias ruins. Agradeço a Jesus pelo privilégio de ter tido tua imagem durante a minha vida e além disso de te ter como meu pai. Te amo paizinho.

À minha irmã e meus avós, onde encerro os agradecimentos aos meus familiares, agradeço pelas orações e por tudo que são e significam pra mim. Nathália, te amo exageradamente, e te agradeço pelo apoio e parceria de uma vida inteira. Não poderia ter tido uma dupla melhor para dividir a vida, os sonhos e os amores. Vó Zilda, mulher de oração e de um coração puro e amável e em memória do meu Vô Afonso, homem de Deus, manso e amoroso. Agradeço a vocês pela presença assídua em minha vida e por tanto amor dado de graça. Te amo.

Como sempre, o cuidado de Deus, mais uma vez esteve comigo. Além da família de sangue na qual me presenteou, o Senhor me deu a oportunidade de iniciar a minha própria família com o amor da minha vida. Hewerton, não é fácil escrever pra você. Na verdade, faltam palavras para descrever o que tu representas pra mim. Agradeço a Deus cada segundo pela tua existência. Agradeço por tudo que Ele me entregou de presente com a tua chegada. Tu és aconchego e calma, tu és aquele que divide comigo, não só o “mesmo neurônio”, mas também os

propósitos, os objetivos, os sonhos, a música e o amor a Jesus. Obrigada por escolher ficar e diariamente se deixar ser o carinho de Cristo na minha vida. Do fundo da minha alma, te amo!

Agradeço também, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos que possibilitou minha total dedicação ao desenvolvimento desta pesquisa.

Além das minhas famílias citadas, Deus também colocou pessoas maravilhosas na minha vida que fizeram total diferença na minha trajetória. Agradeço aos meus orientadores Nilo e Lucas, pela atenção, paciência e aprendizado adquirido durante esses anos.

Agradeço às minhas queridas colegas Clara e Lisandra, por toda a parceria e apoio durante todo esse período. Foram horas e horas de estudo para cumprir as disciplinas, o que resultou em uma grande amizade.

Agradeço as minhas queridas amigas, Jessamine e Taline por todos os momentos divididos, tanto para tratar de assuntos relacionados à academia, como para falar sobre assuntos pessoais. Certamente Jesus me deu vocês de presente e quero levá-las para a vida toda. Amo vocês.

Aos meus queridos amigos do LEGG, agradeço em especial, à Mariana Tonini, por todo auxílio, dedicação e apoio durante este período. Foram horas de conversas, debates, ensinamentos e trocas. À Luana, Carol, Maiki, Helena e Guilherme, agradeço também por toda ajuda e apoio. Com toda a certeza levarei vocês no meu coração. Agradeço também ao João, que em uma conversa despreziosa foi usado pelo Espírito, para me chamar para a minha verdadeira missão de vida.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma estiveram comigo neste período, seja de forma presencial ou à distância, torcendo ou ajudando, para que o desenvolvimento desta pesquisa fosse possível. Muito obrigada!

Pois, quem quiser salvar a sua vida perdê-la-á;
mas quem perder a sua vida por amor de mim,
achá-la-á.

Mateus 16:25

RESUMO

Lima, M. B. 2022. **Estabilização alcalina de um solo com resíduo de telha esmaltada e cal de carbureto ativadas com silicato e hidróxido de sódio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

A produção de cimento para a construção civil libera quantidades excessivas de CO₂. No Brasil, são emitidos cerca de 800 kg de CO₂ por tonelada de cimento Portland produzido. Sendo assim, técnicas que colaboram com a sustentabilidade vêm sendo desenvolvidas por estudiosos, com a finalidade de reduzir as emissões de CO₂, mantendo a qualidade dos produtos finais. A álcali-ativação, por sua vez, têm sido uma alternativa que além de produzir novos ligantes, possibilita a utilização de resíduos industriais, com altos teores de sílica e alumina, na produção de materiais alternativos e funcionais. O setor de produção cerâmica no Brasil, produz cerca de 8,3 bilhões de peças cerâmicas ao mês, sendo também responsável pela produção de um intervalo entre 4 a 6,5 milhões de toneladas de resíduo ao ano. Esses resíduos são classificados como pozolânicos pela norma ABNT 12653:2015, possuindo propriedades favoráveis para utilização, como precursor, em materiais álcali ativados. Com a finalidade de aplicação em estabilização de solos, foram utilizados como precursores o resíduo de cerâmica vermelha e a cal de carbureto e como ativadores o silicato de sódio e o hidróxido de sódio, formando um ligante por reações pozolânicas em meio alcalino, utilizando o método de moldagem *one-part*. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, módulo de cisalhamento inicial, durabilidade, módulo de cisalhamento inicial entre os ciclos de durabilidade e simple shear. Os resultados demonstraram que os ligantes desenvolvidos para ambos os módulos de sílica, apresentam eficácia e são uma opção adequada ser utilizada para o melhoramento de solos. Além disso, o índice de porosidade/teor de ligante apresentou-se como um parâmetro eficaz para avaliação da estabilização do solo utilizado.

Palavras-chave: *Álcali ativação; Resíduo Cerâmico; Resíduo de Telha; One-Part; Estabilização de solos.*

ABSTRACT

Lima, M. B. 2022. **Estabilização alcalina de um solo com resíduo de telha esmaltada e cal de carbureto ativados com silicato de sódio e hidróxido de sódio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

The production of cement for civil construction releases excessive amounts of CO₂. In Brazil, around 800 kg of CO₂ are emitted per ton of Portland cement produced. Thus, techniques that collaborate with sustainability have been developed by scholars, with the aim of reducing CO₂ emissions, maintaining the quality of the final products. Alkali-activation, in turn, has been an alternative that, in addition to producing new binders, enables the use of industrial waste, with high levels of silica and alumina, in the production of alternative and functional materials. The ceramic production sector in Brazil produces about 8.3 billion ceramic pieces per month, being also responsible for the production of a range between 4 to 6.5 million tons of waste per year. These residues are classified as pozzolanic by the ABNT 12653:2015 standard, having favorable properties for use as a precursor in activated alkali materials. With the purpose of application in soil stabilization, red ceramic residue and carbide lime were used as precursors and sodium silicate and sodium hydroxide as activators, forming a binder by pozzolanic reactions in alkaline medium, using the method one-part molding. Simple compressive strength, initial shear modulus, durability, initial shear modulus between the durability cycles and simple shear were performed. The results showed that the binders developed for both silica modules are effective and are a suitable option to be used for soil improvement. In addition, the index porosity/binder content was shown to be an effective parameter for evaluating the stabilization of the soil used.

Key-words: *Alkali Activation; Ceramic Residue; Ceramic Tiles; One-Part; Soil Stabilization.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma da metodologia a ser utilizada na pesquisa (Elaborada pela autora, 2022).....	27
Figura 3.1 – Micrografia ótica do clínquer não hidratado (John <i>et al</i> , 1998).....	31
Figura 3.2 – Resultados de resistência à compressão simples das amostras aos 7 dias (Shoospasha e Shirvani, 2015).....	32
Figura 3.3 – Resultados de resistência à compressão simples de amostras 7,5% aos 7, 14 e 28 dias (Shoospasha e Shirvani, 2015).....	33
Figura 3.4 – Relação vazios/cimento ajustada (Consoli <i>et al.</i> , 2007).....	34
Figura 3.5 – Troca Catiônica na mistura Solo-Cal (Adaptado de Prusinski e Bhattacharja, 1999).....	36
Figura 3.6 – Flocculação e Aglomeração das partículas de argila (Adaptado de Prusinski e Bhattacharja, 1999).....	37
Figura 3.7 – Reações pozolânicas da mistura Solo- Cal (Adaptado de Prusinski e Bhattacharja, 1999).....	38
Figura 3.8 – Resistência à compressão não confinada de solos estabilizados com cal (Sujit e Monowar, 2012).....	38
Figura 3.9 – Relação vazios/cal ajustada (Consoli <i>et al.</i> , 2011).....	39
Figura 3.10 - Estruturas silico-aluminatos tridimensionais por Davidovits (1994).....	49
Figura 3.11 – Modelo teórico do mecanismo de reação com formação C-S-H (Adaptado de Pacheco-Torgal <i>et al.</i> , 2014).....	51
Figura 3.12 – Projeção tridimensional do gel N-A-S-H (Adaptado de Pacheco-Torgal <i>et al.</i> , 2014).....	52
Figura 3.13 – Elementos de um sistema de álcali-ativação (por Lotero Caiacedo, (2020) adaptado de Garcia <i>et al.</i> , 2015).....	53
Figura 3.14 – Método <i>one-part mix</i> (Adaptado de Wu <i>et al.</i> , 2021).....	57
Figura 3.15 - Resistência à compressão simples das pastas (a) 23 ± 2 °C; (b) 33 ± 2 °C (Adaptado de Lotero Caiacedo, 2020).....	58
Figura 4.1 – Amostras moldadas para o ensaio de resistência à compressão simples (Autora, 2022).....	67

Figura 4.2 – Ensaio de resistência à compressão simples (Autora, 2022).....	67
Figura 4.3 – Definições básicas da análise do <i>simple shear</i> (Corte, 2016).....	70
Figura 4.4 – Município de Osório/RS (Cruz, 2008).....	71
Figura 4.5 – Diagrama granulométrico Areia de Osório/RS (Adaptado de Silvano, 2020).....	72
Figura 4.6 – Diagrama granulométrico resíduo de telha esmaltada (RTE) (Elaborado pela autora, 2020).....	73
Figura 4.7 – Difratoograma do resíduo do RTE (Elaborado pela autora, 2022).....	75
Figura 4.8 – Diagrama granulométrico Cal de Carbureto (Adaptado de Silvano, 2020).....	76
Figura 4.9 – Difratoograma do resíduo do CC (Elaborado pela autora, 2022).....	77
Figura 4.10 - Ensaio de compactação Proctor (Elaborado pela autora, 2022).....	78
Figura 5.1 – Resultados médios de resistência à compressão simples (Elaborado pela autora, 2022).....	81
Figura 5.2 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados da resistência à compressão simples (Elaborado pela autora, 2022).....	82
Figura 5.3 – Gráfico de efeitos principais para variável resposta (Elaborado pela autora, 2022).....	83
Figura 5.4 – Gráfico de interação para variável resposta (Elaborado pela autora, 2022).....	84
Figura 5.5 – Resultados médios do módulo de cisalhamento inicial (Elaborado pela autora, 2022).....	85
Figura 5.6 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados do módulo de cisalhamento inicial (Elaborado pela autora, 2022).....	86
Figura 5.7 – Gráfico de Efeitos Principais para Variável Resposta (Elaborado pela autora, 2022).....	87
Figura 5.8 – Gráfico de Interação para Variável Resposta (Elaborado pela autora, 2022).....	88
Figura 5.9 – Perda de Massa Individual (PMI) (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela Autora, 2022).....	89

Figura 5.10 – Perda de Massa Acumulada (PMI) (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	91
Figura 5.11 – Amostras ao final dos 12 ciclos (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	92
Figura 5.12 – Módulo de Cisalhamento ao longo dos ciclos (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	93
Figura 5.13 – Relação entre a resistência à compressão simples e o η/B_{iv} (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	95
Figura 5.14 – Relação entre a resistência à compressão simples normalizada e o η/B_{iv} para ambos os tempos de cura (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	97
Figura 5.15 – Relação entre o módulo de cisalhamento inicial e o η/B_{iv} (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	98
Figura 5.16 – Relação entre o módulo de cisalhamento inicial normalizado e o η/B_{iv} para ambos os tempos de cura (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).....	100
Figura 5.17 - Resposta cisalhante monotônica sob 50 kPa de tensão vertical efetiva inicial (a) tensão cisalhante (τ) em relação a deformação cisalhante (γ), (b) tensão cisalhante (τ) em relação a tensão vertical efetiva (σ'_v), (c) variação de poropressão (Δu) e tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação a deformação cisalhante (γ) e (d) trajetória de tensão ($p' \times q$) (elaborado pela autora 2022).....	102
Figura 5.18 - Resposta cisalhante monotônica sob 100 kPa de tensão vertical efetiva inicial (a) tensão cisalhante (τ) em relação a deformação cisalhante (γ), (b) tensão cisalhante (τ) em relação a tensão vertical efetiva (σ'_v), (c) variação de poropressão (Δu) e tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação a deformação cisalhante (γ) e (d) trajetória de tensão ($p' \times q$) (elaborado pela autora 2022).....	103
Figura 5.19 - Resposta cisalhante monotônica com descarregamento sob 150 kPa de tensão vertical efetiva inicial (a) tensão cisalhante (τ) em relação a deformação cisalhante (γ), (b) tensão cisalhante (τ) em relação a tensão vertical efetiva (σ'_v), (c) variação de poropressão (Δu) e tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação a deformação cisalhante (γ) e (d) trajetória de tensão ($p' \times q$) (elaborado pela autora 2022).....	104
Figura 5.20 – Plano de ruptura das amostras submetidas ao ensaio <i>simple shear</i> com tensões efetivas iniciais de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa e (c) 150 kPa (Elaborado pela autora, 2022).....	105
Figura 5.21 – Resultados de tensão e deformação cisalhante para tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 (Elaborado pela autora, 2022).....	106

Figura 5.22 – Resultados de tensão cisalhante normalizada pela tensão vertical efetiva ao longo do ensaio em relação a deformação cisalhante para tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 (Elaborado pela autora, 2022).....	107
Figura 5.23 – Resultados de módulo cisalhante tangente em relação a deformação cisalhante para tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa (Elaborado pela autora, 2022).....	108
Figura 5.24 – Envoltórias de ruptura (a) desta pesquisa, elaborada pela autora, 2022; (b) pesquisa elaborada por Corte et al. 2019.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variáveis.....	62
Tabela 4.2 – Variáveis controláveis.....	63
Tabela 4.3 – Experimento Fatorial Completo 2 ⁴ ensaios de RCS e G0.....	63
Tabela 4.4 – Programa Experimental.....	65
Tabela 4.5 – Propriedades Físicas da Areia de Osório.....	72
Tabela 4.6 – Propriedades Físicas Do RTE.....	74
Tabela 4.7 – Composição química do RTE.....	74
Tabela 4.8 – Propriedades Físicas da CC.....	76
Tabela 4.9 – Composição química da CC.....	77
Tabela 4.10 – Propriedades do silicato de sódio.....	79
Tabela 5.1 – Tratamentos das amostras pelo projeto de experimentos.....	80
Tabela 5.2 – Dosagens ensaiadas.....	89
Tabela 5.3 – Perda de Massa Individual Média.....	90
Tabela 5.4 – Perda de Massa Acumulada.....	91
Tabela 5.5 – Parâmetros de resistência.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CC	Cal de carbureto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPC	Cimento Portland convencional
CP	Corpo de prova
DRX	Difração de raios X
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LEGG	Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
PMA	Perda de Massa Acumulada
PMI	Perda de Massa Individual
RCS	Resistência à Compressão Simples
RCV	Resíduo Cerâmico Vermelho
RTE	Resíduo de Telha Esmaltada

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
B _{iv}	Teor volumétrico de ligante
c'	Intercepto coesivo efetivo
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de Cálcio (Portlandita)
C _{iv}	Teor volumétrico de cimento
CO ₂	Dióxido de Carbono
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (Hematita)
G ₀	Módulo cisalhante inicial
G _s	Peso específico real dos grãos
K	Potássio
KOH	Hidróxido de potássio
L _{iv}	Teor volumétrico de cal
M	Grupo dos metais alcalinos
M _s	Módulo de Sílica
Na	Sódio
Na ₂ O	Concentração de álcalis
SiO ₂ /Na ₂ O	Relação Sílica Álcalis
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
qu	Resistência à compressão simples
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício (Quartzo)
tp	Onda de compressão

t_s	Onda de cisalhamento
$U_{\text{ótima}}$	Umidade ótima
V_c	Volume de cimento
V_p	Velocidade de compressão
V_s	Velocidade de cisalhamento
V_v	Volume de vazios
γ_d	Peso específico aparente seco
$\gamma_{d\text{max}}$	Peso específico aparente seco máximo
η	Porosidade
η/B_{iv}	Relação da porosidade e teor volumétrico de ligante
η/C_{iv}	Relação da porosidade e teor volumétrico de cimento
η/L_{iv}	Relação da porosidade e teor volumétrico de cal
φ'	Ângulo de atrito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	25
2.1 OBJETIVOS.....	25
2.1.1 Objetivos Gerais.....	25
2.1.2 Objetivos Específicos.....	25
2.2 PRESSUPOSTO.....	26
2.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	26
2.4 FLUXOGRAMA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	26
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.1 SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	28
3.2 MELHORAMENTO DE SOLOS.....	28
3.3 SOLO CIMENTADO	30
3.4 SOLO CAL	34
3.5 CERÂMICA.....	40
3.5.1 Contexto Histórico	40
3.5.2 Indústria da Cerâmica	41
3.5.2.1 Preparação da matéria prima.....	42
3.5.2.2 Preparação da massa	42
3.5.2.3 Formação das peças.....	43
3.5.2.4 Tratamento Térmico.....	43
3.5.2.5 Acabamento.....	44
3.5.2 Geração de Resíduos	44
3.6 ÁLCALI ATIVAÇÃO	45
3.6.1 Geopolímeros	47
3.6.1.1 Destruição - Coagulação	47
3.6.1.2 Coagulação - Condensação	48
3.6.1.3 Condensação - Cristalização	48

3.6.2 Produtos de Reação	49
3.6.3 Precursores	52
3.6.4 Ativadores	53
3.6.4.1 Hidróxido de Sódio	53
3.6.4.2 Silicato de Sódio.....	54
3.6.2.3 Hidróxido e Silicato de Sódio	54
3.6.2.4 Método de mistura das dosagens	56
3.6.5 Aplicação na Estabilização de Solos.....	57
3.6.5.1 Ativação alcalina de resíduos cerâmicos	57
4 MÉTODO DE PESQUISA	59
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
4.1.1 Projeto de Experimentos	59
4.1.1.1 Variáveis Fixadas	60
4.1.1.2 Variáveis controláveis.....	61
4.1.1.3 Tratamentos	62
4.2 METODOLOGIA	64
4.2.1 Procedimentos Experimentais.....	64
4.2.1.1 Ensaio de Fluorescência.....	64
4.2.1.2 Análise granulométrica	65
4.2.1.3 Massa Específica dos Grãos.....	66
4.2.1.4 Compactação	66
4.2.1.5 Resistência à compressão simples.....	66
4.2.1.6 Módulo de Cisalhamento (G ₀).....	67
4.2.1.7 Durabilidade	69
4.2.1.8 Simple Shear	69
4.3 MATERIAIS UTILIZADOS	71
4.3.1 Solo granular	71
4.3.2 Resíduo de Polimento Cerâmico.....	73
4.3.3 Cal de Carbureto.....	75

4.3.4 Compactação	77
4.3.5 Hidróxido de Sódio	78
4.3.6 Silicato de Sódio.....	79
4.3.7 Água	79
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	81
5.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO INICIAL (G_0)	84
5.3 DURABILIDADE.....	88
5.4 MÓDULO DE CISALHAMENTO INICIAL AO LONGO DOS CICLOS DE DURABILIDADE.....	92
5.5 RELAÇÕES COM O ÍNDICE H/B_{IV}	94
5.5.1 Resistência à compressão simples.....	94
5.5.2 Módulo de Cisalhamento Inicial	97
5.6 SIMPLE SHEAR.....	101
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS.....	115

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de melhoramento de solos, têm se tornado cada vez mais comuns, em construções onde as propriedades dos solos não são compatíveis com as necessidades de projeto. A aplicação destas técnicas visa modificar propriedades, parâmetros de resistência e compressibilidade com a finalidade de conferir ao solo maior resistência ao cisalhamento, redução de possíveis recalques, aumento da capacidade de suporte, aumentar a resistência ao fenômeno de liquefação, controlar a variação de volume, entre outras finalidades (MUNFAKH, 1997; KIRSCH e MOSELEY, 2004; GAAFER *et al.*, 2015; NICHOLSON, 2015).

A estabilização química de solos, consiste no tratamento de um solo com a utilização de compostos químicos, que reagem modificando as propriedades do solo. A utilização de agentes cimentantes neste processo, adicionando teores de um material ligante em uma massa de solo, modifica a estrutura do solo e conseqüentemente atribui maior resistência, menor permeabilidade e compressibilidade que o solo natural (CHU *et al.*, 2009).

O ligante mais utilizado no setor da construção civil é o cimento Portland, sendo utilizado por apresentar excelentes propriedades no estado endurecido, propriedades mecânicas bem definidas, durabilidade e custo benefício relativamente baixo (GAAFER *et al.*, 2015; MAS *et al.*, 2015).

Entretanto, a produção do cimento Portland possui problemáticas ambientais, por conta das altas emissões de CO₂ provenientes do âmbito fabril do cimento, totalizando em valores que variam entre 800 a 880 kg de CO₂/t de cimento Portland produzidos no Brasil (NWEKE, 2017; LIMA, 2010). Segundo Meyer (2009), as empresas do ramo cimentício são responsáveis por uma estimativa de 6 à 7% da emissão de dióxido de carbono por ano no planeta inteiro, totalizando 2 bilhões de toneladas deste gás.

Para reduzir a emissão de CO₂ e contribuir com a redução de energia necessária para a produção de cimento Portland, resíduos de construção e demolição podem ser utilizados como substitutos do cimento Portland, servindo como uma metodologia eficaz e alternativa na contribuição de práticas sustentáveis (PUERTAS *et al.*, 2008).

A ativação alcalina tem sido estudada como alternativa de redução da utilização do cimento na estabilização de solos. Esta técnica utiliza um precursor rico em silício e alumínio e um ativador alcalino para catalisar reações pozolânicas produzindo géis semelhantes aos produzidos pelo cimento Portland, que posteriormente solidificam e atribuem resistência ao material (KRINVEKO, 2017).

Além da redução do consumo de cimento, por ser uma alternativa utilizada para produzir novos ligantes, esta técnica possibilita a aplicação de resíduos industriais com características pozolânicas como precursores. A norma brasileira ABNT 12653:2015 caracteriza como pozolânicos os materiais que possuem quantidades silício e alumínio na composição química, que quando somados correspondem a quantitativos superiores a 70% do material (TORRES-CARRASCO e PUERTAS, 2017; BEHNOOD, 2018).

Autores, como MME, 2009 e BRASIL, 2010, afirmam que o índice de resíduos gerados nas etapas posteriores a queima das peças cerâmicas varia em um intervalo de 5 e 20%, dependendo dos métodos industriais utilizados, sendo eles menos ou mais modernos. Segundo o SEBRAE (2008), a média da geração de resíduos do setor é de 14% do total produzido em um ano. Lotero Caicedo (2020) afirma que, anualmente, a estimativa de perdas no processo produtivo é de aproximadamente 7,1 bilhões de peças ao ano, resultando em 14 mil toneladas de resíduo gerado.

A utilização deste resíduo foi estudada na substituição parcial de cimento em argamassas, na produção de geopolímeros e na estabilização de solos, apresentando resultados satisfatórios e superiores aos dos corpos de prova de referência. Isso se deve ao fato de que as propriedades deste material em meio alcalino favorecem as ocorrências das reações pozolânicas, atribuindo resistência ao material ao longo do tempo (LI *et al.*, 2019; RAMOS, 2017; ARAÚJO, 2016; BEHNOOD, 2018).

Nesta pesquisa, o resíduo de telha esmaltada e a cal de carbureto serão utilizados como precursores, sendo álcali ativado por ativadores de base alcalina forte de silicato de sódio e hidróxido de sódio, com a finalidade de gerar reações pozolânicas para a produção de um ligante álcali ativo que será utilizado na estabilização um material granular. Com os resultados destes ensaios serão realizadas análises para entender o comportamento destes materiais em diferentes condições.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Neste capítulo serão apresentadas as diretrizes da pesquisa para o seu desenvolvimento.

2.1 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa serão subdivididos em dois tópicos, descrevendo inicialmente os objetivos gerais e em seguida descrevendo os objetivos específicos referentes ao desenvolvimento da pesquisa.

2.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência da aplicação de um ligante álcali-ativado a partir do resíduo de telha esmaltada com adição de cal de carbureto, ativados com hidróxido de sódio e silicato de sódio em diferentes módulos de sílica, na estabilização de um solo granular pelo método *one-part*, para aplicação em melhoramento de solos e pavimentação.

2.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa foram estabelecidos os seguintes pontos:

- Avaliar a variação de comportamento mecânico frente a diferentes módulos de sílica e a influência deste fator controlável.
- Estudar o comportamento mecânico do solo estabilizado com diferentes teores de ligante, pesos específicos aparente secos e tempos de cura pelos ensaios de resistência à compressão, rigidez e durabilidade.
- Analisar a eficácia e aplicabilidade do método de moldagem *one-part* para a faixa de pesquisa estudada.
- Avaliar os parâmetros de resistência e o comportamento do material em condições planas de deformação.

- Prever do comportamento mecânico das dosagens estabelecidas através do parâmetro η/B_{iv} .
- Avaliar o efeito e influência das variáveis controláveis por meio de análises estatísticas.

2.2 PRESSUPOSTO

Esta pesquisa tem como pressuposto utilizar ativadores altamente alcalinos, sendo neste caso estabelecido o uso do hidróxido de sódio (NaOH) e do silicato de sódio (Na₂SiO₃), com a finalidade de catalisar reações pozolânicas. Busca-se a formação de um ligante álcali ativado que confere influência no ganho de resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade de uma mistura de solo de origem sedimentar eólica proveniente do município de Osório/RS, caracterizado como arenoso fino, resíduo de telha esmaltada, proveniente da produção fabril e cal de carbureto, pelo método *one-part*.

2.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa delimita-se a um projeto experimental com quatro fatores controláveis que consistem em dosagens que variam o módulo de sílica, o teor de ligante, peso específico aparente seco e tempo de cura. As amostras foram curadas a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e nas idades estabelecidas foram submetidas a ensaios laboratoriais e posteriores análises.

2.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Na Figura 2.1, pode-se observar o fluxograma relacionado à organização de dissertação e às etapas em que a pesquisa foi desenvolvida.

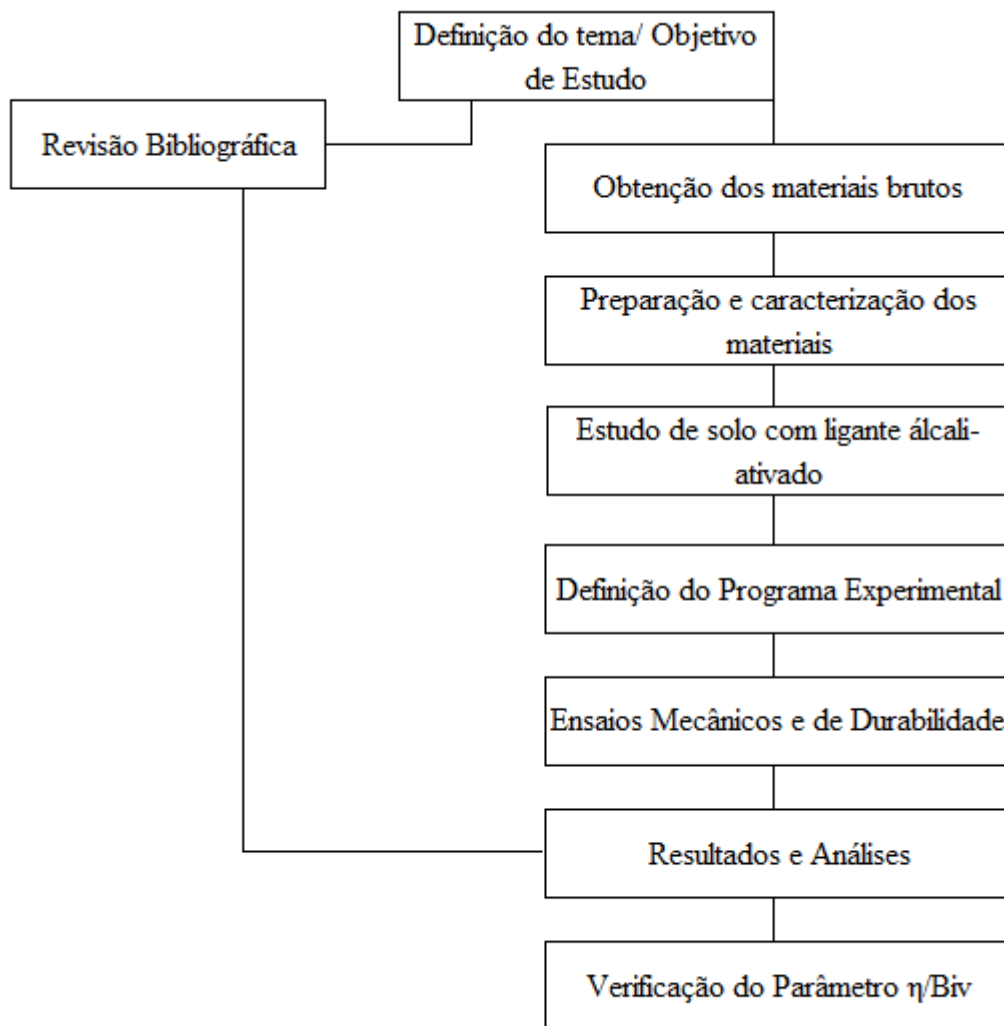


Figura 2.1 – Fluxograma da metodologia a ser utilizada na pesquisa (Elaborada pela autora, 2022).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

O solo é o material de construção mais abundantemente disponível natureza. Basicamente formado por água, sólidos e gases, é constituído através do processo de deterioração de rochas causado pelo intemperismo, que é determinado pela ação do tempo envolvendo processos químicos e/ou mecânicos, modificando a composição físico-química destes materiais.

Existem diferentes tipos que solos, os quais apresentam diversas características geomecânicas. O comportamento de materiais geotécnicos varia de acordo com algumas condições. De acordo com Lambe e Whitman (1969), este comportamento varia em função do formato dos grãos, tamanho e arranjo das partículas, granulometria, compactidade dos solos, saturação, mineralogia, dentre outras propriedades.

Os solos granulares são materiais não coesivos e não plásticos, cuja resistência ao cisalhamento se dá de forma friccional, correspondendo ao atrito ocasionado pelo deslizamento intergranular. De acordo com a NBR 6502 (ABTN, 2016), que apresenta definições para solos e rochas, o intervalo de diâmetros que compreendem a definição de material granular é de 0,06mm e 60mm. Podendo, dentro deste intervalo, serem subdivididos em: areia fina (0,06mm à 0,2mm), areia média (0,2mm à 0,6mm), areia grossa (0,6mm à 2,0mm), pedregulho fino (2,0mm à 6,0mm), pedregulho médio (6,0mm à 20mm) e pedregulho grosso (20mm à 60mm).

3.2 MELHORAMENTO DE SOLOS

Segundo Nicholson (2015), um solo pode ser considerado inadequado para determinados requisitos de projetos, por não apresentar as propriedades mínimas de engenharia exigidas e/ou fornecer resultados de desempenho inadequado em comparação às necessidades de projeto, determinados a partir de avaliações técnicas.

Com isto, Ingles e Metcalf (1972) abordam três diferentes alternativas para solucionar esta problemática, sendo elas: (i) a substituição do material de baixa resistência por um material de melhor desempenho; (ii) a adaptação do projeto ao material existente; (iii) e/ou a alteração das propriedades do material. Consoli, *et al* (2007), por sua vez, afirma que, na maioria das vezes,

é economicamente inviável a substituição do solo de baixo desempenho por um material mais resistente, ou até mesmo a adaptação do projeto às propriedades do solo. Isso, porque as jazidas dos materiais de substituição podem estar alocadas a longas distâncias, o que aumentaria o custo da obra em função do transporte em larga escala. Já a adaptação do projeto, levaria a um aumento econômico considerável na execução da obra, visto que as propriedades do solo implicam diretamente no dimensionamento dos elementos de fundação de uma edificação, por exemplo. Sendo assim, o melhoramento de solos implica diretamente na alteração das propriedades de um material geotécnico, visando a geração de um material de melhor desempenho, que possa ser utilizado na solução de problemas de engenharia (INGLES e METCALF, 1972).

A aplicação destas técnicas em campo impacta diretamente no comportamento geotécnico dos materiais, melhorando dentre as propriedades mais significativas: a resistência, o módulo de cisalhamento, a durabilidade e a permeabilidade. Segundo alguns autores (KIRSCH e MOSELEY, 2004; GAAFER *et al*, 2015; NICHOLSON, 2015; MUNFAKH 1997a), a alteração destas propriedades pode:

- Evitar problemas de estabilidade com o aumento da densidade e da resistência ao cisalhamento do solo;
- Pode reduzir a compressibilidade que influencia diretamente na redução da permeabilidade e no maior controle do fluxo de água;
- Reduzir as quantidades excessivas de assentamentos;
- Melhorar a homogeneidade do solo e aumentar a capacidade de suporte do material;
- Transferir carregamentos para camadas de solo mais resistentes;
- Aumentar a resistência à liquefação e prover resistência lateral.

De acordo com Mitchel (1981, *apud* CHU, 2009), baseadas nos principais métodos existentes, as técnicas para melhoramento de solos podem ser classificadas em 6 diferentes categorias, sendo elas: (1) compactação *in situ*; (2) sobrecarga; (3) injeções e grauteamento; (4) estabilização química por misturas; (5) tratamento térmico; (6) reforço.

3.3 SOLO CIMENTADO

A estabilização de solos por mistura objetiva o tratamento do solo com a adição de compostos químicos, afim de melhorar as suas propriedades. Esta técnica consiste na mistura de duas ou mais soluções que reagem quimicamente nos espaços vazios do solo, ocasionando a liberação de géis, que posteriormente aumentam a resistência e reduzem a permeabilidade do solo (CHU *et al*, 2009).

O melhoramento de solos com adição de teores de cimento, iniciado no ano de 1960, tornou-se uma técnica muito comum, utilizada para alteração dos valores de resistência ao cisalhamento e para a redução da compressibilidade dos materiais geotécnicos (GAAFER *et al*, 2015). Desta forma, esta técnica se tornou atrativa em casos onde é necessário o melhoramento do solo local para o desenvolvimento de um determinado projeto. Sua aplicação pode ser utilizada para finalidades de melhoramento de base e sub-base de pavimentos flexíveis, bases de fundações diretas, entre outras finalidades (ABCP, 2019).

De acordo com María *et al* (2015), o cimento Portland é o ligante dominante no setor da construção civil, sendo utilizado para diversas finalidades por conta das excelentes propriedades mecânicas, durabilidade e custo relativamente baixo. As propriedades dos solos estabilizados com cimento, dependem diretamente da dosagem da mistura, da quantidade de água incorporada na mistura, da energia de compactação exercida, da porosidade do solo melhorado, da distribuição granulométrica e forma dos grãos e da mineralogia (CLOUGH, 1981; LOTERO CAICEDO, 2020).

De forma mais comum, misturas de solo com teores de cimento Portland são frequentemente utilizadas na construção civil, com finalidade de aplicação no melhoramento de solos por meio de *jet grouting*, *deep soil mixing* e *compaction grouting*, entre outras possibilidades (INDRARATNA e CHU, 2005).

Prusinski e Bhattacharja (1999) explicam que o cimento Portland é composto basicamente por frações finas de clínquer e gesso. Segundo os autores, o clínquer é um material composto por quatro fases majoritárias de óxido, sendo elas: silicato de dicálcio, mais conhecido como belita (C₂S), silicato de tricálcio, comumente chamado de alita (C₃S), aluminato de tricálcio (C₃A) e aluminoferrito de tetracálcio (C₄AF) como pode-se observar na Figura 3.1.

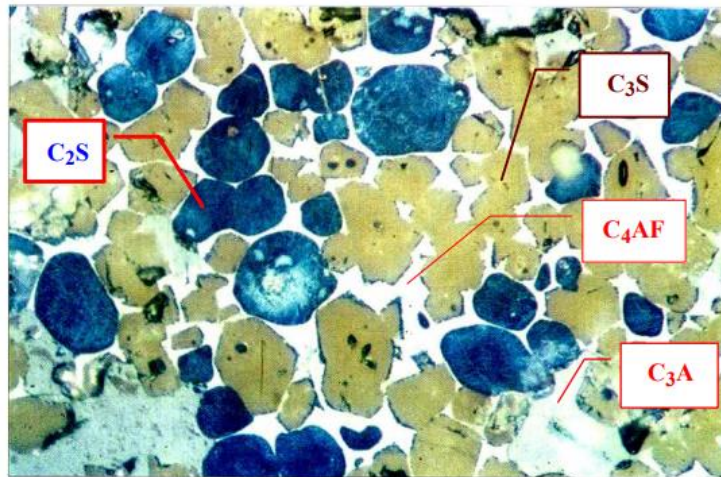
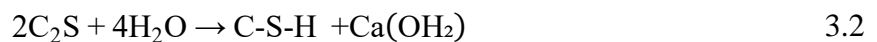


Figura 3.1 – Micrografia ótica do clínquer não hidratado (John *et al*, 1998).

As fases correspondentes aos silicatos de cálcio são as mais importantes no processo de estabilização dos solos, reagindo na presença de água (H₂O) e liberando géis de silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) como resultado das reações químicas das Equações (3.1) e (3.2).



A quantidade de Portlandita (Ca(OH)₂), liberada na hidratação dos silicatos e da cal livre, é responsável pela alcalinidade da mistura. O pH resultante se mantém em torno de 12,5 em argamassas e concretos, corroborando para reações pozolânicas no ambiente alcalino quando há presença de argilominerais (MAKUSA, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 1994; PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999).

A mistura de solo-cimento para materiais granulares confere ao material uma resistência não confinada em função das ligações cimentícias geradas pelo teor de cimento nos contatos intergranulares. Em solos argilosos, esta técnica altera a textura da partícula de argila pelos

fenômenos de floculação e aglomeração, tornando o formato inicialmente lamelar, em um formato próximo ao granular (LIMA *et al.* 1993).

O parâmetro utilizado para validar os resultados da estabilização de solos com teores cimento é a resistência à compressão simples aos 7 dias. A utilização desta técnica aponta melhorias na estabilização dos solos, apresentando redução de valor de índice de plasticidade, aumento da durabilidade, aumento da resistência ao cisalhamento e redução de compressibilidade do material (NCHRP, 2009; USACE 1984, 1994).

Shoospasha e Shirvani (2015) estudaram o efeito da estabilização de solos granulares com cimento, utilizando três diferentes teores (2,5%, 5% e 7,5%). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para um período de cura de 7 dias, podem ser observados na Figura 3.2.

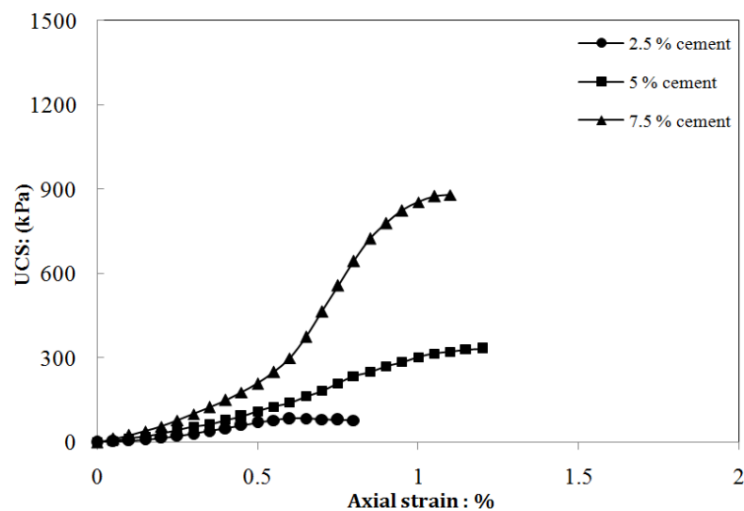


Figura 3.2 – Resultados de resistência à compressão simples das amostras aos 7 dias (Shoospasha e Shirvani, 2015).

A partir dos resultados da Figura 3.2, os autores observaram que a amostra com teor de cimento de 7,5% apresentou cerca de 900 kPa de resistência, obtendo o melhor resultado em comparação as outras amostras, tendo a dosagem de 5% de teor de cimento uma resistência pouco superior à 300 kPa e a dosagem com teor de 3% cerca de 150 kPa. Sendo assim, concluindo que quando maior o teor de cimento utilizado nas dosagens, maior a resistência à compressão simples obtida. Em seguimento os autores, estudaram a influência do tempo de cura na resistência nas dosagens, realizando ensaios de resistência à compressão nas amostras aos 7, 14 e 28 dias. Os

resultados obtidos para a dosagem com teor de 7,5% podem ser analisados a partir da Figura 3.3.

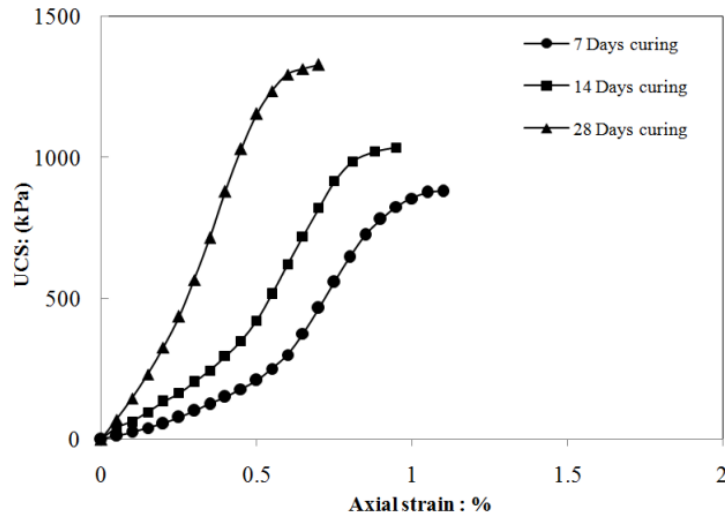


Figura 3.3 – Resultados de resistência à compressão simples de amostras 7,5% aos 7, 14 e 28 dias (Shoospasha e Shirvani, 2015).

Com os resultados da Figura 3.3, os autores perceberam que o tempo de cura influenciou diretamente no aumento da resistência das amostras, reduzindo também as deformações axiais na ruptura. Entretanto, o período de cura obteve maior impacto nas dosagens com maiores teores de cimento, que apresentaram as maiores resistências, menores deformações axiais na ruptura e aumentos consideráveis no módulo de elasticidade. Além disso, os parâmetros de resistência do material aumentaram, com os maiores teores de cimento, porém, após a resistência de pico, o material apresentou resistências semelhantes ao material não cimentado, o que se deve ao fato da ocorrência da quebra das pontes cimentantes geradas pelo teor de cimento existente na mistura.

Consoli *et al.* (2007), desenvolveram uma metodologia para quantificar a influência do teor de cimento, porosidade e teor de umidade da resistência não confinada de solos granulares cimentados, de forma semelhante aos parâmetros de relação água/cimento na resistência do concreto. Os autores perceberam que o aumento no teor de cimento aumenta a resistência do material de forma linear, e que a redução da porosidade também aumenta a resistência, entretanto, de forma exponencial. Sendo assim, concluíram que o teor de cimento e o peso específico aparente seco influenciam fortemente na resistência à compressão simples do solo. Com isso, concluíram que a relação vazios/cimento, que compreende a relação entre a

porosidade do material compactado e o conteúdo volumétrico de cimento, denominado $(\eta/C_{iv})^{\text{expoente}}$, se mostrou um parâmetro adequado para a avaliação da resistência à compressão não confinada destes materiais. A Figura 3.4 apresenta os resultados dos ensaios, juntamente à curva ajustada em um expoente de 0,28 $((\eta/C_{iv})^{0,28})$.

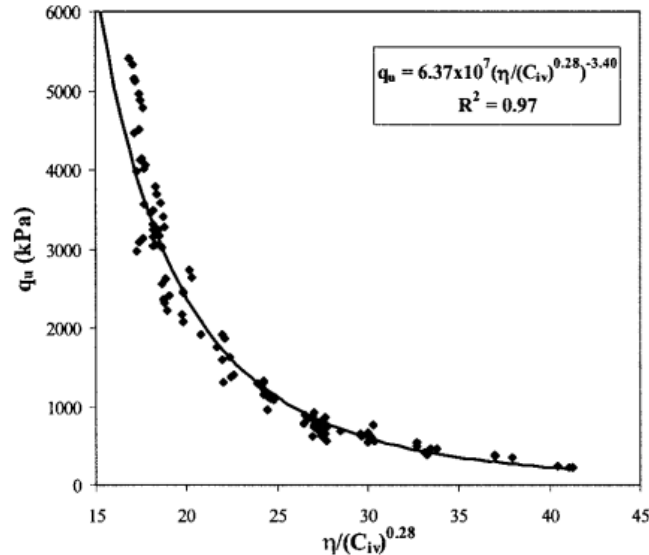


Figura 3.4 – Relação vazios/cimento ajustada (Consoli *et al.*, 2007).

3.4 SOLO CAL

A estabilização de solos com cal é indicada para materiais de fração fina, cujo comportamento se dá como um solo de alta plasticidade, alta compressibilidade e com alto potencial de expansão. De forma geral, a utilização da cal em processos de estabilização de solos confere um melhoramento das propriedades do material, melhorando os parâmetros de resistência e parâmetros de compressibilidade, reduzindo as deformações volumétricas que envolvem potenciais expansivos e contráteis, reduzindo a permeabilidade e o índice de plasticidade, melhorando a rigidez e o módulo de elasticidade (AKPOKODJE, 1985; DIAMONT e KINTER, 1965 *apud* LOTERO CAICEDO, 2020).

A obtenção de uma cal com maiores conteúdos de cal livre, que beneficia e aumenta a quantidade de reações, geralmente ocorre por meio de procedimentos térmicos realizados no carbonato de cálcio (CaCO_3). Entretanto, a cal podendo ser obtida em outras formas, as quais compõem o ciclo da cal (LOTETO CAICEDO, 2020).

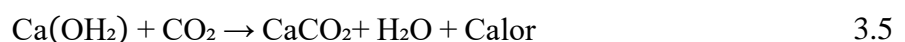
O ciclo da cal, basicamente, é a transformação química da cal quando submetida à determinada condição, seja ela calor, presença de água ou contato com o ar. Inicialmente, no formato de carbonato de cálcio (CaCO_3), o material passa por um processo de calcinação, onde é realizado um tratamento térmico. Como resultado, ocorre a descarbonização, onde o material reage com o calor, liberando moléculas de dióxido de carbono (CO_2), formando o óxido de cálcio (CaO), mais conhecido como cal virgem, como pode ser observado na Equação (3.3) (GUIMARÃES, 1998).



Na forma do óxido de cálcio (CaO), a cal reage diretamente com a presença de água por meio da hidratação. A reação da mistura tem característica exotérmica, transformando os óxidos em dióxidos, liberando calor. Por meio desta reação, representada pela Equação (3.4), obtém-se o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), mais conhecido como cal hidratada (WHITMAN e DAVIS, 1926; GUIMARÃES, 1998).



Finalizando o ciclo, a cal em forma de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) reage em contato com o ar. Assim, sofre o processo de carbonatação, que ocorre pela recarbonização, quando o Ca(OH)_2 reage com o CO_2 disponível no ar, liberando moléculas de água (H_2O) e calor, gerando novamente moléculas de carbonato de cálcio (CaCO_3), como representado na Equação (3.5) (GUIMARÃES, 1998).



Segundo Castro (1995), a mistura proveniente de um solo fino com adição de cal sofre reações químicas na presença de água, produzindo um material cimentício em duas diferentes etapas, compondo uma etapa rápida onde as reações ocorrem em intervalos de horas ou dias, e uma etapa mais lenta que pode levar de meses ou até anos. Alguns autores (NICHOLSON, 2015; LOPES JUNIOR, 2011), dividem estas etapas, em cinco diferentes processos: (i) hidratação, (ii) troca catiônica, (iii) floculação-aglomeração, (iv) reações pozolânicas e (v) potencial de carbonatação (única possível reação prejudicial).

Os três processos iniciais, compõem a etapa rápida das reações. Quando a cal hidratada é utilizada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), inicialmente ocorre o processo de hidratação, que se dá na presença de água (H_2O), onde ocorre a dissociação iônica em cátions de cálcio (Ca^{2+}) e ânions hidroxila (2OH^-). É nesse momento que se inicia a troca catiônica, onde os íons liberados na mistura reagem com os elementos existentes na composição mineralógica do solo, como pode ser observado na Figura 3.5. Os ânions hidroxila elevam o pH da mistura tornando o meio básico, favorecendo a dissolução dos compostos químicos de óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) presentes na composição de solos argilosos. (PRUSINSKI e BHATTACHARJA, 1999; ZHAO *et al*, 2014; VAN BALEN, 2003; SARGENT, 2015).

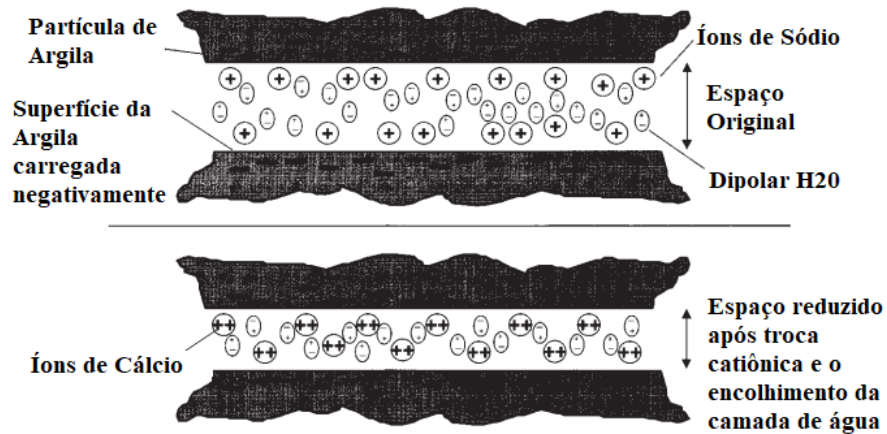


Figura 3.5 – Troca Catiônica na mistura Solo-Cal (Adaptado de Prusinski e Bhattacharja, 1999).

O efeito da floculação e aglomeração pode ser observado na Figura 3.6, onde pelas reações que ocorrem no meio básico, é reduzida a espessura da dupla difusa de água adsorvida na superfície do argilomineral, aglomerando as partículas e modificando a granulometria do solo, o que confere à partícula uma textura mais próxima ao formato granular, aumentando a resistência e permeabilidade e reduzindo a plasticidade e compressibilidade do solo (OSULA 1991, 1996; NEGI *et al*, 2013; LOTERO CAICEDO, 2020; ZHAO *et al*, 2014).

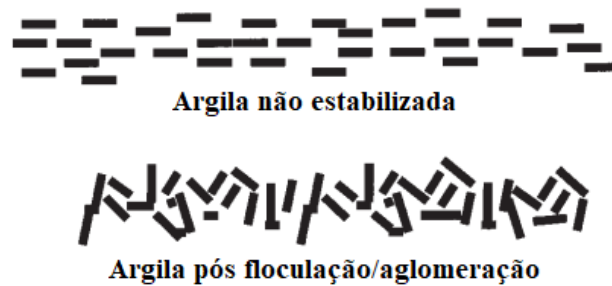
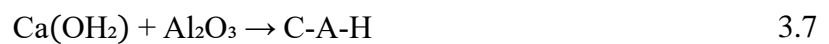
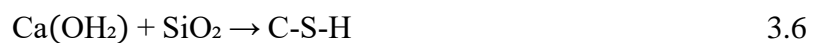


Figura 3.6 – Floculação e Aglomeração das partículas de argila (Adaptado de Prusinski e Bhattacharja, 1999).

Negi *et al* (2013) afirmam que, com o pH da mistura elevado, o argilomineral existente na mistura libera sílica e alumina, que reagindo com os cátions de cálcio, sofrem as chamadas reações pozolânicas, formando géis de silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH), como representado pelas Equações (3.6 e 3.7) e apresentado na Figura (3.7).



Prusinski e Bhattacharja (1999) explicam que os géis formados a partir das reações pozolânicas, são produtos semelhantes aos géis formados pela reação do cimento Portland, podendo elevar a resistência do material a longo prazo, bem como reduzir a plasticidade e torná-lo mais próximo ao formato granular.

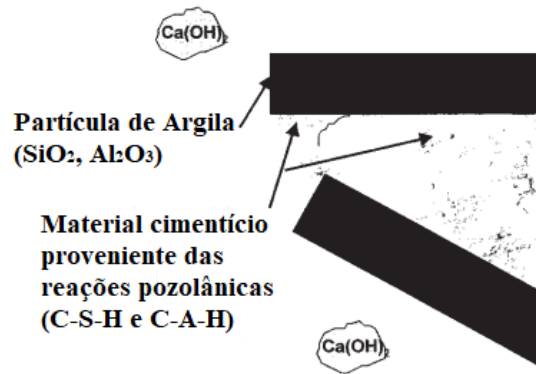


Figura 3.7 – Reações pozolânicas da mistura Solo- Cal (Adaptado de Prusinski e Bhattacharja, 1999).

Por fim, o potencial de carbonatação que pode ser desencadeado deste tipo de mistura, provém da reação da cal hidratada (Ca(OH)_2) em contato com o ar. Esta reação faz com que o material absorva moléculas de CO_2 , formando carbonatos de cálcio (CaCO_3) e liberando moléculas de água, como acontece na fase de recarbonização no ciclo da cal. Isso, reduz a alcalinidade da mistura, retirando cátions de cálcio adsorvidos no argilomineral para reagir com as moléculas de CO_2 , o que prejudica as reações pozolânicas, formando um material frágil e de baixa durabilidade (AZEVEDO, 2010).

Sujit e Monowar (2012) realizaram estudos referentes a estabilização de solos com cal. Os autores analisaram seis diferentes tipos de amostras, com misturas de solos expansivos e residuais em diferentes dosagens. Estes materiais foram estabilizados com teores de 0%, 1%, 3%, 5%, 9% e 13% de cal em períodos de cura de 3, 7, 21 e 28 dias. Os resultados podem ser observados na Figura 3.8.

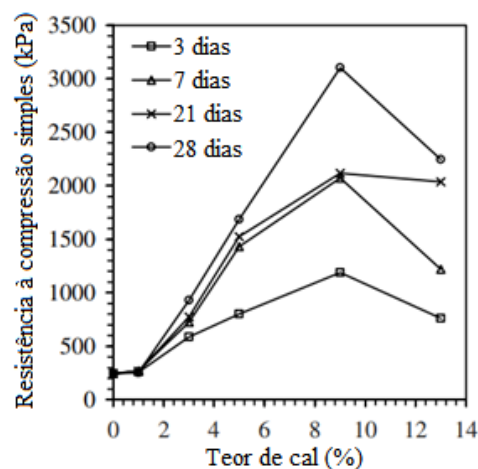


Figura 3.8 – Resistência à compressão não confinada de solos estabilizados com cal (Adaptado de Sujit e Monowar, 2012).

Os autores concluíram que, com o aumento do teor de cal, as reações pozolânicas alcançam um pico, produzindo materiais cimentantes, que quando solidificados, aumentam a resistência do material estabilizado. Observa-se que o material estabilizado com um teor de 9% de cal aos 28 dias apresentou uma resistência maior de 3000 kPa, que quando comparada a resistência do solo natural, de 250 kPa, teve um ganho de cerca de 12 vezes. Além disso, é possível observar a influência do tempo de cura na resistência, que quanto maior, maior também será a resistência do material. Isso se deve ao fato do processo reativo das reações pozolânicas que ocorrem ao decorrer do tempo, aumentando a resistência do material estabilizado.

Análogo ao parâmetro referente a relação vazios/cimento, para a avaliação da resistência à compressão não confinada de solos cimentados, Consoli *et al.* (2011) estudaram a influência da porosidade do material estabilizado e do teor de cal adicionado à uma areia argilosa, nos resultados de resistência à compressão simples. Com os resultados da pesquisa, concluíram que a relação vazios/cal, que compreende a relação entre a porosidade do material compactado e o conteúdo volumétrico de cal, denominado $(\eta/L_{iv})^{exponente}$, se mostrou um parâmetro adequado para a avaliação da resistência à compressão não confinada destes materiais. A Figura 3.9 apresenta os resultados dos ensaios, juntamente à curva ajustada com um expoente de 0,12 $((\eta/L_{iv})^{0,12})$.

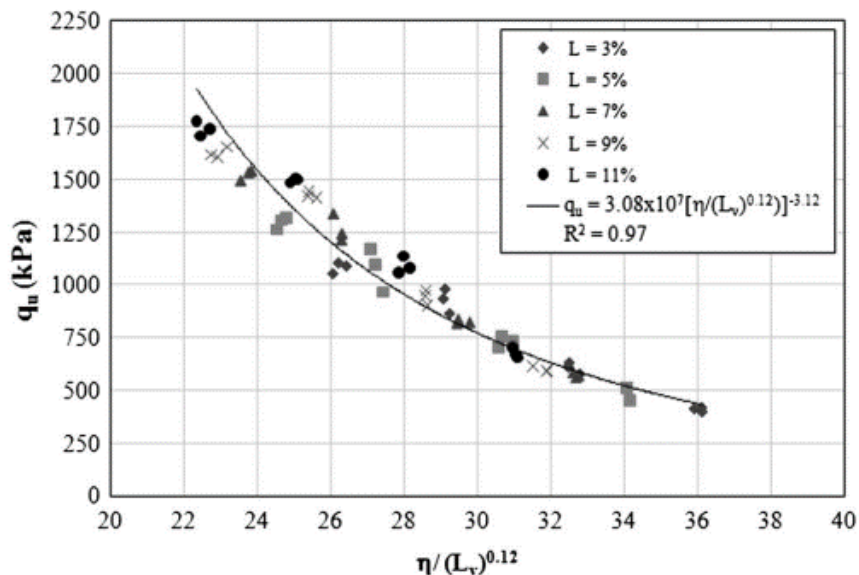


Figura 3.9 – Relação vazios/cal ajustada (Consoli *et al.*, 2011).

3.5 CERÂMICA

3.5.1 Contexto Histórico

A cerâmica, oriunda da argila, é um material consumido mundialmente. Este material está constantemente em empregado nos mais diversos tipos ocupações, desde utensílios domésticos a incorporação no setor de construção civil. A definição de cerâmica, pela Associação Brasileira de Cerâmica (2016), se dá por materiais inorgânicos, não metálicos, geralmente sinterizados através de um tratamento térmico com altas temperaturas. A Associação ainda classifica os materiais cerâmicos em nove diferentes seguimentos, que dependem de condições como matéria-prima, utilização e propriedades. As classificações estabelecidas são:

- Cerâmicas vermelhas: materiais de coloração avermelhada, como tijolos, telhas, elementos vazados, entre outros materiais.
- Materiais de Revestimento: materiais confeccionados em forma de placa, com finalidades de utilização em revestimentos internos e externos (pisos, azulejos, ladrilhos e etc.).
- Cerâmica Branca: materiais de coloração branca, geralmente cobertos por uma camada incolor vítrea, geralmente voltados à utilização em louças sanitárias, louças de mesa ou até mesmo cerâmicas artísticas.
- Materiais Refratários: materiais com finalidade de suportar altas temperaturas em condições fabris e industriais.
- Isolantes Térmicos: podem ser classificados em três grupos, sendo refratários isolantes, isolantes térmicos não refratários e fibras ou lãs cerâmicas.
- Fritas e Corantes: diferentes segmentos com finalidades de acabamento.
- Vidro, Cimento e Cal: seguimentos cerâmicos que por suas inúmeras particularidades, por vezes são externalizados desta classificação.
- Cerâmica Avançada: podendo também ser nomeada como cerâmica de alta tecnologia, que consiste em materiais formados a partir de materiais sintéticos de extrema pureza, em um sistema de processos minuciosamente controlados.

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER), os primeiros indícios de produção de peças cerâmicas foram encontrados em sítios arqueológicos, no período histórico da pré-história, o que define a antiguidade deste tipo de material. As primeiras peças cerâmicas tinham formato côncavo, sem qualquer tipo de alça, formadas por argila natural, geralmente, havendo conteúdos de óxido de ferro na composição, configurando uma coloração mais escura. Sua confecção era realizada pela argila umedecida com água, tornando-a maleável e moldável, sendo levada ao fogo como processo de endurecimento, tornando-se rígida e resistente. A Associação ainda afirma o que muitos estudiosos confirmam, que a indústria cerâmica é o setor fabril mais antigo existente.

No Brasil, os primeiros registros de produção de artefatos cerâmicos são localizados na Ilha de Marajó, no estado do Pará. Tendo originalidade puramente indígena, os artefatos cerâmicos produzidos tinham configuração artesanal, cujo procedimento criativo e executivo abordava uma série de técnicas utilizadas, como: incisões, raspagens, excisão e pintura das peças. Existem indícios da utilização de telhas cerâmicas no estado de São Paulo no ano de 1575, entretanto, a fundação da primeira grande fábrica/indústria de produtos cerâmicos brasileira, teve início no ano de 1893, também no estado de São Paulo, por uma família de francesa (ANICER, 2021).

3.5.2 Indústria da Cerâmica

O setor industrial de cerâmica vermelha comporta a produção de materiais de revestimento (ladrilhos, porcelanatos, azulejos, etc.) e materiais de construção civil (blocos de vedação, tenhas, manilhas, tubos, etc.). No Brasil, este seguimento representa cerca de 4,8% da indústria da construção civil, faturando cerca de 18 bilhões de reais por ano (SEBRAE, 2015). Segundo os dados do IBGE de 2018, apresentados pela ANICER (2022), no Brasil são aproximadamente 5600 empresas no ramo da cerâmica e olarias, produzindo cerca de 2,6 bilhões de telhas cerâmicas e 5,7 bilhões de blocos cerâmicos ao mês, totalizando 8,3 bilhões de produtos cerâmicos produzidos.

Segundo a ABCERAM (2016), o processo de fabricação para os diversos tipos de produtos cerâmicos, se assemelham parcial ou integralmente, tendo o processo geral subdividido geralmente nas seguintes etapas: preparação da matéria prima, preparação da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento, podendo, ou não, serem submetidos às técnicas de esmaltação e decoração.

3.5.2.1 Preparação da matéria prima

A preparação da matéria prima, tanto natural quanto sintética, consiste no tratamento do material antes da aplicação em meio fabril. A matéria prima de origem natural, obtida por mineração, é beneficiada, classificada de acordo com a composição granulométrica e muitas vezes purificada. Já os materiais sintéticos, são obtidos com características já estabelecidas e tratadas, prontos para utilização direta em fábrica, sendo tratados apenas quanto a distribuição granulométrica (ABCERAM, 2016).

Oliveira e Hotza (2015) subdividem as matérias primas utilizadas para a fabricação de peças cerâmicas em três categorias e definem separadamente as características de cada grupo como: plásticas, fundentes e refratárias. A matéria prima plástica é predominantemente argilosa, apresentando alta plasticidade, onde na presença de água se tornam capazes de sofrer deformações sem ruptura quando submetidos a certos carregamentos e quando descarregados, estes são capazes de reter a deformação resultante do carregamento. A matéria prima fundente pode ser obtida de forma natural, sintética, ou através de resíduos inorgânicos sólidos industriais, que por apresentarem formação de fases vítreas em baixas temperaturas, potencialmente reduzem a temperatura de queima das peças.

Geralmente são utilizados como fundentes: feldspatos (grupo de minerais compostos por aluminossilicatos) e/ou feldspatoides (semelhantes aos feldspatos, entretanto com baixo teor de sílica) sódicos ou potássicos, carbonatos de cálcio (calcitas) e/ou magnésio (dolomitas) e até subprodutos de mineração. Por fim, as matérias primas refratárias, mais comumente utilizadas em revestimentos cerâmicos, são os quartzos e quartzitos, que possuem altos teores de sílica, dentro de um intervalo de 85 a 90% da composição (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

3.5.2.2 Preparação da massa

Para a preparação das massas, inicialmente as matérias primas já preparadas e selecionadas são dosadas juntamente aos aditivos, pesadas e estocadas sendo posteriormente levadas a um processo de moagem, que visa a redução granulométrica e a homogeneização dos materiais. O grau de moagem das matérias primas, isto é, o tamanho das partículas destes materiais, tem relação intrínseca com a reatividade do material durante o processo posterior de queima. A redução do tamanho das partículas durante o processo de moagem aumenta a superfície específica das partículas e favorece a reatividade dos materiais, favorecendo a formação de

fases vítreas que contribuem com as características mecânicas do material durante a queima (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

A preparação das massas varia em função da técnica de formação das peças a ser empregada, podendo ser classificadas entre os tipos: (i) suspensão, utilizado para a síntese de peças em gesso ou resinas porosas; (ii) massas secas ou semissecas, que compõe a síntese de peças pela técnica de prensagem e (iii) massas plásticas, para a síntese de peças por extrusão (ABCERAM, 2016).

3.5.2.3 Formação das peças

O processo de formação de peças, geralmente, varia com relação a finalidade do produto final, podendo ser submetido aos métodos de: (i) colagem ou fundição; (ii) extrusão; (iii) prensagem e (iv) torneamento (ABCERAM, 2016).

No processo de colagem, o material é suspenso em solução e colocado em um molde de gesso, com o objetivo de retirar a água contida, permanecendo apenas as partículas sólidas que acomodadas dão forma à peça. Este método possibilita a obtenção de peças com formatos complexos e com qualidade de acabamento, utilizando materiais economicamente baratos e eficazes (SOUZA, 2020).

As peças moldadas por extrusão, geralmente, apresentam massas umidificadas acima do limite de plasticidade, com umidade maior que 20%. Em seguida, são colocadas em uma extrusora (maromba), onde o material é compactado, adquirindo o formato da matriz. Após esta etapa, o material já consiste no produto final, ou é enviado para os processos de prensagem ou torneamento, como por exemplo é o caso das telhas e vasos (ABCERAM, 2016; JUNIOR *et al.*, 2012).

Na técnica de prensagem, os materiais com características mais plásticas, são submetidos a pressões na ordem de 200-250 kgf/cm², podendo variar até 150 kgf/cm². Este processo, além de visar uma elevada densidade de material compactado na peça, também busca a compatibilidade da densificação em relação ao efeito de degaseificação que pode ocorrer no processo de queima (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

3.5.2.4 Tratamento Térmico

O tratamento térmico consiste em um processo onde as peças cerâmicas passam pelas etapas de secagem e queima, com a finalidade de solidificar o material e elevar as resistências. Na etapa de secagem, as peças, ainda com presença de água da moldagem, são submetidas a temperaturas entre 50 °C e 150 °C, de forma gradual para obter um processo de secagem lenta. Em seguida, são levadas a etapa de queima, onde são sujeitas a altas temperaturas em intervalos de 800 a 1700 °C, passando por um processo subdividido em: (i) elevação da temperatura, partindo da temperatura ambiente; (ii) estabilização da temperatura pelo período determinado e (iii) resfriamento para temperaturas menores do que 200 °C (ABCERAM, 2016).

3.5.2.5 Acabamento

O processo de acabamento consiste na finalização das peças cerâmicas, onde passam por uma etapa de inspeção, sendo qualificadas para o consumo. Dentro deste processo, as peças podem ser classificadas pelo acabamento superficial, sendo elas esmaltadas ou não-esmaltadas. Os esmaltes, são materiais provenientes de misturas químicas ou compostos vítreos que são aplicados à superfície das peças, com a finalidade de conferir impermeabilidade, aprimorar a estética, elevar a resistência e melhorar propriedades elétricas (ABCERAM, 2016). Os materiais típicos utilizados industrialmente na esmaltação são: engobe; esmalte branco e esmalte transparente. Estes, se diferem em função das características reológicas que compreendem a densidade, limite de escoamento, viscosidade e tiroxotropia (OLIVEIRA e HOTZA, 2015). Por fim, as peças podem passar pelo processo de decoração onde podem ser aplicados métodos comumente utilizados, como a serigrafia, decalcomania, pintura dentre outras possibilidades. (ABCERAM, 2016).

3.5.2 Geração de Resíduos

Segundo o SEBRAE (2015), grande parte dos materiais de descarte produzidos em solo brasileiro são confeccionados por cerâmica vermelha. Estes resíduos são provenientes de materiais que compreendem: telhas, blocos, tijolos maciços, tubos para saneamento, lajes, entre outros materiais.

Autores (MME, 2009; Brasil, 2010) afirmam que o índice de resíduos gerados nas etapas posteriores a queima das peças cerâmicas, varia em um intervalo de 5 e 20%, dependendo dos métodos industriais utilizados, sendo eles menos ou mais modernos. Segundo o SEBRAE (2008), a média da geração de resíduos do setor é de 14% do total produzido em um ano. Lotero

Caicedo (2020) afirma que, anualmente, a estimativa de perdas no processo produtivo, é de aproximadamente 7,1 bilhões de peças ao ano, resultando em 14 mil toneladas de resíduo gerado.

Os resíduos coletados dentro do setor industrial de cerâmica vermelha são classificados como um tipo de resíduo Classe A, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na resolução N° 307 de 5 de julho de 2002, a qual qualifica o resíduo para reutilização em misturas cimentícias com finalidade de aplicação em obras no setor de construção civil. Pelas diretrizes da ASTM C618:2019, o resíduo cerâmico reciclado em frações finas apresenta composições físico químicas satisfatórias para aplicação em misturas de Cimento Portland como adição.

Desta forma os pesquisadores Vieira, Molin e Lima (2004), sugerem meios estratégicos de reutilização destes resíduos gerados no meio fabril, considerando métodos e técnicas voltados à reciclagem destes materiais, tornando-os qualificados, com baixo custo e depositados de maneira sustentável em práticas empregáveis dentro da construção civil.

Tendo em vista este cenário sustentável, onde cada vez mais são desenvolvidas e implementadas novas metodologias e técnicas com o intuito de reduzir a quantidade de resíduos para descarte, trazendo-os novamente como matéria prima empregável no setor da construção civil, as indústrias do ramo cerâmico vermelha têm investido em novas soluções de otimização do processo fabril dos produtos, visando a melhoria da qualidade final dos resíduos gerados durante a produção, tendo em vista a reutilização destes rejeitos (MODESTO *et al*, 2003).

3.6 ÁLCALI ATIVAÇÃO

A álcali ativação pode ser definida pelo processo químico onde determinadas estruturas amorfas ou parcialmente amorfas geram estruturas com propriedades cimentantes, em um meio altamente alcalino (CASTRO, 2015).

O primeiro estudo registrado, foi em 1908 por Kühl, cuja pesquisa demonstrava a estabilização de escória de alto forno com hidróxido de sódio em pó. Anos depois, Purdon, no ano de 1940, foi pioneiro na produção de materiais por reação pozolânicas utilizando como base do seu estudo cinzas volantes com altos teores de cálcio, publicando extensas pesquisas sobre cimentos produzidos por álcali ativação, sem a necessidade de clínquer. Nas duas décadas subsequentes, Glukhovskiy estudou a ativação alcalina de aluminossilicatos orgânicos e inorgânicos, provando

a alta durabilidade dos cimentos alcalinos. Em meados dos anos 70, Davidovits introduziu a geopolimerização, no meio acadêmico, onde definiu a terminologia pela síntese de materiais com base caulínica formados pela mistura de aluminossilicatos em uma solução altamente alcalina. Em 1980, junto a Sawyer, Davidovits alcançou alto progresso estudando ligantes de geopolímeros e escória álcali ativada, chegando a comercializar estes cimentos alcalinos, nomeados Pyrament nos Estados Unidos, que apesar da boa durabilidade e resistência inicial do produto, deixaram de ser produzidos em 1990 (PROVIS e DEVENTER, 2009; THOMAS *et al.*, 2016)

Lotero Caicedo (2020), cita alguns autores (DUXSON *et al.*, 2007; SHI *et al.*, 2011; PROVIS *et al.*, 2014; PALOMO *et al.*, 2004; KRIVENKO, 2017) que abordam uma das maiores complicações no âmbito do setor de desenvolvimento de cimentos alcalinos, que têm sido a falta de nomenclaturas claras para descrever estes tipos de materiais, sendo eles sintetizados com a utilização de uma mesma química. Química esta, que pode ser interpretada como um substrato aquoso com elevada alcalinidade, onde ocorrem reações complexas de dissolução e precipitação.

O autor ainda cita algumas nomenclaturas encontradas na literatura, por diferentes autores para referenciar estes tipos de materiais (RAHIER, *et al.*, 1996; PALOMO e DE LA FUENTE, 2003; KRIVENKO, 1994; MALLICOAT *et al.*, 2005; SOFI *et al.*, 2007; BAO *et al.*, 2005; GLUKHOVSKY, *et al.*, 1957; GLUKHOVSKY, 1959, 1967; FORSS, 1983 *apud* KRIVENKO, 2017; DAVIDOVITS, 1991). São estes:

- Vidro de alumino silicato sintetizado a baixa temperatura;
- Cimentos álcali-ativos;
- Geocimentos;
- Cerâmica Alcalina;
- Concreto Polimérico Inorgânico;
- Hidro cerâmica;
- Cimentos de solo e silicatos de solo;
- Cimento-F;

- Geopolímeros;

Para a produção de um cimento por álcali ativação, os componentes essenciais necessários são: um componente cimentante e um ativador alcalino. O componente cimentante é comumente denominado como precursor, sendo um material rico em sílica e alumina e devendo conter um alto grau de amorfização. O ativador alcalino ou solução ativadora é geralmente baseado em um metal alcalino, sendo comumente utilizados o sódio ou o potássio ou um metal alcalino-terroso, sendo comumente utilizado o cálcio. (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2017).

3.6.1 Geopolímeros

Os geopolímeros são formados pelo processo da geopolimerização que consiste na formação de um novo material em temperatura ambiente ou em uma temperatura pouco maior, mantido em um intervalo de 20 a 85°C. Esse processo ocorre em duas fases, onde inicialmente a primeira fase ocorrente é a dissolução dos aluminossilicatos presentes na mistura, desencadeando a polimerização, onde as moléculas se aderem para formar moléculas maiores, precipitando posteriormente como géis. A segunda fase é o rearranjo estrutural, que ocorre pela formação dos polímeros inorgânicos compostos por moléculas de sílica e alumina ligadas a átomos de oxigênio de forma alternada (DAVIDOVITS, 1982, 1991; DUXSON *et al.* 2007; BILONDI *et al.*, 2018).

Essencialmente, os geopolímeros são formados por policondensação, que consiste no tipo de polimerização que se caracteriza pela liberação de água durante o processo. O processo de polimerização descrito por Glukhovsky (1967), é dividido em três etapas que consistem em: destruição-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização.

3.6.1.1 Destruição - Coagulação

Segundo Glukhovsky (1967), a primeira etapa é onde ocorre a dissolução, quando o material rico em aluminossilicatos entra em contato com um meio aquoso altamente básico, como as soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e potássio (KOH). Os íons hidroxila (OH^-) agem em torno dos átomos de silício (Si-O-Si) e alumínio (Al-O-Al), enfraquecendo as ligações covalentes a ponto de se romperem.

Os cátions provenientes da dissociação iônica do hidróxido de sódio (neste caso), neutralizam a carga negativa dos ânions de Si-O^- . Com a ocorrência do tipo $\text{Si-O}^- \text{Na}^+$, a reação de formação

Por fim, a condensação-cristalização, terceira e última etapa do processo descrito por Glukhovsky (1967), envolve a reorganização e solidificação dos géis. É iniciada a precipitação dos produtos formadas pelas reações, cuja composição química final será interdependente dos seguintes fatores: mineralogia e composição química do precursor e natureza e dosagem do ativador alcalino. O material disponível ao final da reação se organiza impedindo a formação de reações novas por imobilização, ocasionando o endurecimento da estrutura, formando poli (sialatos).

Os geopolímeros mais comuns formam três diferentes tipos de cadeias, sendo elas: polissialato, polissialato siloxo e polissialato disiloxo, como pode-se observar na Figura 3.10. (SOMNA *et al.*, 2011).

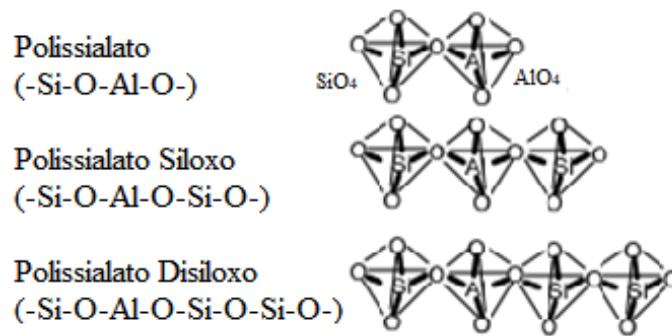


Figura 3.10 - Estruturas silico-aluminatos tridimensionais, adaptado de Davidovits (1994).

Segundo Davidovits (1994), o sialato, abreviatura de silico-oxo-aluminato, consiste na estrutura tetraédrica formada por SiO_4 e AlO_4 alternados por moléculas de oxigênio, com a presença de ânions (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+) nos vazios da estrutura, balanceando a carga negativa. O autor afirma que os polissialatos são polímeros em cadeia com Si_4^+ e Al_3^+ em coordenação quádrupla ligadas a moléculas de oxigênio, variando entre fases amorfas e fases semicristalinas. A fórmula empírica para polissialatos é apresentada pela equação (3.10).

$$M_n \{ (\text{SiO}_2)_z - (\text{AlO}_3) \}_n, w\text{H}_2\text{O} \quad 3.10$$

Onde,

M – Cátion de Sódio, Potássio ou Cálcio;

n – Grau de polimerização;

z – 1, 2 ou 3;

w – Grau de hidratação.

3.6.2 Produtos de Reação

Os cimentos alcalinos possuem grande variedade de precursores pozolânicos e ativadores alcalinos utilizados, resultando em diferentes materiais provenientes dos mecanismos de reações. Pacheco-Torgal *et al.* (2014) afirmam que os cimentos alcalinos podem ser separados em dois grupos, tendo como base o sistema de componentes cimentícios ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) que se diferem entre si, quando se trata dos mecanismos de reação. Os grupos são: materiais álcali-ativados com altos teores de cálcio e materiais álcali-ativados com baixos teores de cálcio.

Os materiais álcali-ativados com altos teores de cálcio, corresponde aos materiais cuja somatória dos conteúdos de óxido de silício (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO) são superiores a 70% em massa e o conteúdo referente a massa de óxido de alumínio (Al_2O_3), inferior à 20%. O principal produto de reação formado neste tipo de produto é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que é obtido nas fases iniciais de hidratação. Nas fases subsequentes, onde a cristalização ocorre de forma mais lenta, os géis N-A-S-H e C-N-A-S-H são formados dentro deste processo à longo prazo (KRINVEKO, 2017).

O cimento alcalino com precursor a base de escória é um produto do grupo dos materiais álcali-ativados com altos teores de cálcio, tendo como principal produto de hidratação o C-S-H, que tem semelhança direta com os géis produzidos pela hidratação do cimento Portland. O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) apresenta estrutura amorfa, com morfologia das placas variando entre um gel pouco cristalino a uma malha reticulada. Nela são encontradas duas diferentes fases, a fase interior que se forma ao redor dos materiais não hidratados e a fase exterior se desenvolve nos espaços vazios preenchidos por água, como apresentado na Figura 3.11 (MEHTA E MONTEIRO, 1994; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014).

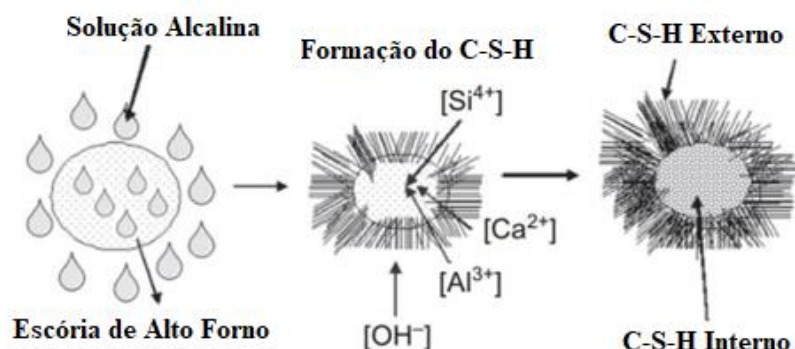


Figura 3.11 – Modelo teórico do mecanismo de reação com formação C-S-H (Adaptado de Pacheco-Torgal *et al.*, 2014).

Os materiais álcali ativados com baixo teor de cálcio são basicamente compostos por moléculas de sílica e alumina, quase que exclusivamente, e são ativados por compostos com materiais com pH maior que os ativadores à base de cálcio, gerando as reações pozolânicas. As reações e o processo de polimerização, ocorrem dentro do mecanismo de três etapas proposto por Glukhovsky, citado anteriormente. A última fase do processo gera uma matriz amorfa, que tem como componente principal o gel N-A-S-H, também conhecido como precursor polimérico. Este material apresenta propriedades cimentantes, apresenta cadeias poliméricas com fortes ligações, estruturas complexas que hipoteticamente torna-se uma zeólita no processo de cristalização. A estrutura tridimensional do N-A-S-H pode ser observada na Figura 3.12 (DAVIDOVITS, 1994; GLUKHOVSKY 1994; PACHECO-TORGAL *et al.*, 2014).

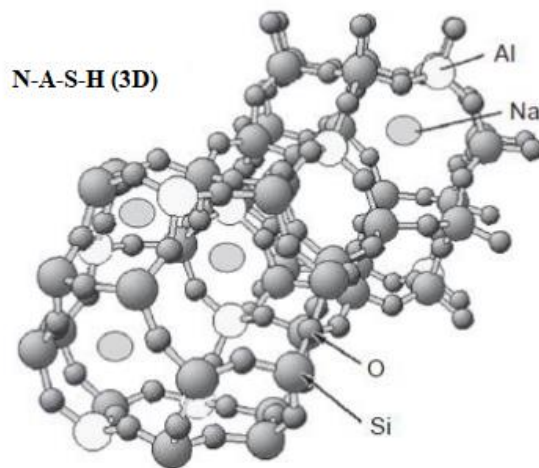


Figura 3.12 – Projeção tridimensional do gel N-A-S-H (Adaptado de Pacheco-Torgal *et al.*, 2014).

Os materiais álcali-ativados de sistemas mistos ou, também chamados, cimentos híbridos, requer a utilização de matéria com altos teores de Ca^{+2} e Al^{+3} , como as cinzas volantes, a escória de alto forno e o metacaulim. Além disso, esses cimentos apresentam quantidades de Al_2O_3 superiores a 20% na sua composição. As reações desses materiais são complexas e o processo de hidratação precipita géis misturados como: o géil C-A-S-H com conteúdo de sódio e (N,C)-A-S-H proveniente do gel N-A-S-H com altos teores de cálcio (KRINVEKO, 2017).

Estudos realizados por Krinkevo (2017), analisaram o processo de co-precipitação dos géis em um mesmo ambiente. Os resultados da pesquisa mostraram que a alcalinidade da mistura influencia na formação dos géis, assim como os teores de cal. As amostras com maiores teores de cal favoreceram a formação de géis C-A-S-H, e amostras com menores quantidades de cal formaram géis (N,C)-A-S-H. A relação do pH da mistura dividiu-se na formação de géis em

alcalinidades maiores e menores que 12. Com pH menor que 12, houve surgimento do géis N-A-S-H, apresentando o comportamento de um zeólito, onde no processo de troca catiônica os cátions de Na^+ substituíram os cátions de Ca^{+2} . Com o pH maior que 12, a presença de cálcio favorece a formação de géis C-A-S-H. Por fim, os autores afirmam que a mistura de ambos os géis resulta em uma degradação de N-A-S-H na presença do géil C-A-S-H que se segue até o equilíbrio do sistema (KRINVEKO, 2017).

3.6.3 Precusores

Um esquema explicativo que apresenta os diferentes elementos utilizados para um sistema de álcali-ativação, pode ser observado na Figura 3.13.

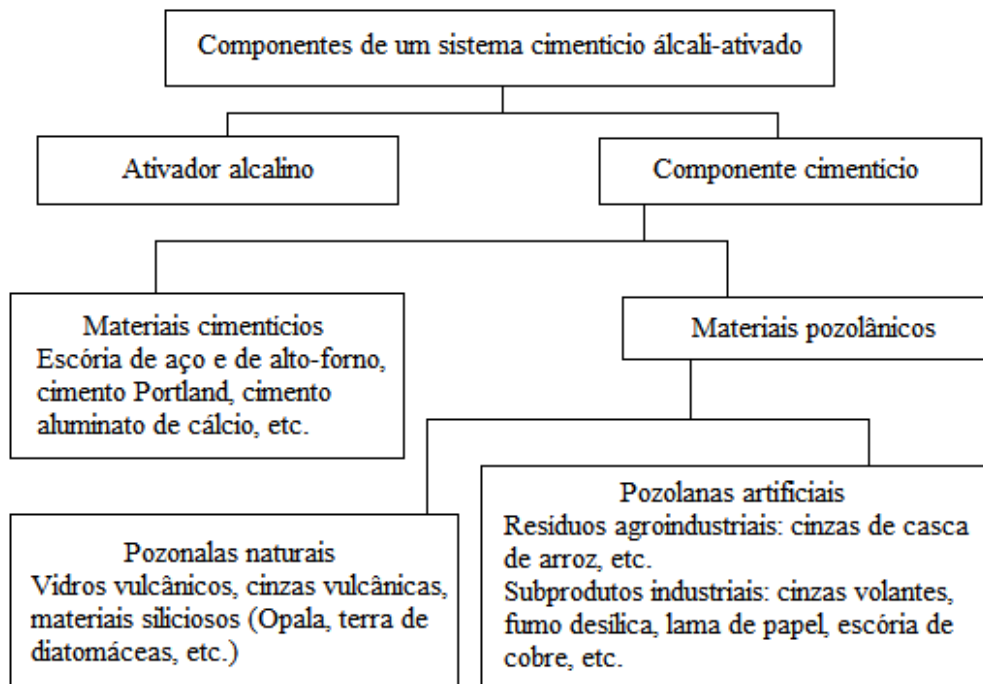


Figura 3.13 – Elementos de um sistema de álcali-ativação (Adaptado de Lotero Caicedo, (2020).

Segundo Torres-Carrasco e Puertas (2017), os materiais pozolânicos artificiais, provenientes de resíduos agroindustriais ou subprodutos industriais, têm sido estudados na aplicação de sistemas álcali ativados como precusores, por possuírem altos teores de sílica e alumina em sua composição, oferecendo por isto, um potencial de cimentação alternativa no setor da construção civil. Além da sílica e alumina presentes na composição, os precusores também podem apresentar CaO , que em condição livre, colabora com as reações.

Entretanto, as altas quantidades de sílica e alumina, existentes na composição química destes materiais, não garante a reatividade do sistema, visto que esta reatividade se dá em função de algumas condições, como: quantidade de material amorfo, teor de fases vítreas existentes, granulometria das partículas, entre outras (DUXSON, *et al* 2007).

Os materiais mais estudados neste tipo de aplicação são as cinzas volantes, o metacaulim, e a escória de alto-forno, por apresentaram as características necessárias para as reações (REPETTE, 2010).

Severo *et al.* (2013) afirma que as reações pozolânicas desencadeadas pela ativação alcalina destes precursores resultam na síntese de geopolímeros. Este processo ocorre por meio da hidratação de aluminossilicatos existentes na composição química dos precursores, em contato com elementos alcalinos ou alcalino-terrosos onde ocorre o processo de dissolução e precipitação. As reações conferem resistência ao material em um processo lento, atribuída pela formação de pontes cimentantes, que pode levar meses ou até anos (BEHNOOD, 2018).

3.6.4 Ativadores

Os ativadores são responsáveis por elevar o pH da mistura, mantendo o ambiente alcalino promovendo a dissolução dos aluminossilicatos presentes nos precursores (DUXSON *et al.*, 2007). Podem ser utilizados como ativadores, os hidróxidos de sódio, cálcio ou potássio, silicatos de sódio ou potássio, carbonatos ou sulfatos, sendo mais comum a utilização de hidróxidos e silicatos (CRIADO, PALOMO e FERNANDEZ-JIMENEZ, 2005; PROVIS e BERNAL, 2014).

Os hidróxidos são os materiais mais utilizados para este tipo de aplicação, pois além do baixo custo e alta disponibilidade, apresentam baixa viscosidade e possuem maior capacidade de liberação de monômeros no processo de polimerização (DUXSON, *et al*, 2007; TORRES-CARRASCO, 2015).

De acordo com Lima e Thaumaturgo (2005), os silicatos também são muito utilizados, proporcionando, além das características básicas semelhantes às dos hidróxidos, uma fonte de sílica adicional que reage juntamente ao sistema álcali ativado.

3.6.4.1 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio é o ativador mais utilizado no método de geopolimerização, sendo sintetizado a partir da eletrólise do cloreto de sódio em formato aquoso. Este ativador consiste em uma base alcalina forte, com capacidade de elevar o pH do meio, com concentrações relativamente baixas de solução, possuindo também a tendência da formação de zeolitas e de produtos de reação do tipo N-A-S-H (LIVI, 20171; LONGHI, 2015).

3.6.4.2 Silicato de Sódio

A composição química do silicato de sódio é basicamente dividida entre SiO_3 , Na_2O e H_2O . Segundo Criado *et al.* (2008), esse material possui grandes quantidades de íons, distribuídos em ordem polimérica por monômeros e dímeros, a depender da relação entre sílica de álcalis ($\text{SiO}_3/\text{Na}_2\text{O}$) disponível, ou mais comumente chamado de módulo de sílica.

Além disso, o silicato apresenta valores intermediários para o pH, apresentando uma menor capacidade de variação em comparação ao NaOH. Em contrapartida, a existência de sílica em condição livre colabora com as reações pozolânicas catalisadas pelo ambiente alcalino, reagindo com íons de Ca^{2+} dissociados dentro da mistura formando produtos de reação em um curto período de tempo (MONCALEANO ACOSTA, 2021).

3.6.2.3 Hidróxido e Silicato de Sódio Juntos

Em pesquisas mais recentes, o emprego do hidróxido de sódio juntamente o silicato de sódio se tornou comum. Lloyd *et al.* (2009), analisaram o emprego do destes ativadores alcalinos em uma mistura com cinzas volantes, para avaliar o efeito dos ativadores no desempenho mecânico dos produtos finais. Os autores concluíram que o hidróxido de sódio necessita de um período intermediário para que ocorra a dissolução das partículas e assim se iniciem as reações, diferentemente do silicato de sódio, que por apresentar moléculas de silício livres e conseqüentemente prontas para reagir, desencadeia o início da formação dos produtos de reação em um período relativamente curto (instantâneo).

Um fato de extrema importância na utilização destes ativadores em conjunto, é o módulo de sílica. O módulo de sílica (M_s) compreende a relação entre a quantidade de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de sódio (Na_2O) existentes na composição química do silicato de sódio. Esta relação influencia diretamente no pH do meio, e conseqüentemente nas reações de álcali ativadas. Segundo Duxson *et al.* (2005), o intervalo ótimo para a ativação alcalina dos aluminossilicatos presentes em uma mistura se encontra dentro de um intervalo de $0,5 < \text{SiO}_2 /$

$\text{Na}_2\text{O} < 1,0$. Entretanto, Wang *et al.*, (1994) afirmam que estes intervalos variam com a mudança do precursor utilizado.

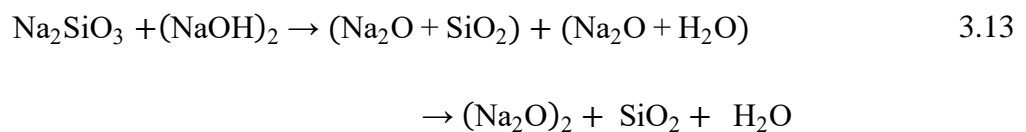
A utilização do hidróxido de sódio atrelado ao silicato de sódio possibilita o controle do módulo de sílica (Ms). A composição do hidróxido de sódio é basicamente constituída por uma molécula de sódio (Na) e uma hidroxila (OH) onde a interação de duas moléculas de NaOH, resultam na estequiometria apresentada na Equação 3.11.



Observa-se que o produto proveniente da estequiometria é constituído por uma molécula de óxido de sódio (álcalis) e uma molécula água. O silicato por sua vez, é composto basicamente por duas moléculas de sódio (Na_2), uma molécula de (Si) e três moléculas de oxigênio (O_3). A Equação 3.12 apresenta a estequiometria resultante de uma molécula de silicato de sódio.



Neste caso, observa-se que o produto proveniente da estequiometria é constituído por uma molécula de óxido de sódio (álcalis) e uma molécula de dióxido de silício. Com isso, a soma de uma molécula de silicato de sódio e duas moléculas de hidróxido de sódio resulta em um aumento da quantidade de álcalis existente na mistura, possibilitando a redução e controle do módulo de sílica do material como pode-se observar na Equação 3.13.



Por fim, pode-se observar que a utilização do hidróxido de sódio atrelado ao silicato de sódio resulta em um maior teor de álcalis, potencializando as reações.

3.6.2.4 Método de mistura das dosagens

O método convencional utilizado para realizar a mistura das dosagens de materiais álcali ativados é o método *two-part*. Este método consiste na formação de produtos de reação entre os ativadores em soluções aquosas e o precursor definido, isto é, duas partes, além da quantidade de água adicional (LUUKKONEN *et al.*, 2018). Entretanto, o manuseio de grandes quantidades de solução trouxe uma grande problemática, relativa à impraticabilidade do método para o desenvolvimento de materiais álcali ativados em campo (DUXSON e PROVIS, 2008).

Sendo assim, foi desenvolvido o método *one-part*, que consiste em um processo onde os ativadores alcalinos são misturados ao precursor em estado sólido, sendo posteriormente realizada a adição de água. Na Figura 3.14 ilustra o processo de execução do método *one-part* em ligantes álcalis ativados.



Figura 3.14 – Método *one-part mix* (Adaptado de Wu *et al.*, 2021),

De acordo com alguns autores (PENG *et al.*, 2015; NEMATOLLAHI *et al.*, 2015; NEMATOLLAHI e SANJAYAN, 2016;), os produtos de reação formados pelo método *one-part*, apresentam menor resistência à compressão em detrimento do método *two-part*, mas ainda assim apresentam altos valores de resistência, suficientemente elevados para aplicação em campo.

3.6.5 Aplicação da Álcali Ativação na Estabilização de Solos

3.6.5.1 Ativação alcalina de resíduos cerâmicos

Os materiais cerâmicos vêm sendo estudados como potenciais precursores na álcali ativação, em função da existência de aluminossilicatos em sua composição química e a existência de material amorfo com estruturas semicristalinas.

Lotero Caicedo (2020) realizou uma pesquisa na linha de estabilização de solos por álcali ativação, utilizando resíduos cerâmicos vermelhos (RCV), provenientes de construção e demolição, cal de carbureto, proveniente de produção do gás acetileno, e hidróxido de sódio como ativador das misturas. Inicialmente foi realizado um estudo de pastas, onde foram testados diferentes teores de cal de carbureto de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em relação a massa do precursor e diferentes concentrações molares de hidróxido de sódio na ordem de 0, 2, 3 e 4 mols. Para um período de cura de 7 dias, com temperaturas de $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $33 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, os resultados obtidos podem ser observados na Figura 3.15.

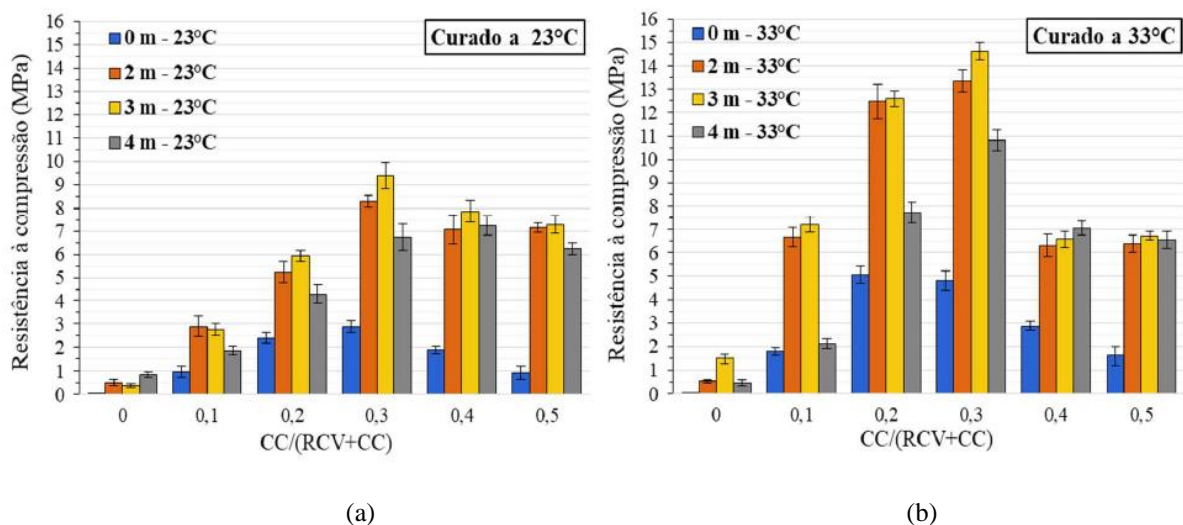


Figura 3.15 - Resistência à compressão simples das pastas (a) $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) $33 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Adaptado de Lotero Caicedo, 2020)

Observa-se que os melhores resultados obtidos foram para as dosagens com 30% de cal de carbureto, em relação a massa de precursor, e concentração de 3 mols de solução, correspondentes à 4% de álcalis. Os valores de resistência máximos obtidos foram na ordem de 9,4 MPa para a temperatura de cura de $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e 14,6 MPa para $33 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Posteriormente, foi elaborado um projeto experimental para avaliar a influência da porosidade, com a variação do peso específico aparente seco, e o teor de precursor em relação à massa de sólidos, juntamente com a variação da concentração alcalina de hidróxido de sódio, no comportamento geomecânico de um solo granular.

Foram estabelecidos pesos específicos aparente secos de 15 e 17 kN/m³, porcentagens de precursor de 15 e 35% em relação à massa de sólidos, mantendo o teor de 30% de cal de carbureto em relação a massa de precursor, e concentrações alcalinas de ativador (Na₂O) de 1,5 e 6,5%. A partir dos resultados obtidos, as dosagens com compactação de 17kN/m³, teor de precursor de 35% e concentração alcalina de 6,5%, apresentaram melhor desempenho mecânico. As resistências máximas alcançadas foram na ordem de 6,65 MPa, para as amostras curadas em temperatura de 23± 2 °C, por um período de 7 dias, e 11,44 MPa para 28 dias.

Silvano (2020) estudou os efeitos da utilização de pó de telha e cal de carbureto como precursores e hidróxido de sódio como ativador das misturas, no comportamento mecânico de um solo granular, em um sistema álcali ativado. A dosagens analisadas, tinham pesos específicos aparente secos de 15, 16 e 17 kN/m³, teores de pó de telha de 10%, 20% e 30% e teores de cal de carbureto de 4%, 7% e 10%, e concentrações de NaOH de 0 e 3 mols, curados por um período de 7 e 28 dias.

Os resultados máximos obtidos foram para as dosagens com peso específico aparente seco de 17 kN/m³, teor de pó de telha de 30%, teor de cal de carbureto 10% e concentração de ativador de 3 mols, alcançando resistências na ordem de 7,3 MPa para 7 dias de cura e 10 MPa para 28 dias. Para as dosagens com 0 mols de concentração de NaOH, os resultados máximos obtidos apresentaram-se significativamente mais baixos do que as dosagens com 3 mols de concentração, na ordem de 1,3 MPa aos 7 dias de cura e 3,6 MPa aos 28 dias.

Isso se deve ao fato, de que os ativadores alcalinos agem como catalisadores das reações pozolânicas, aumentando a velocidade das reações e consequentemente conferindo maior resistência ao material em menos tempo (SHEHAB, EISA e WAHBA, 2016).

Os estudos mencionados fundamentam a possibilidade de utilização de resíduos cerâmicos no processo de álcali ativação, objetivando a aplicação destes ligantes alternativos na estabilização de solos. Entretanto, sabe-se da problemática que envolve a aplicação destes métodos em campo pelo método convencional (*two-part*), além da necessidade de ampliar os conhecimentos em relação aos possíveis ativadores a serem utilizados.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Com o objetivo de ampliar o conhecimento na área de melhoramento de solos com estabilização química, a partir de novas técnicas de álcali ativação, foi elaborado um programa experimental com a finalidade de analisar o comportamento geomecânico do material estabilizado. Neste capítulo, serão descritos os conjuntos de materiais, dosagens desenvolvidas, ensaios e os métodos empregados nesta pesquisa.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Segundo MDEGE *et al.* (2014), o programa experimental, é geralmente concebido a partir de um projeto de experimentos, que visa a projeção de determinadas tarefas com a o objetivo de explicação, descrição e análise da variação de determinados fatores, sob condições previamente estabelecidas.

Para o desenvolvimento do projeto experimental, foram estabelecidos os fatores constantes, os fatores controláveis, aos quais serão analisados em variação pelos níveis de estudo, as variáveis resposta e os tratamentos realizados nas demais etapas desta pesquisa.

4.1.1 Projeto de Experimentos

MONTGOMERY (2017) define experimento como um conjunto de testes onde os fatores controláveis são variados e, com isso, seja possível definir a razão das variações ou mudanças das variáveis de resposta.

Na elaboração de um projeto experimental o principal problema é relacionado à confiabilidade e validade dos resultados. Para isso, as variáveis devem ser selecionadas cuidadosamente, de forma a reduzir os erros de medição e manter uma quantidade suficientemente detalhada de informações (MDEGE *et al.*, 2014).

Para desenvolver um projeto experimental, geralmente são considerados vários fatores, onde cria-se a necessidade de utilização de um método eficaz, que utilize da interação entre os fatores selecionados. Os projetos fatoriais utilizam do método de cruzamento dos fatores, ao passo que

cada nível de um fator interaja separadamente com os níveis de outros fatores, isto é, todos fatores se combinam entre si (MATTOS *et al.*, 2004).

Para a realização de projetos otimizados, onde os recursos são limitados, e conseqüentemente é necessária uma menor quantidade de experimentos, utiliza-se o projeto 2^k . Este tipo de projeto fatorial é muito utilizado em processos produtivos, pela sua eficácia e economia. Neste tipo de projeto, cada fator (K) é ensaiado em dois níveis distintos, sendo capaz de analisar cada fator de forma simultânea, afunilando a análise nos fatores com maior influência nas variáveis de resposta (MATTOS *et al.*, 2004; MONTGOMERY, 2017).

4.1.1.1 Variáveis Fixadas

As variáveis fixadas para os ensaios de resistência à compressão simples e módulo de cisalhamento, da terceira fase do programa experimental são divididas entre: (i) teor de umidade; (ii) teor de álcalis; (iii) precursores; (iv) relação entre cal de carbureto e resíduo; (v) tipo de ativadores alcalinos; e (vi) temperatura de cura.

O teor de umidade das dosagens, foi definido pelo ensaio de compactação Proctor, com energia modificada, visto que a energia modificada confere uma maior compacidade ao material o que influencia diretamente na resistência. A umidade ótima encontrada no ensaio foi de 11%, sendo então fixada nesta ordem para a moldagem das amostras para os ensaios.

Na pesquisa de Lotero Caicedo (2020), anteriormente citada, foi realizada uma etapa referente ao estudo de pastas, com a utilização de cal de carbureto, resíduo cerâmico e ativador alcalino (NaOH). Nesta etapa foram estudadas dosagens com diferentes relações entre cal de carbureto (CC) e resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e diferentes concentrações do ativador alcalino empregado. Alicerçada nos melhores resultados obtidos, que consistem em 30% de CC em relação ao RCV+CC e 4% de álcalis, estes foram estabelecidos e fixados para as dosagens. Os precursores utilizados serão a cal de carbureto (CC), proveniente da produção do gás acetileno, e o resíduo de telha esmaltada (RTE), produzido dentro do âmbito fabril.

Os ativadores selecionados foram o silicato de sódio (Na_2SiO_3) e o hidróxido de sódio (NaOH). O silicato de sódio tem comportamento semelhante ao do hidróxido de sódio, entretanto sua seleção é explicada pela fonte adicional de sílica que reage juntamente ao sistema álcali ativado (LIMA e THAUMATURGO, 2005). O hidróxido de sódio, por sua vez, foi selecionado pela existência de 77,5% de álcalis (Na_2O), no resultado da estequiometria de duas moléculas de

NaOH. Com isso, diferentes dosagens entre silicato e hidróxido de sódio são capazes de controlar a relação entre sílica e álcalis ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) ou também chamado de módulo de sílica.

A temperatura de cura das amostras influencia diretamente na velocidade das reações. O aumento da temperatura acelera a formação dos géis, acelera o desenvolvimento da microestrutura e aumenta a resistência das amostras em menos tempo (PALOMO *et al.* 1999; ALAM, DAS, RAO, 2019). Sabendo disto, optou-se por submeter as amostras à cura em temperaturas de 23 ± 2 °C, representando a temperatura ambiente, para analisar os resultados das reações nestas condições.

Os fatores constantes selecionados para a elaboração do programa experimental, podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Variáveis fixadas

Variável Fixada	Níveis
Teor de Umidade	11%
Agentes Estabilizadores	RTE e CC
Relação RTE/CC	70/30
Concentração de álcalis (Na_2O)	4%
Ativadores Alcalino	Na_2SiO_3 e NaOH
Temperatura de Cura	23°C

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

4.1.1.2 Variáveis controláveis

As variáveis controláveis selecionadas foram divididas em: (i) peso específico aparente seco; (ii), teor de ligante; (iii) módulo de sílica; e (iv) tempo de cura.

A definição do peso específico aparente seco para as misturas, foi feita pelo ensaio de compactação Proctor com energia modificada. Considerando os resultados do peso específico aparente seco dos ensaios, foram estabelecidos os valores distintos de 18 kN/m^3 e 16 kN/m^3 como máximo e mínimo respectivamente.

Os teores de ligante álcali ativado aplicados na estabilização do solo granular foram de 20 e 30%, visando a análise de forma considerável dos efeitos da cimentação no comportamento mecânico do solo.

Para o módulo de sílica, Duxson *et al.*, (2005) afirmam que o intervalo ótimo para a ativação alcalina dos aluminossilicatos presentes na mistura se encontra dentro de um intervalo de $0,5 <$

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} < 1,0$. Entretanto, estes intervalos variam com a mudança do precursor utilizado, como já estudado anteriormente (WANG *et al.*, 1994). Sendo assim foram estabelecidos módulos de sílica de 1 e 2, para averiguar influencia desta variação no comportamento das amostras.

Os tempos de cura estabelecidos foram de 7 e 28 dias, para avaliar o ganho de resistência gradativo das misturas, visto que as reações pozolânicas ocorrem em um processo lento e gradual, elevando a resistência do material a longo prazo, em períodos de meses ou até anos (PRUSINSKI E BHATTACHARJA, 1999; BEHNOOD, 2018).

Os fatores controláveis selecionados para a elaboração do programa experimental, podem ser observados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Variáveis controláveis

Variável Fixada	Níveis
Peso específico aparente seco (γ_d)	18 e 16 kN/m ³
Teor de ligante	30 e 20%
Módulo de Sílica ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)	1 e 2
Tempo de Cura	7 e 28 dias

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

4.1.1.3 Tratamentos

Sendo assim, o projeto de experimentos foi elaborado com quatro fatores controláveis (A – Peso específico aparente seco, B – Teor de Ligante, C – Módulo de Sílica e D – Tempo de Cura), em dois níveis (Inferior -1 e Superior +1), com amostras duplicadas e 4 pontos centrais. O número de tratamentos realizados foram 17 correspondendo a 2^4 +ponto central, como pode ser observado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Experimento Fatorial Completo 2⁴ ensaios de RCS e G0

Tratamento	Ordem do Ensaio	Peso Esp. Apar. Seco	Teor de Ligante	Módulo de Sílica	Tempo de Cura
1	1, 17	-1	-1	-1	-1
2	2, 18	+1	-1	-1	-1
3	3, 19	-1	+1	-1	-1
4	4, 20	+1	+1	-1	-1
5	5, 21	-1	-1	+1	-1
6	6, 22	+1	-1	+1	-1
7	7, 23	-1	+1	+1	-1
8	8, 24	+1	+1	+1	-1
9	9, 25	-1	-1	-1	+1
10	10, 26	+1	-1	-1	+1
11	11, 27	-1	+1	-1	+1
12	12, 28	+1	+1	-1	+1
13	13, 29	-1	-1	+1	+1
14	14, 30	+1	-1	+1	+1
15	15, 31	-1	+1	+1	+1
16	16, 32	+1	+1	+1	+1
17	33, 34, 35, 36	0	0	0	0

O programa experimental foi dividido em três diferentes fases, onde basicamente: a fase 1, correspondeu à coleta, preparação e caracterização dos materiais utilizados; na fase 2 foram moldadas os corpos de prova, submetidas à cura, e realizados nas respectivas idades os ensaios laboratoriais; por fim, na fase 3 foram realizadas as interpretações e análises dos resultados. Na Tabela 4.4, pode-se observar de forma mais detalhada, a divisão do programa experimental elaborado.

Tabela 4.4 – Programa Experimental

Fase 1	Coletas, Preparações e Caracterização dos materiais	Areia de Osório	Caracterização	Massa Específica Real dos grãos
		Resíduo de Telha Esmaltada		Análise granulométrica
		Cal de Carburato		Mineralogia por difração de raio-X (DRX)
		Ativadores Alcalinos		Análise química por fluorescência de raio-X (FRX)
Fase 2	Avaliação do efeito dos fatores controláveis no comportamento mecânico das misturas.	Moldagem e cura dos corpos de prova	Ensaios	Ensaios de compactação
				Resistência à compressão simples
				Rigidez
				Durabilidade
Fase 3	Comparações de resultados	Interpretação e Análise dos Resultados	Abordagem	Análise estatística dos ensaios de resistência à compressão simples e módulo de cisalhamento inicial
				Relação dos resultados obtidos com o parâmetro η/Biv ;
				Análise dos parâmetros de resistência e envoltória de ruptura do <i>simple shear</i> .

4.2 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os métodos utilizados para analisar as composições químicas e físicas dos materiais e os ensaios de resistência, rigidez e durabilidade, realizados para analisar o comportamento geomecânico do solo granular estabilizado.

4.2.1 Procedimentos Experimentais

4.2.1.1 Ensaio de Fluorescência Raios X

Para determinar a composição química do precursor a ser utilizado, foi realizada a técnica instrumental chamada espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). A partir deste ensaio

é possível estabelecer as proporções e concentrações de cada elemento químico existente no material.

Para isso é aplicada uma fonte de energia elevada que interage com os átomos provocando excitação entre eles, promovendo elétrons de camadas internas às camadas externas, liberando energia. A emissão de energia possui características específicas, o que possibilita a detecção, identificação e quantificação de cada elemento.

Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Análise e Identificação de Materiais do Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias do RS, localizado na Universidade de Passo Fundo. Para análise das amostras, foram confeccionadas pastilhas com auxílio de uma Prensa Manual Fluxana à 25 tons, utilizando o material estudado misturado com aditivo Wax Panalytical® em uma dosagem de 1g de aditivo e 8g de material. O método de análise utilizado foi o Equi-Oxides na programação do equipamento, tendo o espectro gerado avaliado pelo *software Spectra EDX*, sem curva de calibração específica.

4.2.1.2 Difratomia de Raios X

O ensaio de difratometria de raios X (DRX) corresponde uma técnica para a caracterização mineralógica ou identificação de minerais de um material. Esta técnica consiste na incidência de uma radiação no material estudado, permitindo a caracterização e análise dos arranjos atômicos na rede cristalina através do fenômeno de difração de raios X.

Os ensaios foram realizados pelo Laboratório de Análise e Identificação de Materiais do Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Jóias do RS, localizado na Universidade de Passo Fundo. Os resultados obtidos pelos ensaios foram tratados no *software Diffrac Eva* versão 5.0, sendo utilizada a base de dados *Crystallography Open Database Inorganic* para efetuar o cruzamento de picos e identificação de minerais.

4.2.1.3 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica dos materiais foi determinada através de ensaios propostos pela norma ABNT NBR 7181:2018. Esta norma, contempla técnicas específicas para análise granulométrica de materiais geotécnicos, estabelecendo métodos por peneiramento, ou por combinação entre peneiramento e sedimentação. Nesta pesquisa, o método utilizado para a caracterização do resíduo cerâmico foi o de sedimentação.

4.2.1.4 Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos consiste na relação entre a massa e o volume de um grão de solo. Para determinar esta relação as diretrizes utilizadas são descritas pela norma ABNT NBR 6458 (ABNT, 2016), que descreve a metodologia de determinação desta propriedade. Para a determinação da massa específica dos grãos do solo granular e do resíduo cerâmico vermelho foi utilizado o método do picnômetro, pois a granulometria de ambos os materiais se apresentou passante na abertura de malha de 4,8mm.

4.2.1.5 Compactação

Conforme as diretrizes da NBR 7182 (ABNT, 2020) o ensaio de compactação é realizado com o objetivo de verificar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo alcançado, com energias de compactação normal, intermediária e modificada.

Nesta pesquisa, foram realizadas duas curvas de compactação, cujas dosagens foram de 75% de areia de Osório e 25% de resíduo de telha esmaltada (RTE) para a primeira curva e para a segunda curva, 75% de areia de Osório e 25% de ligante álcali ativado, sendo o este composto por 70% de RTE e 30% de cal de carbureto. Ambos os ensaios foram executados com energias de compactação modificada.

4.2.1.6 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados com base nas diretrizes descritas pela norma brasileira ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova foram ensaiados em uma prensa mecânica com capacidade de carga de 100 kN, com deslocamento controlado até a ruptura.

Para a realização dos ensaios, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50mm de diâmetro e 100mm de altura (Figura 4.1), após a moldagem, os corpos de prova foram curados por períodos de 7 e 28 dias em temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$).



Figura 4.1 – Corpos provas moldados para o ensaio de resistência à compressão simples (Autora, 2022).

Passado o período de cura, os corpos de prova foram submergidos em um recipiente com água por um período de 24 horas, para certificar a saturação e reduzir os efeitos de sucção no comportamento mecânico. Após este procedimento, os corpos de prova foram ensaiados e foram coletados os resultados. Na Figura 4.2 é possível observar o ensaio de um corpo de prova no equipamento.



Figura 4.2 – Ensaio de resistência à compressão simples (Autora, 2022).

4.2.1.6 Módulo de Cisalhamento (G_0)

O ensaio de rigidez das amostras foi realizado em conformidade com a norma norte-americana ASTM D2845 (ASTM, 2008), através do equipamento *Pundit Lab Plus*, que avalia a rigidez das amostras por ensaios de velocidades de pulsos ultrassônicos não destrutivos.

A medição dessas velocidades foi feita a partir do tempo de propagação das ondas de compressão (P) e cisalhamento (S) que se propaga, através dos corpos de prova durante o ensaio. As ondas são induzidas pela vibração de transdutores a uma frequência de 54 kHz, para realizar a leitura da medida da onda P e a uma frequência de 250 kHz, para a leitura da onda S.

As velocidades das ondas de compressão (V_p) e de cisalhamento (V_s) são determinadas pela relação entre a altura média dos corpos de prova e o tempo de propagação das ondas, que é estabelecido pelo tempo médio de três leituras. Com isso, é estabelecida uma relação entre as velocidades e parâmetros físicos pela Teoria da Elasticidade.

Os parâmetros a serem obtidos por estas relações são: o módulo de cisalhamento (G_0) pela Equação (4.1), coeficiente de Poisson (ν) pela equação (4-2), e módulo de elasticidade dinâmico (E_0) pela equação (4-3).

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad 4.1$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad 4.2$$

$$E_0 = 2G_0 (1 + \nu) \quad 4.3$$

4.2.1.7 Durabilidade

O ensaio de durabilidade tem como objetivo avaliar a perda de massa das amostras, avaliando a deterioração do material por ciclos de molhagem, secagem e escovação. Regido pelas diretrizes da norma norte-americana ASTM D559 (ASTM, 2015), foram moldados os corpos de prova cilíndricos de dimensões definida por 100mm de diâmetro e 127mm de altura que após a moldagem, foram deixados em imersão em água durante um período de 5 horas.

Passando este período, os corpos de prova foram levados a uma estufa com temperatura de 71 ± 3 °C durante um período de 48 horas. Os corpos de prova (CP) foram retirados da estufa, foram medidas suas massas e foi realizada a escovação das faces laterais dos CPs com uma escova de aço, com força aproximada a 13-15kN, por 28 vezes, sendo 20 nas laterais, 4 na base e 4 no topo do CP.

A massa do CP foi verificada novamente e comparada com a massa inicial do ciclo para a análise de perda de massa durante a ciclagem. Este processo foi repetido 12 vezes, para a obtenção e análise dos resultados.

4.2.1.8 Simple Shear

O ensaio *simple shear* é utilizado na geotecnia para a obtenção dos parâmetros de resistência de materiais geotécnicos. Análogo ao ensaio triaxial, o equipamento e os corpos de prova são instrumentados com medidores para registrar o comportamento do material durante o ensaio, para a obtenção dos resultados. Para isso, os resultados do ensaio simple shear, são gerados em volts e através dos coeficientes de calibração é feita a transformação das unidades para as grandezas padronizadas. As medidas registradas ao decorrer do ensaio, são:

- Tensão Horizontal: medida através do transdutor de pressão.
- Poropressão: medida através do transdutor de pressão, que mede a contrapressão e a variação de poropressão ao longo do ensaio.
- Tensão Vertical: medida através da célula de carga vertical somada às medidas de pressão confinante.
- Tensão Cisalhante: medida através da célula de carga horizontal.
- Deformações: deformação axial e deformação cisalhante através dos LVDT's vertical e horizontal, respectivamente.

Realizadas as etapas de calibração e instrumentação, é realizada a percolação, seguida da saturação da amostra. Por fim, a amostra é consolidada sob condição drenada e então cisalhada sob condição não drenada.

Corte (2016), afirma que o *simple shear* é mundialmente utilizado para medição da resistência e rigidez dos solos, sendo o único capaz de submeter uma amostra a condições planas de deformação, mantendo o volume constante e permitindo a rotação das tensões principais. O ensaio pode ser realizado sob condições de carregamento monotônico e cíclico, os quais representam situações frequentes de campo.

Alguns autores (RANDOLPH E WROTH, 1981; ANDERSEN *et al*, 1980; FESTUGATO, 2011) comparam as condições do ensaio a frequentes situações de campo, como: plataformas offshore com base gravitacional, módulo de cisalhamento adjunto ao fuste de uma estaca, carregamento em ferrovias, rodovias e aerovias, bem como estruturas específicas submetidas a carregamentos cíclicos.

De acordo com Doherty e Fahey (2011), para que as condições planas de deformação sejam satisfeitas, é necessário evitar qualquer mudança na área de corte transversal, mantendo fixa a altura da amostra e impondo condições de volume constante. A Figura 4.3, apresenta a esquematização das definições básicas do ensaio.

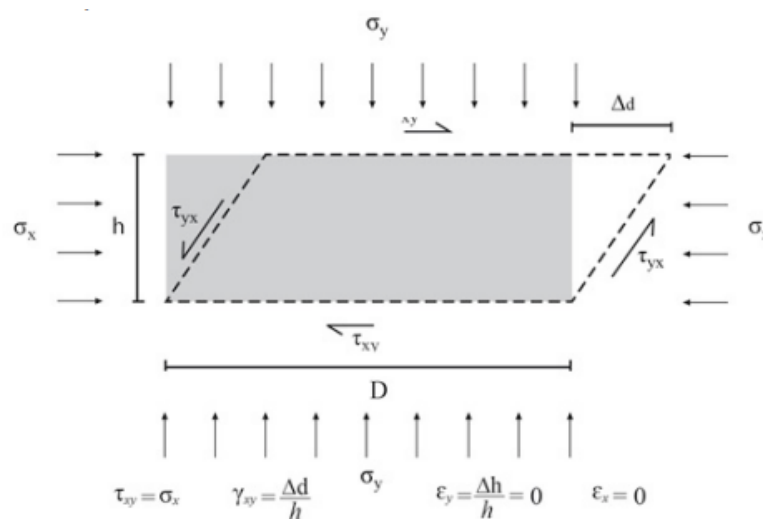


Figura 4.3 - Definições básicas da análise do *simple shear* (Corte, 2016).

Segundo Corte (2016), para a realização do ensaio com o equipamento Berkeley, UWA (utilizado no LEGG), deve-se impedir a drenagem do fluido dos poros da amostra. O excesso de poropressão gerado por meio da rigidez do fluido, impede a alteração de volume da amostra obedecendo assim as condições de deformação plana e altura constante. Desta forma, realizar o ensaio em condições drenadas implica na variação volumétrica da amostra fazendo com que, as condições planas de deformação e volume constante não sejam satisfeitas.

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

4.3.1 Solo granular

O solo granular que será utilizado nesta pesquisa, será a areia de Osório – RS, utilizada com frequência em pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG). Este material é proveniente da cidade de Osório, localizada cerca de 100 km de distância da cidade de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, como pode ser observado na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Município de Osório/RS (Cruz, 2008).

Segundo Cruz (2008), esta areia possui comportamento semelhante a areias estudadas em outras partes do mundo, possuindo granulometria fina, pouco graduada, de cor clara e sem conteúdo orgânico. Spinelli (1999) afirma que 99% da composição mineralógica deste material é de quartzo, tendo o restante composto por glauconita, magnetita, turmalina, ilmenita.

Após a obtenção do material, este foi alocado em uma estufa com temperatura de 100°C, para o processo de secagem. Com o material seco, este foi peneirado com a peneira de malha #10 (abertura de 2 mm). Na Figura 4.5 pode-se observar a curva granulométrica do material, determinado por Silvano (2020), onde foi empregado o método de peneiramento, realizado segundo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2018).

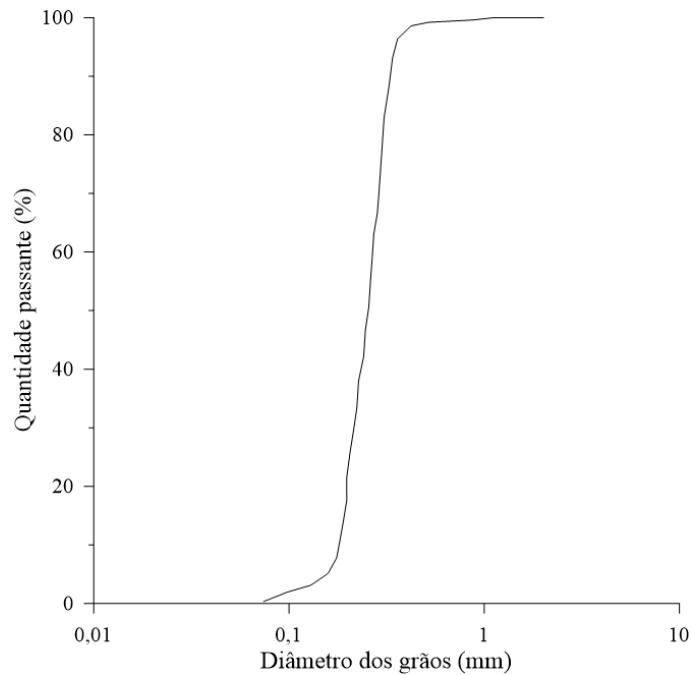


Figura 4.5 – Curva granulométrica Areia de Osório/RS (Adaptado de Silvano, 2020).

Em seguimento, na Tabela 4.5, pode-se observar as propriedades físicas da areia de Osório determinadas por Silvano (2020), onde o peso específico real dos grãos (G_s) foi obtida através das diretrizes da NBR 6458 (ABNT, 2016) e as frações granulométricas são definidas na NBR 6502 (ABNT, 2016).

Tabela 4.5 – Propriedades Físicas da Areia de Osório

Propriedades	Valores
Peso Específico Real dos Grãos (G_s)	2,61 g/cm ³
% Pedregulho ($d > 2$ mm)	0 %
% Areia Grossa ($0,6 < d < 2$ mm)	0,6 %
% Areia Média ($0,2 < d < 0,6$ mm)	47 %
% Areia Fina ($0,06 < d < 0,2$ mm)	48 %
% Silte ($0,002 < d < 0,06$ mm)	4%
% Argila ($d < 0,002$ mm)	0,4 %

Fonte: Silvano (2020).

4.3.2 Resíduo de Polimento Cerâmico

O resíduo de telha esmaltada obtido, apresenta cor avermelhada e granulometria de fração fina. Foram fornecidos cerca de 80kg de material pelo Grupo R. Casagrande, situado em Curitiba/PR, mais especificamente pela empresa Telha Perkus, especialista em coberturas de alta performance.

Após a obtenção do material, este foi alocado em uma estufa com temperatura de 100°C, para o processo de secagem. Com o material seco, este foi peneirado com a peneira de malha #200 (abertura de 75 μm). Com o material passante na peneira #200, realizou-se o ensaio de granulometria por sedimentação, segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018). Na Figura 4.6 pode-se observar o diagrama granulométrico do material.

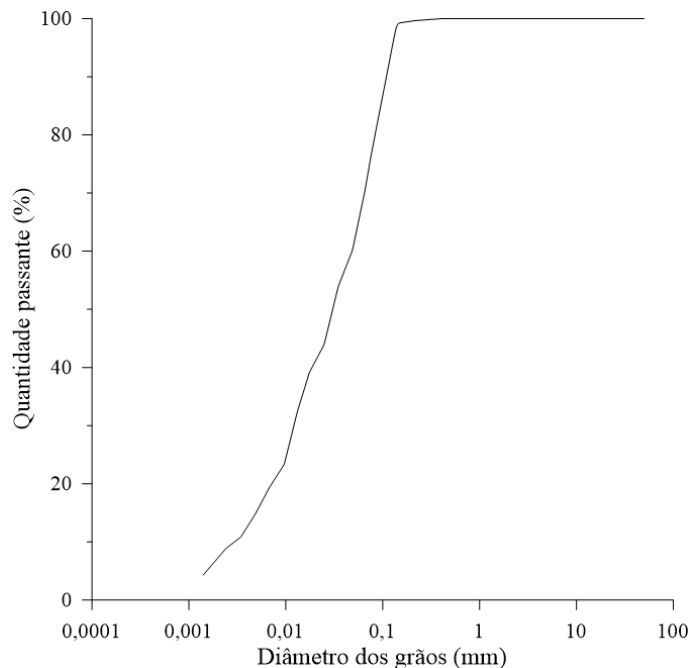


Figura 4.6 – Curva granulométrica resíduo de telha esmaltada (RTE) (elaborado pela Autora, 2020).

Em seguimento, na Tabela 4.6, pode-se observar as propriedades físicas do RTE, onde o peso específico real dos grãos (Gs) foi obtida através das diretrizes da NBR 6458 (ABNT, 2016) e as frações granulométricas são definidas na NBR 6502 (ABNT, 2016).

Tabela 4.6 – Propriedades Físicas do RTE

Propriedades	Valores
Peso Específico Real dos Grãos (Gs)	2,68 g/cm ³
% Pedregulho (d > 2 mm)	0 %
% Areia Grossa (0,6 < d < 2 mm)	0 %
% Areia Média (0,2 < d < 0,6 mm)	0,4 %
% Areia Fina (0,06 < d < 0,2 mm)	29,0 %
% Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	27,0 %
% Argila (d < 0,002 mm)	43,6 %

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), o resíduo proveniente de telhas cerâmicas é classificado como N (argila calcinada), sendo considerado uma pozolana artificial. A norma define essas argilas como materiais calcinados em temperaturas elevadas em intervalos entre 500 até 900 °C. A Tabela 4.7 apresenta a composição química do RTE, realizada através do ensaio de fluorescência de raios-X (FRX).

Tabela 4.7 – Composição química do RTE.

Material	Resultados (%)
Dióxido de Silício (SiO ₂)	64,60
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	19,07
Óxido de Ferro II (Fe ₂ O ₃)	5,67
Óxido de Potássio (K ₂ O)	5,20
Óxido de Magnésio (MgO)	2,60
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,80
Óxido de Cálcio (CaO)	0,65
Dióxido de Titânio (TiO ₂)	0,63
Dióxido de Manganês (MnO)	0,10
Óxido de Bário (BaO)	0,09
Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0,08
Dióxido de Zircônio (ZrO ₂)	0,07
Cloro (Cl)	0,06
Óxido de Zinco (ZnO)	0,06
Óxido de Rubídio (Rb ₂ O)	0,05

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Nota-se por meio da análise química que a composição majoritária do RTE é feita por óxidos de silício e alumínio. Na Figura 4.7, consta o resultado do ensaio de difratometria de raios-X (DRX).

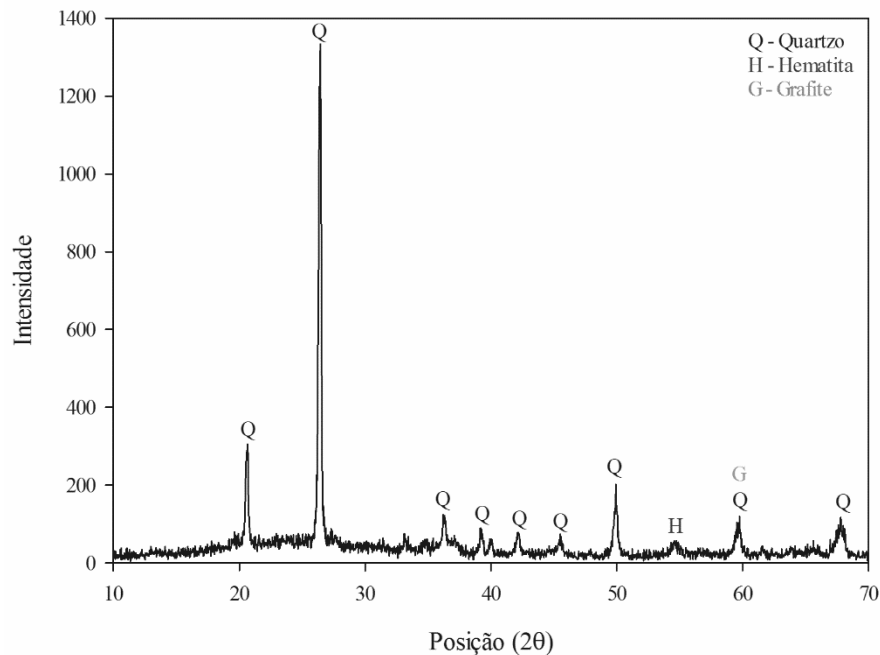


Figura 4.7 – Difratoograma do resíduo do RTE (Elaborado pela Autora, 2022).

A partir do difratograma apresentado na Figura 4.7, pode-se observar evidência nas fases cristalinas do material, possibilitando a utilização do mesmo para fins de álcali ativação.

4.3.3 Cal de Carbureto

A cal de carbureto (CC), é um material (resíduo) gerado a partir da produção do gás acetileno. Esse material é utilizado frequentemente em pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG), voltadas para estabilização alcalina de solos. Assim que o material foi obtido, este foi levado a uma estufa, com temperatura de 100°C, para o processo de secagem. Em seguimento, o material foi passado por uma peneira de malha #200 (abertura de 75 µm). Na Figura 4.8 pode-se observar o diagrama granulométrico do material, determinado por Silvano (2020), onde foi empregado o método de granulometria à laser pelo laboratório LACER, com o equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser*.

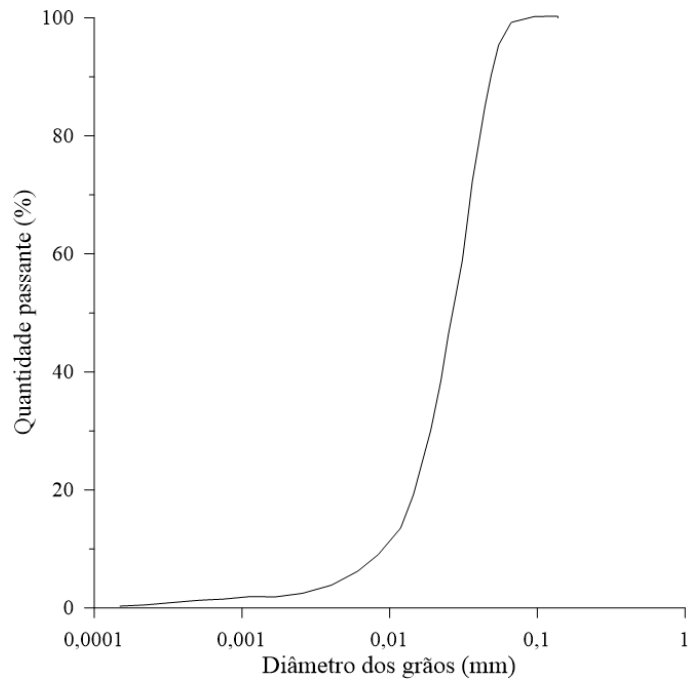


Figura 4.8 – Curva granulométrica Cal de Carbureto (Adaptado de Silvano, 2020).

Na Tabela 4.8, pode-se observar as propriedades físicas da cal de carbureto, onde o peso específico real dos grãos (Gs) foi obtida através das diretrizes da NBR 6508 (ABNT, 1984) e as faixas granulométricas do material, segundo o ensaio de granulometria à laser.

Tabela 4.8 – Propriedades Físicas da CC

Propriedades	Valores
Peso Específico Real dos Grãos (Gs)	2,19 g/cm ³
% Pedregulho (d > 2 mm)	0 %
% Areia Grossa (0,6 < d < 2 mm)	0 %
% Areia Média (0,2 < d < 0,6 mm)	0 %
% Areia Fina (0,06 < d < 0,2 mm)	1,50 %
% Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	96,50 %
% Argila (d < 0,002 mm)	2,00 %

Fonte: Adaptado de Silvano (2022)

Na Tabela 4.9, é apresentada a composição química da cal de carbureto, realizada através do ensaio de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 4.9 – Composição química da CC.

Material	Resultados (%)
Óxido de Cálcio (CaO)	94,81
Óxido de Silício (SiO ₂)	2,24
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	0,77
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	0,60
Óxido de Magnésio (MgO)	0,60
Óxido de Ferro II (Fe ₂ O ₃)	0,27
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,25
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	0,23
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,17

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Nota-se por meio da análise química, que a composição majoritária do CC é constituída predominantemente por óxido de cálcio. Na Figura 4.9, consta o resultado do ensaio de difratometria de raios-X (DRX).

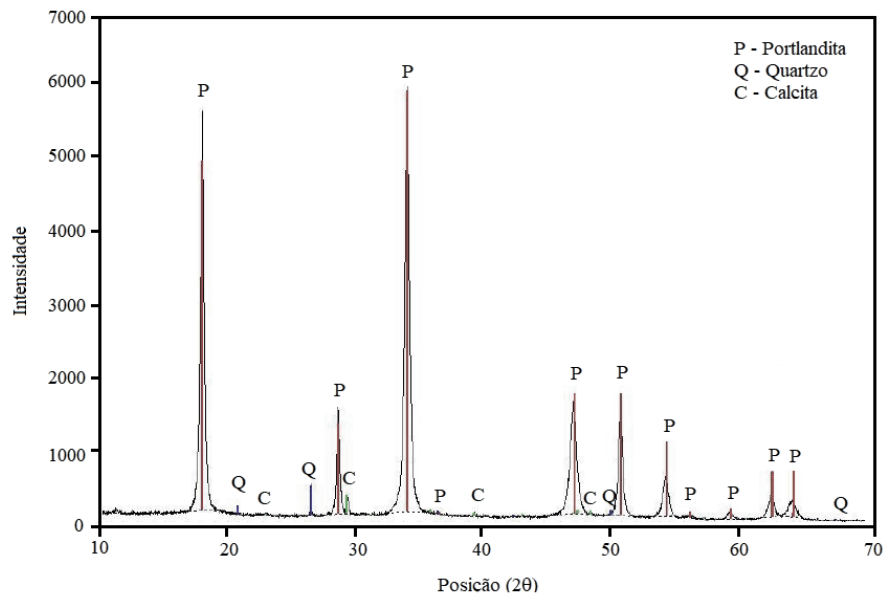


Figura 4.9 – Difratograma do resíduo do CC (Elaborado pela Autora, 2022).

A partir do difratograma apresentado na Figura 4.9, pode-se observar evidência nas fases cristalinas do material, possibilitando a utilização do mesmo para fins de álcali ativação.

4.3.4 Compactação

A fim de obter a umidade ótima e o peso específico aparente seco do solo estabilizado, foram realizados ensaios de compactação. O primeiro ensaio, foi realizado com areia e 25% de resíduo

cerâmico com energia de compactação modificada e o segundo ensaio foi realizado com 25% de ligante, sendo este composto por 70% de RTE e 30% de CC. O valor de 25%, utilizado corresponde a um valor intermediário entre os teores de ligante utilizados na pesquisa. Na Figura 4.10, pode-se observar os resultados dos ensaios de compactação.

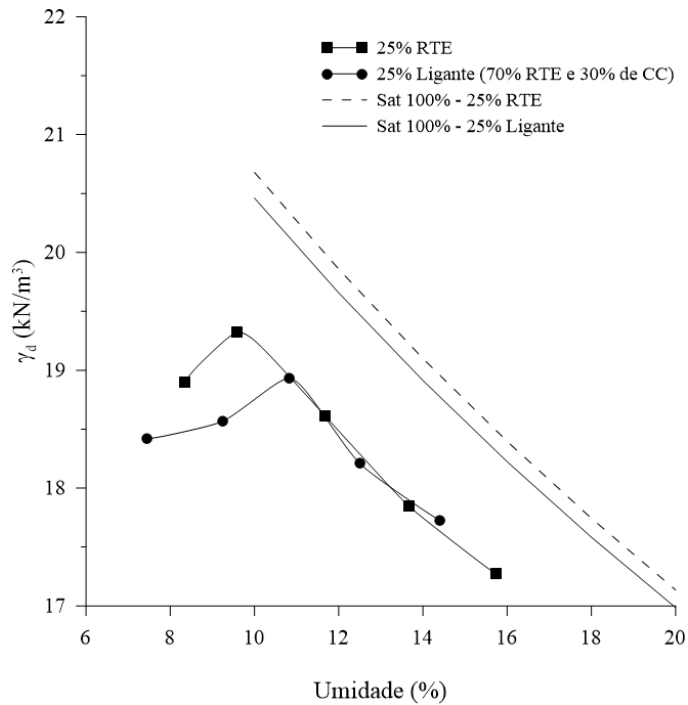


Figura 4.10 - Ensaio de compactação Proctor (Elaborado pela autora, 2022)

Observando o gráfico, observa-se que para o ensaio com 25% de RTE, o resultado para o teor de umidade ótima foi de 9,6% e o peso específico aparente seco máximo foi de 19,32 kN/m³. Para o ensaio com 25% de ligante (70% de RTE e 30% de CC), nota-se um aumento da umidade ótima para 10,81% e uma redução do peso específico aparente seco para 18,93 kN/m³. Para a realização da pesquisa foram definidos uma umidade de 11% e pesos específicos aparentes secos de 18 e 16 kN/m³. Estes valores foram determinados por conta da limitação do macaco hidráulico utilizado na moldagem dos corpos de prova.

4.3.5 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, é uma base inorgânica com alta solubilidade em água. Comumente é encontrado no mercado como um sólido cristalino, que quando diluído em água reage de forma exotérmica, liberando calor proporcionalmente a concentração da solução. Este material possui a capacidade de elevar o pH de uma mistura e

consequentemente facilitar a ocorrência das reações pozolânicas ao longo do tempo, em função do meio básico. O NaOH será utilizado como um dos ativadores alcalinos nesta pesquisa, apresentando segundo Silvano (2020), uma pureza de 98% e densidade real dos grãos de 2,12 g/cm³.

4.3.6 Silicato de Sódio

Semelhante ao hidróxido de sódio, o silicato de sódio também possui a capacidade de elevar o pH de uma mistura e facilitar, por meio disto, a ocorrência de reações pozolânicas em meio básico, com o passar do tempo. Entretanto, este material possui porcentagens de óxido de silício, que em condição livre, reagem juntamente ao teor de álcalis existente na composição, reagindo com os demais materiais empregados e gerando produtos de reação. Na Tabela 4.10 estão apresentadas as propriedades do silicato de sódio empregado nesta pesquisa.

Tabela 4.10 – Propriedades do silicato de sódio

Propriedades	Valores
Peso Específico Real dos Grãos (Gs)	2,61 g/cm ³
Na ₂ O	18 %
Na ₂ SiO ₃	63 %
H ₂ O	19 %
Módulo de Sílica (Ms)	3,5

Fonte: Dinâmica – Química Contemporânea

4.3.7 Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos de prova será a água destilada. Para obtenção deste material, será realizado o processo de destilação a partir da água obtida da rede de distribuição pública de Porto Alegre. Este procedimento será realizado no LEGG.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e análises obtidos através dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u), módulo de cisalhamento inicial (G_0), durabilidade e simple shear.

Os resultados de resistência à compressão simples e módulo de cisalhamento inicial, foram identificados através dos tratamentos obtidos pelo projeto de experimentos. Foram 17 tratamentos realizados, tendo como fatores controláveis o peso específico aparente seco (γ_d), teor de ligante, módulo de sílica (M_s) e tempo de cura. A partir da Tabela 5.1, é possível observar as dosagens obtidas para cada tratamento.

Tabela 5.1 – Tratamentos dos corpos de prova pelo projeto de experimentos

Tratamentos	γ_d (kN/m ³)	Ligante (%)	Módulo de Sílica (M_s)	Cura (dias)
1	16	20	1	7
2	18	20	1	7
3	16	30	1	7
4	18	30	1	7
5	16	20	2	7
6	18	20	2	7
7	16	30	2	7
8	18	30	2	7
9	16	20	1	28
10	18	20	1	28
11	16	30	1	28
12	18	30	1	28
13	16	20	2	28
14	18	20	2	28
15	16	30	2	28
16	18	30	2	28
17	17	25	1,5	17,5

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 5.1, ilustra os resultados dos tratamentos estatísticos, obtidos pelo ensaio de resistência à compressão. A determinação dos resultados foi realizada através da média simples entre os resultados das amostras, dentro de cada tratamento.

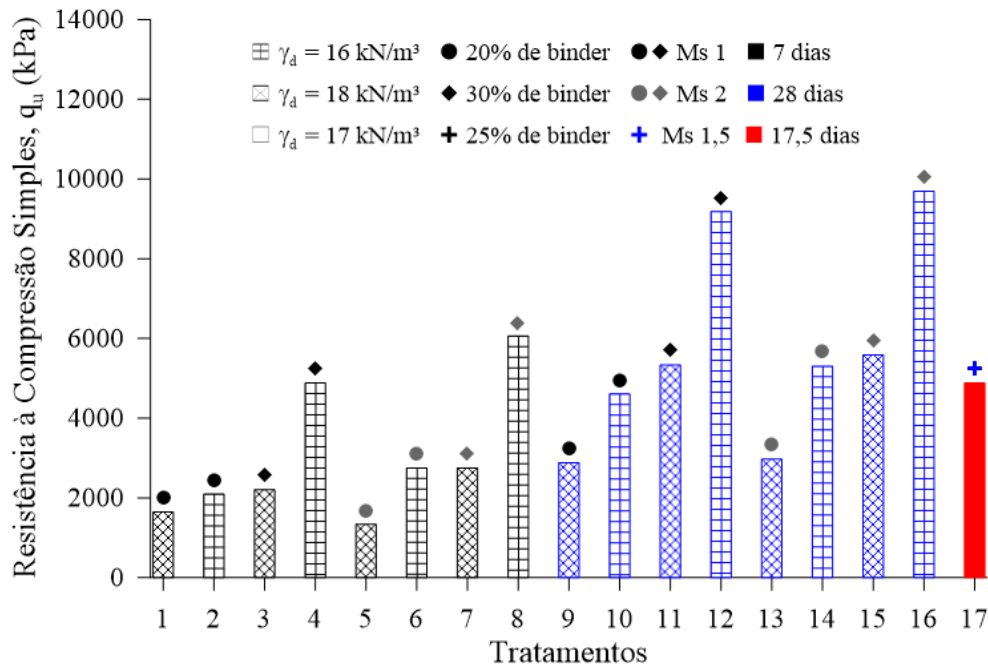


Figura 5.1 – Resultados médios de resistência à compressão simples (Elaborado pela autora, 2022)

A partir da Figura 5.1, é possível observar que o melhor resultado geral foi o tratamento de número 16, que corresponde a dosagem de peso específico aparente seco igual a (γ_d) 18 kN/m³, teor de ligante de 30%, módulo de sílica (Ms) igual a 2 e cura de 28 dias. Para o período de 7 dias de cura o melhor resultado compreende ao tratamento de número 8, que corresponde a mesma dosagem que o tratamento 16, modificando apenas o período de cura. Os resultados médios de resistência à compressão simples para os tratamentos 16 e 8 foram de 9688 kPa e 6058 kPa respectivamente. Nota-se de maneira geral, que o aumento dos fatores controláveis resultou em maiores resultados de resistência.

Sendo assim, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos, onde foi possível evidenciar os efeitos de cada fator controlável de forma individual e interativa, através do gráfico de Pareto exibido na Figura 5.2. Os resultados dos ensaios individuais são apresentados no apêndice A e as tabelas referentes a análise estatística de variância (ANOVA), no apêndice B.

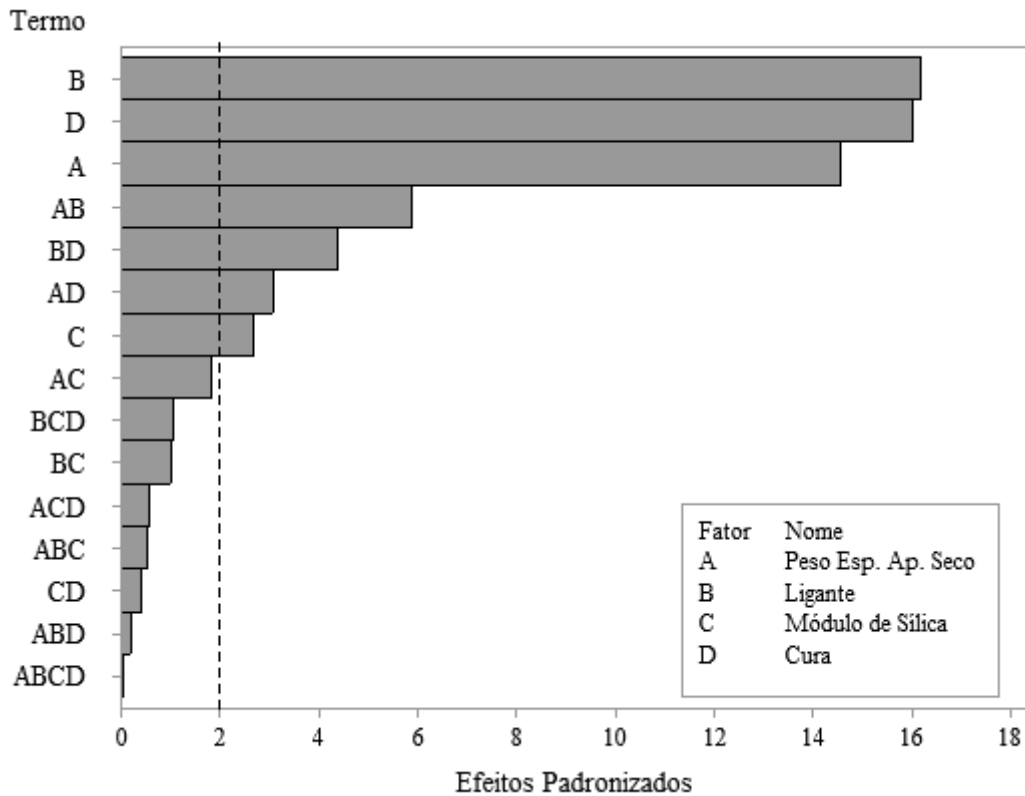


Figura 5.2 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados da resistência à compressão simples (Elaborado pela autora, 2022).

A partir dos dados apresentados na Figura 5.2, é possível observar que os resultados de resistência à compressão simples das amostras, indicam como fatores principais os termos B, D, A, bem como os termos AB, BD, AD e C, em segunda ordem, sendo os três primeiros correspondentes a interação entre os fatores principais e o quarto termo referente ao módulo de sílica.

As demais interações (AC, BCD, BC, ACD, ABC, CD, ABD E ABCD) não apresentaram influência significativa na variável resposta. A respeito dos fatores que apresentaram maior influência na variável resposta, o teor de ligante (B) foi tido como fator principal, seguido pelo tempo de cura (D), peso específico aparente seco (A), interação entre peso específico aparente seco e teor de ligante (AB), interação entre teor de ligante e tempo de cura (BD), interação entre peso específico aparente seco e tempo de cura (AD) e módulo de sílica (C).

Na faixa de variação investigada, nota-se que o teor de ligante (B), apresentou-se como fator principal. Este fato pode ser explicado, devido a quantidade de reações pozolânicas existentes no ligante álcali ativado, que resulta no aumento gradativo da resistência do material. O que explica também a influência do tempo de cura (D), como segundo fator principal, pois quanto

maior o tempo de cura, maior a quantidade de reações que influenciam no comportamento mecânico.

O peso específico aparente seco (A), apresentou-se como terceiro fator principal. Sendo explicado, pelo maior número de contato intergranular, o que a reduz a porosidade, gerando uma maior mobilização de atrito entre as partículas e, conseqüentemente, aumentando a resistência.

Nota-se também que o módulo de sílica (C), em menor magnitude, também apresentou significativa influência na variável resposta. O que pode ser explicado pelas reações imediatas ocorridas entre íons de Ca^{2+} , provenientes da cal de carbureto, com as moléculas de sílica livres, provenientes do silicato de sódio (Na_2SiO_3), formando produtos de reação como C-S-H ou (C,N)-S-H em períodos relativamente curtos. Este processo ocorre juntamente ao processo de álcali ativação, conferindo maior resistência ao material, dentro faixa estudada.

A partir dos resultados obtidos através da análise estatística, também foi possível avaliar a influência dos fatores principais de forma isolada e por interação. Na Figura 5.3 é apresentado o gráfico dos efeitos principais para a variável resposta e na Figura 5.4 o gráfico de interação dos fatores.

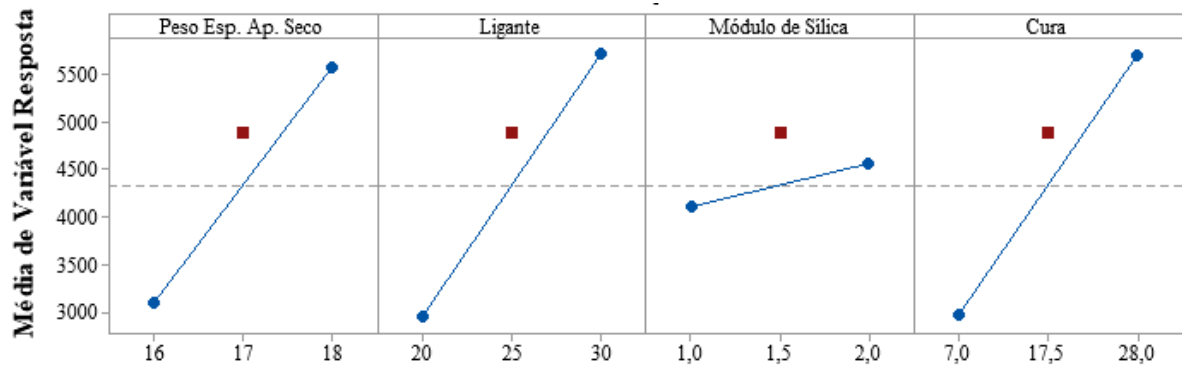


Figura 5.3 – Gráfico de efeitos principais para variável resposta (Elaborado pela autora, 2022).

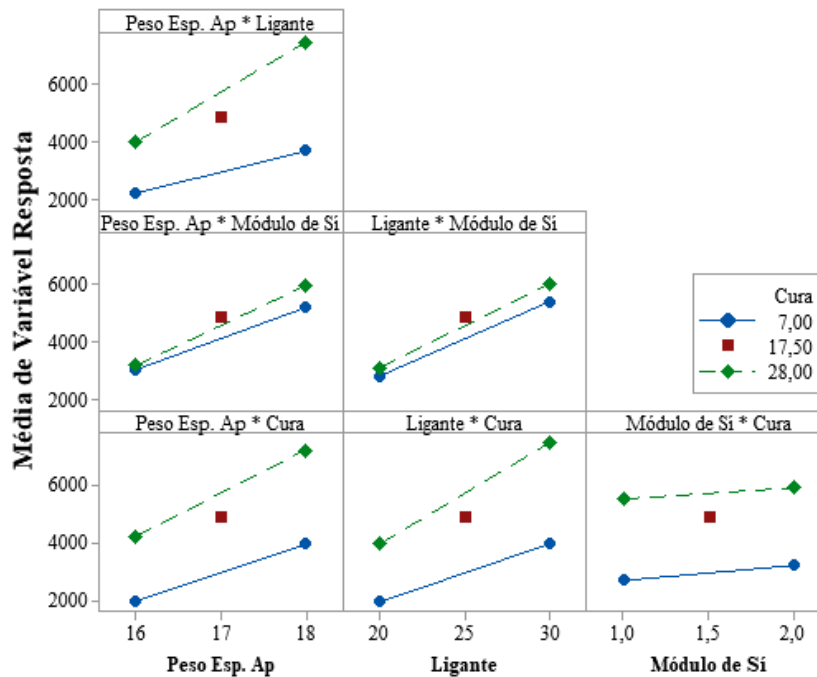


Figura 5.4 – Gráfico de interação para variável resposta (Elaborado pela autora, 2022).

A partir das Figuras 5.3 e 5.4, pode-se observar que os fatores principais, assim como as interações entre fatores, possuem significativa influência na variável resposta, corroborando para resultados positivos. Isto é, o aumento dos fatores incide no aumento da resistência das amostras.

5.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO INICIAL (G_0)

Os resultados para o módulo de cisalhamento inicial, também foram identificados através dos tratamentos obtidos pelo projeto de experimentos (ver Tabela 5.1). Foram 17 tratamentos realizados, tendo como fatores controláveis o peso específico aparente seco (γ_d), teor de ligante, módulo de sílica (M_s) e tempo de cura.

A Figura 5.5, ilustra os resultados dos tratamentos estatísticos, obtidos pelos ensaios. A determinação dos resultados foi realizada através da média simples entre os resultados dos corpos de prova, dentro de cada tratamento.

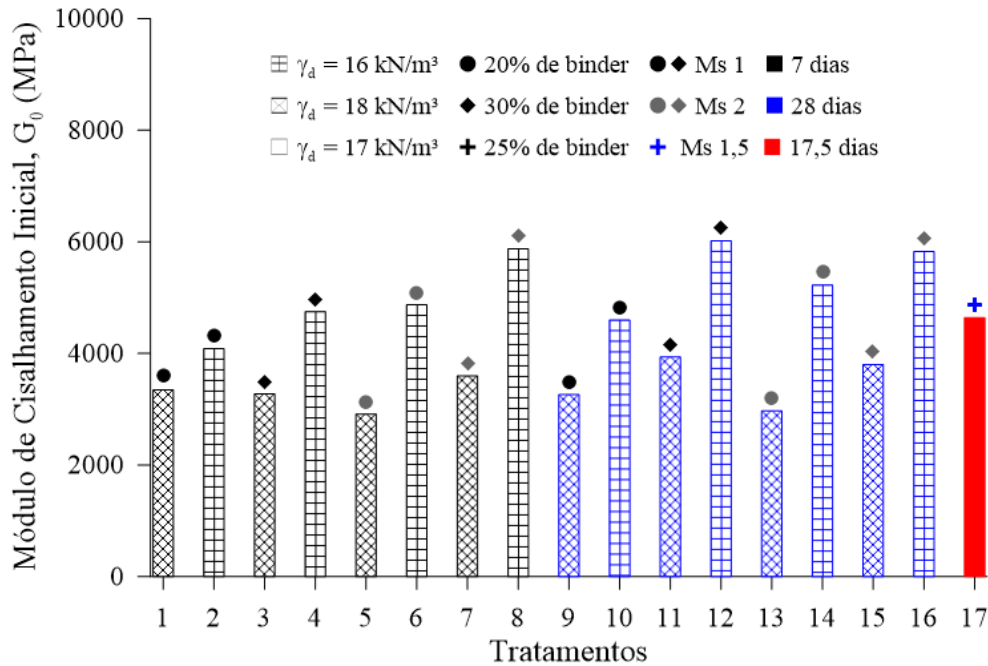


Figura 5.5 – Resultados médios do módulo de cisalhamento inicial (Elaborado pela autora, 2022)

A partir da Figura 5.5, é possível observar que o melhor resultado geral foi o tratamento de número 12, que corresponde a dosagem de peso específico aparente seco igual a (γ_d) 18 kN/m³, teor de ligante de 30%, módulo de sílica (Ms) igual a 1 e cura de 28 dias. Para o período de 7 dias de cura o melhor resultado compreende ao tratamento de número 8, que corresponde a dosagem com peso específico aparente seco igual a (γ_d) 18 kN/m³, teor de ligante de 30%, módulo de sílica (Ms) igual a 1 e cura de 7 dias.

Nota-se que os tratamentos 13, 14, 15 e 16 apresentaram evolução desprezível em detrimento dos tratamentos de número 5, 6, 7 e 8 respectivamente. Isto é, o tempo de cura para os corpos de prova com módulo de sílica igual a 2, não apresentou influência nos resultados. Em contrapartida, os tratamentos de número 9, 10, 11, 12, apresentaram evolução em detrimento dos tratamentos 1, 2, 3, 4. O que indica influencia no tempo de cura, nos resultados das amostras como módulo de sílica igual a 1. Os resultados médios do módulo de cisalhamento inicial para os tratamentos 12 e 8 foram de 6016,42 MPa e 5872,17 MPa respectivamente. Nota-se de maneira geral, que o aumento dos fatores controláveis resultou em maiores resultados.

Sendo assim, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos, onde foi possível evidenciar os efeitos de cada fator controlável de forma individual e interativa, através do gráfico de Pareto exibido na Figura 5.6. Os resultados dos ensaios individuais são apresentados

no apêndice A e as tabelas referentes a análise estatística de variância (ANOVA), no apêndice B.

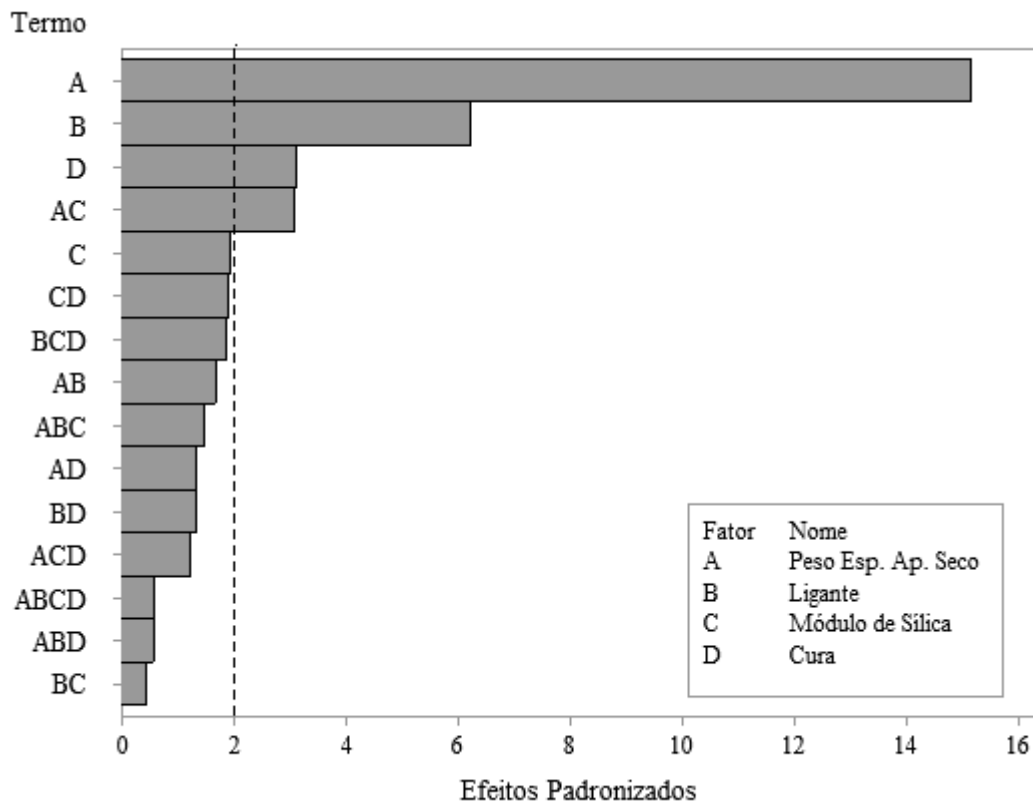


Figura 5.6 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados do módulo de cisalhamento inicial (Elaborado pela autora, 2022).

A partir dos dados apresentados na Figura 5.6, é possível observar que os resultados do módulo de cisalhamento, indicam como fator principal os termo A, bem como os termos B, D e AC, em segunda ordem.

As demais interações (C, CD, BCD, AB, ABC, AD, BD, ACD, ABCD, ABD e BC) não apresentaram influência significativa na variável resposta. A respeito dos fatores que apresentaram maior influência na variável resposta, o peso específico aparente seco (A) foi tido como fator principal, seguido pelo teor de ligante (B), tempo de cura (D) e interação entre peso específico aparente seco e módulo de sílica (AC).

Na faixa de variação investigada nota-se que o peso específico aparente seco (A), apresentou-se como fator principal. De acordo com Consoli *et al.*, (2011), o peso específico aparente seco é um fator que influencia altamente na resistência e rigidez de materiais estabilizados, isto é, o desempenho mecânico das amostras se relaciona diretamente com o grau de compactação. Como já abordado anteriormente, a redução da porosidade das amostras, resulta na aproximação

das partículas aumentando a quantidade de pontos de contato, contribuindo com a mobilização de atrito intergranular e conseqüentemente aumentando a resistência e rigidez do material.

O teor de ligante (B), se mostrou como segundo fator principal, visto que, neste caso, o teor de material cimentante é responsável pela quantidade reações pozolânicas que geram produtos de reação e conseqüentemente elevam as resistência e rigidez do material, como também já abordado anteriormente. O que também explica o tempo de cura (D), como terceiro fator principal, pelo fato das reações pozolânicas ocorrerem ao longo do tempo em um processo gradativo, resultando em maiores valores de resistência e rigidez em maiores períodos de cura.

Por fim, a interação entre o peso específico aparente seco e o módulo de sílica (AC) se mostraram como o quarto fator principal, o que pode ser explicado pela quantidade de reações imediatas ocorridas entre cátions de cálcio (Ca^{2+}) e as moléculas de sílica (SiO_2) livres, provenientes do silicato de sódio (Na_2SiO_3), formando produtos de reação em períodos relativamente curtos. Isto, ocorrendo de forma simultânea e interativa ao grau de compactação das amostras, aumentando os pontos de contato e elevando a rigidez do material em menores períodos de tempo.

A partir dos resultados obtidos através da análise estatística, também foi possível avaliar a influência dos fatores principais de forma isolada e por interação. Na Figura 5.7 é apresentado o gráfico dos efeitos principais para a variável resposta e na Figura 5.8 o gráfico de interação dos fatores.

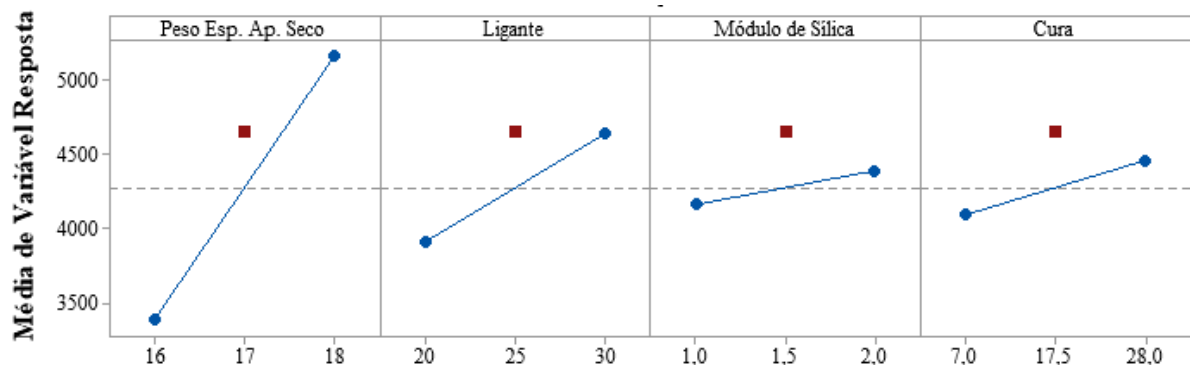


Figura 5.7 – Gráfico de Efeitos Principais para Variável Resposta (Elaborado pela autora, 2022).

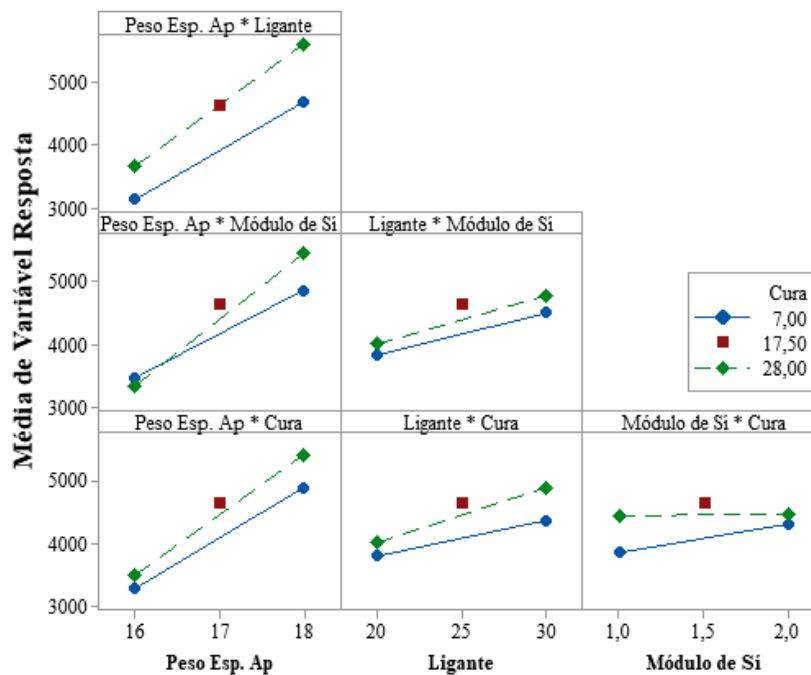


Figura 5.8 – Gráfico de Interação para Variável Resposta (Elaborado pela autora, 2022).

A partir das Figuras 5.7 e 5.8, pode-se observar que os fatores principais, assim como as interações entre fatores, possuem significativa influência na variável resposta, corroborando para resultados positivos. Isto é, o aumento no nível dos fatores incide no aumento da rigidez das amostras.

5.3 DURABILIDADE

A seleção das dosagens para a realização dos ensaios de durabilidade foi embasada na melhor e pior condição de comportamento mecânico, fundamentadas a partir dos ensaios de resistência à compressão simples. Esta medida foi tomada pelo fato deste procedimento experimental, demandar de altas quantidades de material, impossibilitando a realização de uma alta quantidade de ensaios. Sendo assim, foram utilizadas quatro dosagens, que podem ser observadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dosagens ensaiadas

Dosagem	γ_d (kN/m ³)	Teor de Ligante (%)	Módulo de Sílica (Ms)
1	18	30	1
2	16	20	1
3	18	30	2
4	16	20	2

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Com isso, foram realizados os ensaios obtendo-se os resultados de perda de massa individual (PMI) e perda de massa acumulada (PMA) das amostras. A partir da Figura 5.9, pode-se observar os resultados de perda de PMI.

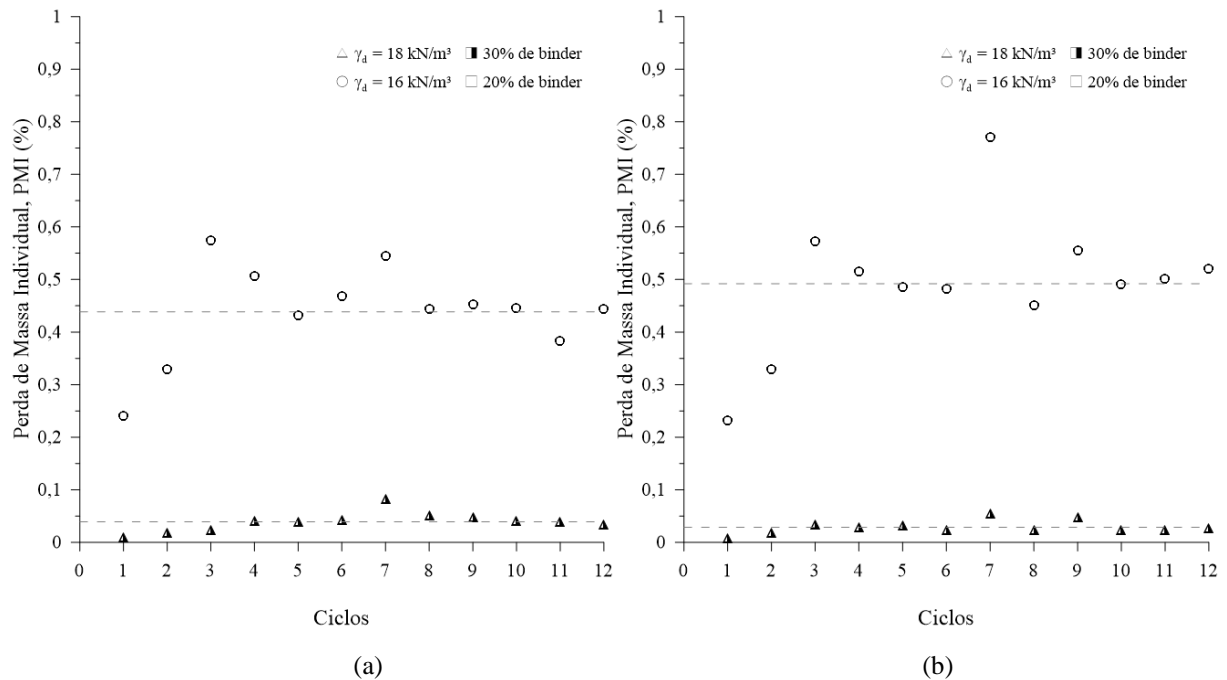


Figura 5.9 – Perda de Massa Individual (PMI) (a) Ms = 1; (b) Ms = 2
(Elaborado pela Autora, 2022)

Com a análise dos resultados da Figura 5.9, é possível observar que as dosagens com peso específico aparente seco de 16 kNm/m³ e 20% de ligante, de ambos os módulos de sílica, compõem a pior condição, apresentaram maior perda de massa individual, em detrimento das dosagens de 18 kN/m³ e 30% de ligante (melhor condição).

Ambas as dosagens da pior condição apresentaram crescimento gradativo da perda de massa nos três primeiros ciclos, apresentando uma perda maior no terceiro ciclo. Em contrapartida a PMI para as amostras com módulo de sílica de 1, apresentou menor variação entre as perdas ao longo dos ciclos em comparação com a dosagem de módulo de sílica igual a 2, que apresentou

um pico de perda individual no sétimo ciclo. Já as dosagens correspondentes a melhor condição, apresentaram pequena variabilidade entre si, apresentando perdas de massa individual regulares. Para melhor análise, os resultados médios de PMI podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Perda de Massa Individual Média

γ_d (kN/m ³)	Teor de Ligante (%)	Módulo de Sílica (Ms)	PMI (%)
18	30	1	0,04
16	20	1	0,44
18	30	2	0,03
16	20	2	0,49

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Pela análise referente aos resultados da Tabela 5.3, observa-se que nenhum dos resultados médios de PMI ultrapassa o valor de 0,5%, e ainda, a melhor condição apresenta valores menores que 0,05% apresentando uma PMI extremamente baixa, configurando um desempenho extremamente satisfatório. Também se observa, que a dosagens que compreendem um módulo de sílica igual a 2, apresentaram o melhor e o pior resultado em detrimento das demais, onde nota-se um comportamento semelhante ao desempenho, das mesmas dosagens, nos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias, as quais coincidentemente apresentaram o melhor e o pior resultado.

Os resultados de perda de massa acumulada (PMA), podem ser observados na Figura 5.10.

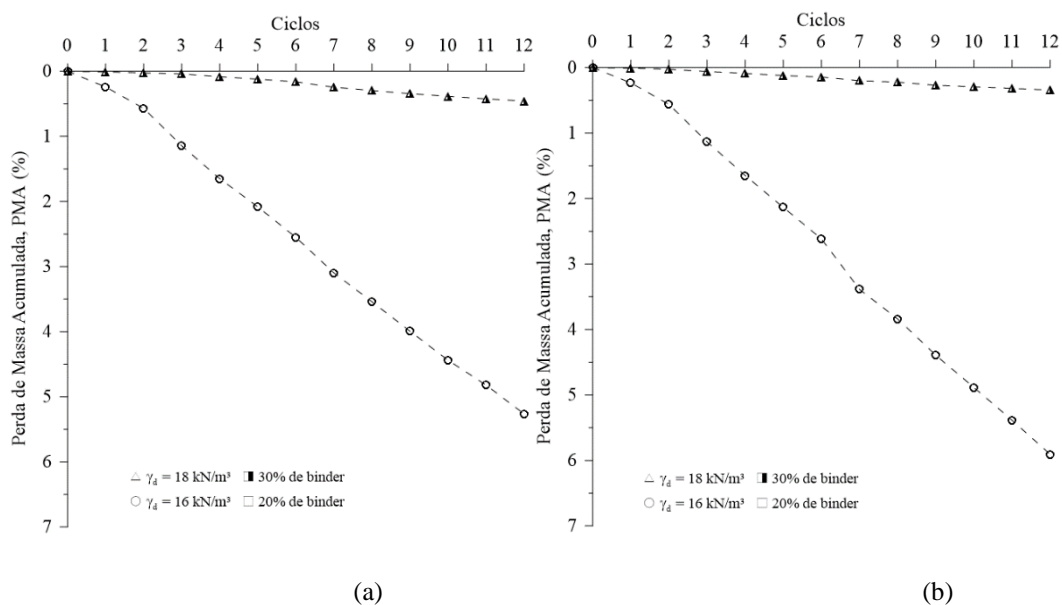


Figura 5.10 – Perda de Massa Acumulada (PMI) (a) Ms = 1; (b) Ms = 2
(Elaborado pela autora, 2022)

Através da Figura 5.10 nota-se, que o peso específico aparente seco e o teor de ligante apresentaram extrema influencia na durabilidade das amostras. Como já citado anteriormente, o peso específico aparente seco influencia diretamente na área de contato entre as partículas, o que resulta em uma maior mobilização de atrito, aumentando a resistência ao desgaste do material. Além disso, o teor de ligante tem influencia na quantidade de reações e na geração de produtos de reação, que contribuem com a resistência do material.

Sendo assim, as amostras com peso específico aparente seco de 16kN/m³ e teor de ligante de 20%, apresentaram maior perda de massa acumulada ao final dos ciclos, em detrimento das amostras com 18 kN/m³ e 30% de ligante, em ambos os módulos de sílica. Para melhor análise, os resultados de PMA podem ser observados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Perda de Massa Acumulada

γ_d (kN/m ³)	Teor de Ligante (%)	Módulo de Sílica (Ms)	PMA (%)
18	30	1	0,46
16	20	1	5,26
18	30	2	0,34
16	20	2	5,91

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Com os resultados presentes na Tabela 5.4, é possível observar que as dosagens com 18kN/m³ e 30% de ligante, apresentaram perda de massa acumulada menor que 0,5%, o que configura um desempenho extremamente satisfatório. As demais dosagens apresentaram valores maiores, entretanto ainda inferiores a 6%. Também se observa que a dosagens que compreendem um módulo de sílica igual a 2, apresentaram o melhor e o pior resultado em detrimento das demais, onde, como já citado anteriormente, nota-se um comportamento semelhante ao desempenho, das mesmas dosagens, nos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias, as quais apresentaram o melhor e o pior resultado.

A Figura 5.11 apresenta o estado físico das amostras ao final dos 12 ciclos. Nota-se que as amostras com maior peso específico aparente seco e maior teor de ligante apresentam maior integridade em seu estado físico em comparação as amostras de menor peso específico aparente seco e menor teor de ligante, tornando visível a influência destes fatores na durabilidade do material.



(a)



(b)

Figura 5.11 – Amostras ao final dos 12 ciclos (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$
(Elaborado pela autora, 2022)

5.4 MÓDULO DE CISALHAMENTO INICIAL AO LONGO DOS CICLOS DE DURABILIDADE

Ao longo dos ciclos de durabilidade foi realizado o ensaio de módulo de cisalhamento, a fim de avaliar a variação da rigidez do material com o passar dos ciclos de molhagem, secagem e escovação. Os ensaios foram realizados a cada 3 ciclos e o resultados podem ser observados na Figura 5.12.

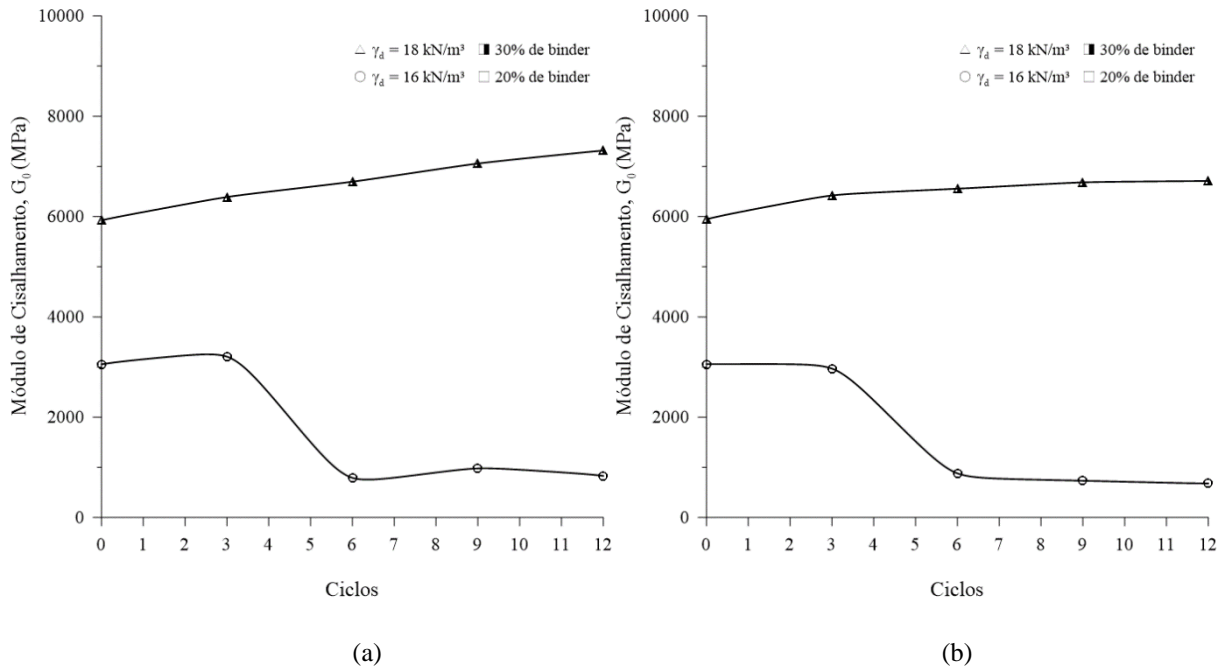


Figura 5.12 – Módulo de Cisalhamento ao longo dos ciclos (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$
(Elaborado pela autora, 2022)

Analisando a Figura 5.12, é possível observar que ambos os gráficos (a e b) apresentam comportamento semelhante entre si. As amostras com peso específico aparente seco de 18 kN/m^3 e 30% de ligante (melhor condição), para ambos os módulos de sílica, apresentaram comportamento progressivo ao longo dos ciclos, com aumento gradativo do módulo de cisalhamento inicial, sendo o maior resultado obtido no ciclo de 12. Já as amostras com peso específico aparente seco de 16 kN/m^3 e 20% de ligante (pior condição), para ambos os módulos de sílica, apresentaram queda dos valores de módulo de cisalhamento inicial no ciclo 6, apresentando um comportamento relativamente estável nos ciclos subsequentes.

Realizando um comparativo entre as Figura 5.12a e a Figura 5.12b, observa-se que a melhor condição para amostras com módulo de sílica igual a 1, apresentou comportamento gradativo maior em detrimento das demais. Os valores de módulo de cisalhamento inicial para $M_s 1$ foram $7315,26 \text{ MPa}$, ao final dos ciclos, e de $6707,91 \text{ MPa}$ para $M_s 2$.

Sabe-se que os ciclos de molhagem, secagem e escovação, acarretam na perda de massa dos corpos de prova, colaborando com a degradação da rigidez ao longo dos ciclos. Em contrapartida, também é sabido, que o teor de ligante álcali ativado, cujas reações pozolânicas geram produtos de reação que elevam a resistência e rigidez do material, não conclui o processo reativo em um período de cura de 7 dias, ao qual as amostras foram submetidas para a realização do ensaio. O valor de PMA obtido para ambas as amostras de melhor condição, foi menor de 0,5%, o que apresenta uma degradação expressivamente baixa. Sendo assim, a exposição deste

material à presença de água e subsequentemente em temperaturas maiores, acarreta a catálise das reações, gerando produtos de reação em menos tempo.

Para as amostras de pior condição, é possível observar que na Figura 5.12a, houve um aumento dos resultados, entre os ciclos 1 e 3 e entre os ciclos 6 e 9. Entre os ciclos 1 e 3 houve um aumento pouco significativo, na ordem de 5%, apresentando um aumento mais expressivo entre os ciclos 6 e 9 do ciclo, na ordem de 23%. Já nas amostras da Figura 5.12b, as amostras não apresentaram aumento de rigidez entre os ciclos, havendo uma redução gradativa dos resultados de módulo de cisalhamento inicial. O valor de PMA obtido para ambas as amostras de pior condição, foi pouco menor de 6%, o que apresenta uma degradação mais expressiva em detrimento das outras amostras.

Sendo assim, conclui-se que o aumento dos fatores controláveis que compreendem o peso específico aparente seco e o teor de ligante, impactam positivamente no módulo de cisalhamento inicial, diferentemente do módulo de sílica, onde o aumento impacta negativamente, apresentando menor desempenho.

5.5 RELAÇÕES COM O ÍNDICE η/B_{iv}

Consoli *et al.* (2007) propuseram esta metodologia para a dosagem racional de solos artificialmente cimentados. Com isso, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de cisalhamento inicial foram relacionados com o índice η/B_{iv} , que consiste na relação entre a porosidade do material e o teor de ligante utilizado na respectiva dosagem. Essas relações foram realizadas afim de validar e discutir a metodologia aplicada e estabelecer relações matemáticas que simulem o comportamento das dosagens utilizadas.

5.5.1 Resistência à compressão simples

O expoente interno, utilizado para ajustar a curva do ensaio de resistência de resistência à compressão em relação ao η/B_{iv} , foi de 1. Na Figura 5.13 pode-se observar os resultados obtidos.

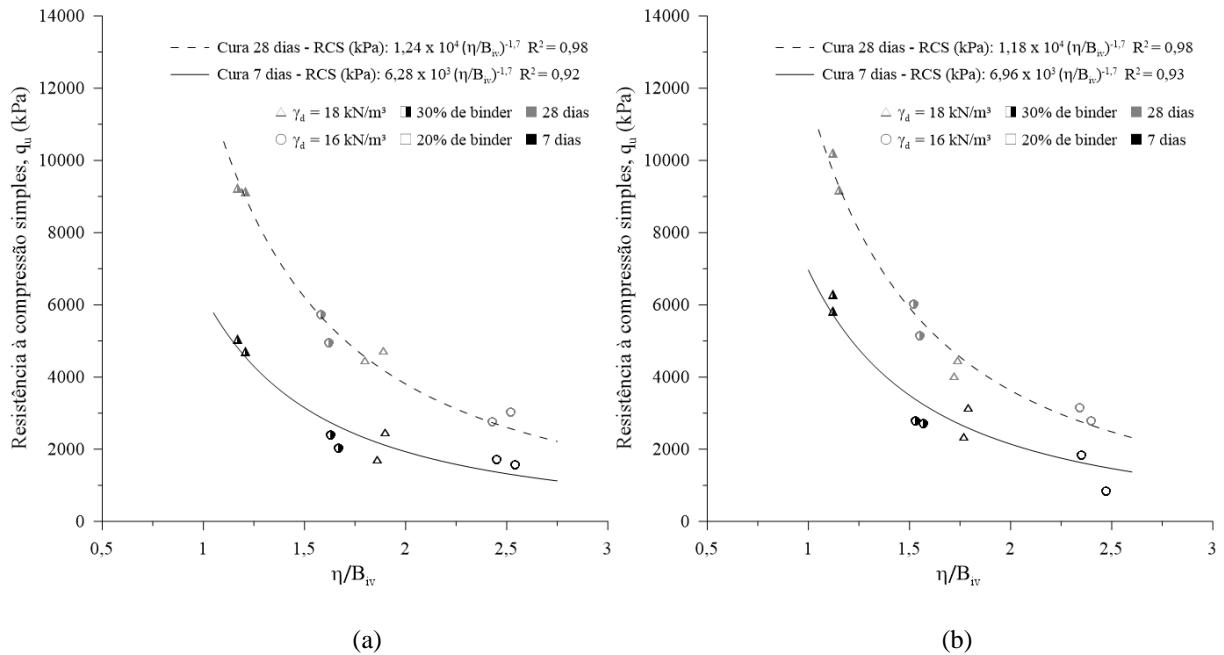


Figura 5.13 – Relação entre a resistência à compressão simples e o η/B_{iv} (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).

A partir da Figura 5.13, é possível observar que, de modo geral, a redução do parâmetro η/B_{iv} , resulta no aumento da resistência à compressão simples das amostras. Esse comportamento se deve ao fato que a redução da porosidade do material, gera maior quantidade de pontos de contato entre as partículas, acarretando em uma maior mobilização de atrito intergranular em simultaneidade com o aumento o teor de ligante que potencializa a geração de produtos de reação, elevando a resistência do material.

Analisando os gráficos afim de comparar as curvas de 7 e 28 dias, nota-se que o tempo de cura apresentou influência expressiva na resistência das amostras. Na Figura 5.13a, a evolução média da resistência à compressão simples, para as amostras de maior resistência, foi de 88,16% e na Figura 5.13b, de 59,93%.

As curvas de resistência à compressão simples em relação ao parâmetro η/B_{iv} , apresentaram coeficientes de determinação (R^2) extremamente elevados. Para as amostras com $M_s 1$, os coeficientes de determinação foram de 92% e 98% para 7 e 28 dias de cura respectivamente e para as amostras com $M_s 2$, os valores foram de 93% e 98% para 7 e 28 dias respectivamente.

A alta representatividade dos resultados, atribui viabilidade à utilização do parâmetro η/B_{iv} , para simular ou prever a resistência à compressão simples da faixa de dosagens analisada. As Equações 5.1 e 5.2 apresentam as relações obtidas para as dosagens com $M_s 1$ e as Equações 5.3 e 5.4, para as dosagens com $M_s 2$. Analisando as equações (5.1, 5.2, 5.3, e 5.4), é possível

observar que o expoente externo é igual para todas elas, modificando apenas as constantes iniciais.

$$\text{RCS (kPa)}_{7 \text{ dias}} = 6,28 \times 10^3 \left(\eta / B_{iv} \right)^{-1,7} \quad 5.1$$

$$\text{RCS (kPa)}_{28 \text{ dias}} = 1,24 \times 10^4 \left(\eta / B_{iv} \right)^{-1,7} \quad 5.2$$

$$\text{RCS (kPa)}_{7 \text{ dias}} = 6,96 \times 10^3 \left(\eta / B_{iv} \right)^{-1,7} \quad 5.3$$

$$\text{RCS (kPa)}_{28 \text{ dias}} = 1,18 \times 10^4 \left(\eta / B_{iv} \right)^{-1,7} \quad 5.4$$

Em seguida, foram geradas curvas de resistência à compressão simples normalizadas, onde foram obtidas relações matemáticas únicas para cada ligante. De acordo com Consoli *et al.* (2018), este ajuste é possível para materiais onde utiliza-se o mesmo material cimentante, independentemente de determinadas variáveis pré-estabelecidas, como temperatura e tempo de cura.

A normalização foi realizada pela razão entre os resultados de resistência à compressão simples obtidos nos ensaios, e uma resistência fixa obtida pela equação, utilizando o parâmetro η/B_{iv} central da curva. O parâmetro η/B_{iv} utilizado para todas ambas curvas foi de 1,7. Os resultados podem ser observados a partir da Figura 5.14.

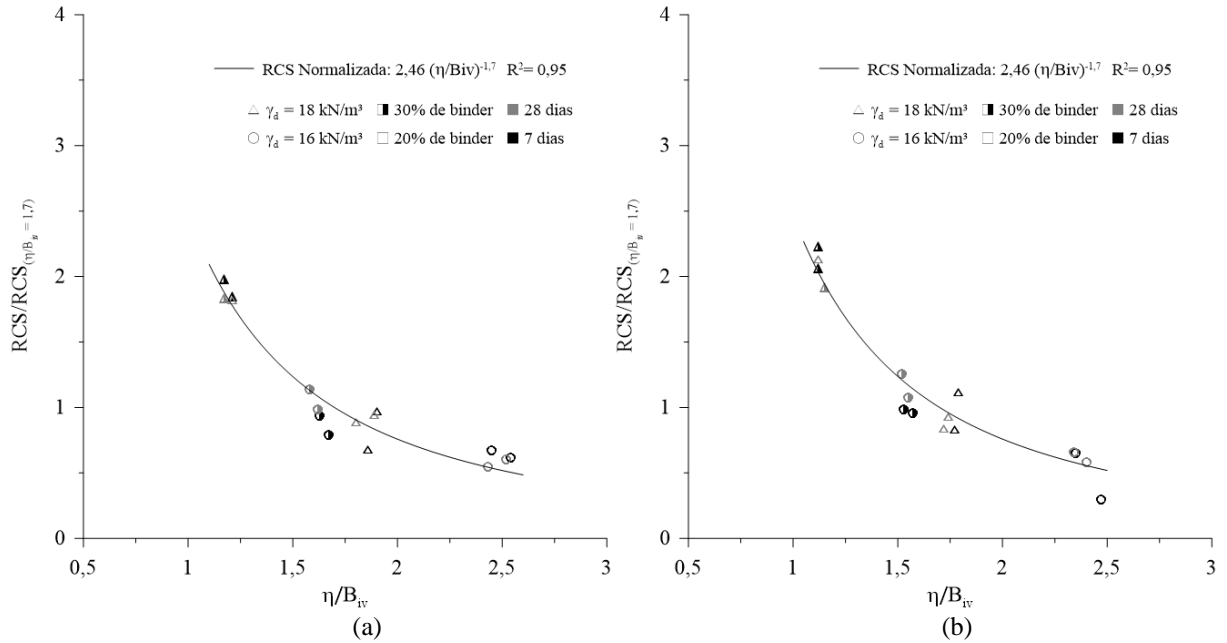


Figura 5.14 – Relação entre a resistência à compressão simples normalizada e o η/B_{iv} para ambos os tempos de cura (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).

Analisando a Figura 5.14, pode-se observar que foi obtida uma única curva ajustada para ambos os períodos de cura em ambos os gráficos. Além disso, as equações de ambos os gráficos se mostraram iguais, apresentando coeficientes de determinação na ordem de 95%, também para ambas as curvas, o que indica grande representatividade e viabilidade de utilização deste método. A equação 5.5 representa a relação matemática obtida para os gráficos.

$$RCS/RCS_{(\eta/B_{iv}=1,7)} = 2,46 \left(\eta/B_{iv}\right)^{-1,7} \quad 5.5$$

5.5.2 Módulo de Cisalhamento Inicial

O expoente interno utilizado para ajustar a curva do ensaio de módulo de cisalhamento inicial em relação ao η/B_{iv} foi de 0,28. Nota-se que os expoentes utilizados para os ensaios de resistência à compressão simples e para o módulo de cisalhamento inicial divergem. Isso pode ser explicado através dos fatores principais obtidos pela análise estatística, para cada ensaio separadamente.

Para os resultados de resistência à compressão simples os fatores que apresentaram maior influência na variável resposta foram: o teor de ligante (i), tempo de cura (ii) e peso específico aparente seco (iii), nesta ordem, apresentando magnitudes muito próximas (ver Figura 5.2). Por

outro lado, os resultados obtidos para o módulo cisalhante inicial apresentaram como fator principal, em magnitude mais expressiva em detrimento dos demais, o peso específico aparente seco (ver Figura 5.6).

Segundo Foppa (2005), o expoente interno de ajuste das curvas provenientes das relações com o parâmetro de porosidade/teor volumétrico de material cimentante, permite a compatibilização dos efeitos expressos pelos fatores de influência. Para expoentes de valor igual a 1, a porosidade e o teor de ligante apresentam influência equivalente, ou seja, de mesma magnitude. Para expoentes menores do que 1, há maior influência da porosidade nos resultados em detrimento do teor de ligante. E de forma inversa, para expoentes maiores do que 1, o teor de ligante apresenta maior influência em comparação à porosidade do material.

Ao saber que os resultados de resistência à compressão simples foram influenciados, tanto pela porosidade quanto pelo teor de ligante em magnitudes aproximadas, optou-se pela utilização o expoente de ajuste interno igual a 1. Sabendo-se também, que os resultados de módulo de cisalhamento inicial foram influenciados de forma mais expressiva pela porosidade, em comparação aos demais fatores, foi estabelecida a utilização de um expoente interno de 0,28. Na Figura 5.15 pode-se observar os resultados obtidos.

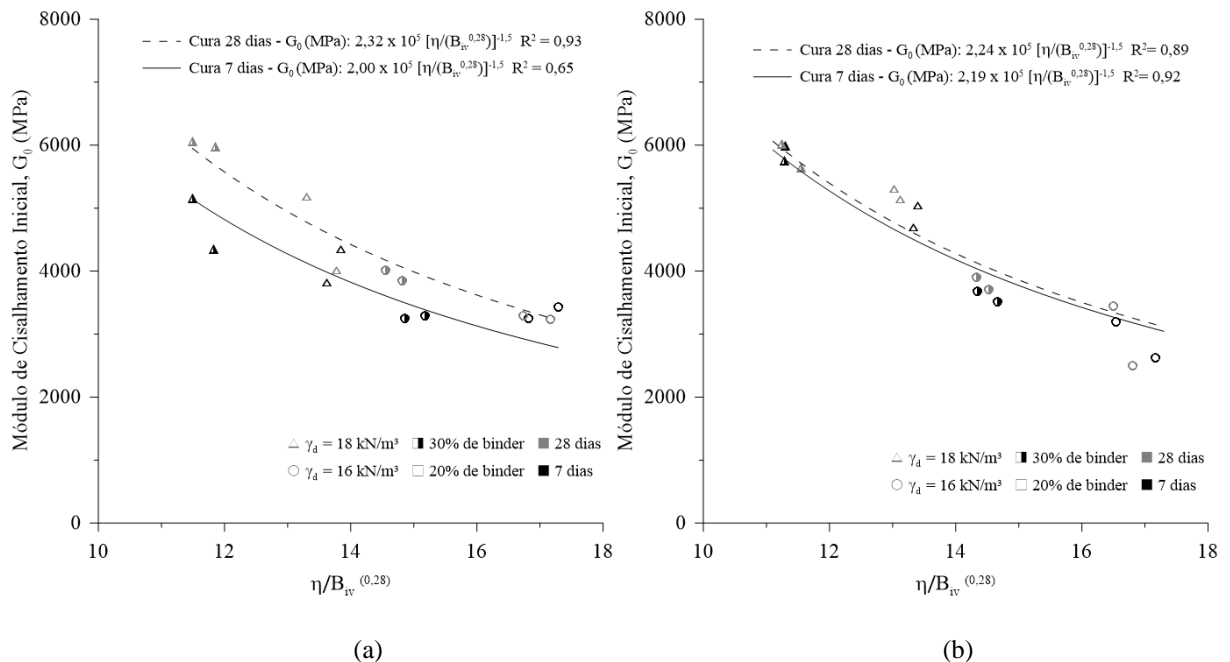


Figura 5.15 – Relação entre o módulo de cisalhamento inicial e o η/B_{iv} (a) $M_s = 1$; (b) $M_s = 2$ (Elaborado pela autora, 2022).

A partir da Figura 5.15, é possível observar que de modo geral, a redução do parâmetro η/B_{iv} , resulta no aumento do módulo de cisalhamento inicial das amostras. Esse comportamento se dá

pela a redução da porosidade do material, gerando maior quantidade de pontos de contato entre as partículas, acarretando em uma maior mobilização de atrito intergranular, cuja influência revelou maior magnitude neste caso. Em menor magnitude, também houve influência do aumento do teor de ligante que potencializa a geração de produtos de reação, elevando a rigidez do material.

Analisando os gráficos afim de comparar as curvas de 7 e 28 dias, nota-se que o tempo de cura apresentou influência mais expressiva na rigidez das amostras com módulo de sílica igual a 1. Na Figura 5.15a, a evolução média do módulo de cisalhamento inicial, para as amostras de maior rigidez, foi de 26,7%, e na Figura 5.15b a evolução não se mostrou significativa.

As curvas de módulo de cisalhamento em relação ao parâmetro η/B_{iv} , apresentaram coeficientes de determinação (R^2) elevados, exceto a curva das dosagens com módulo de sílica igual a 1 aos 7 dias de cura, que apresentou menor representatividade. Para os corpos de prova com Ms 1, os coeficientes de determinação foram de 65% e 93% para 7 e 28 dias de cura respectivamente e para as amostras com Ms 2, os valores foram de 89% e 92% para 7 e 28 dias respectivamente.

A representatividade dos resultados, atribui viabilidade à utilização do parâmetro η/B_{iv} , para simular, ou prever o módulo de cisalhamento inicial da faixa de dosagens analisadas. As Equações 5.6 e 5.7 apresentam as relações obtidas para as dosagens com Ms 1 e as Equações 5.8 e 5.9, para as dosagens com Ms 2. Analisando as equações (5.6, 5.7, 5.8, e 5.9), é possível observar que o expoente externo é igual para todas elas, modificando apenas as constantes iniciais.

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7 \text{ dias}} = 2,00 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(B_{iv}^{0,28})} \right]^{-1,5} \quad 5.6$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28 \text{ dias}} = 2,32 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(B_{iv}^{0,28})} \right]^{-1,5} \quad 5.7$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{7 \text{ dias}} = 2,19 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(B_{iv}^{0,28})} \right]^{-1,5} \quad 5.8$$

$$G_0 \text{ (MPa)}_{28 \text{ dias}} = 2,24 \times 10^5 \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^{0,28}} \right]^{-1,5} \quad 5.9$$

Em seguida, foram geradas curvas de módulo de cisalhamento inicial normalizadas, onde foram obtidas relações matemáticas únicas para cada ligante. A normalização foi realizada pela razão entre os resultados de módulo de cisalhamento inicial obtidos nos ensaios, e um módulo de cisalhamento inicial fixo obtido através da equação, utilizando o parâmetro η/B_{iv} central da curva. O parâmetro η/B_{iv} utilizado para ambas as curvas foi de 15. Os resultados podem ser observados a partir da Figura 5.16.

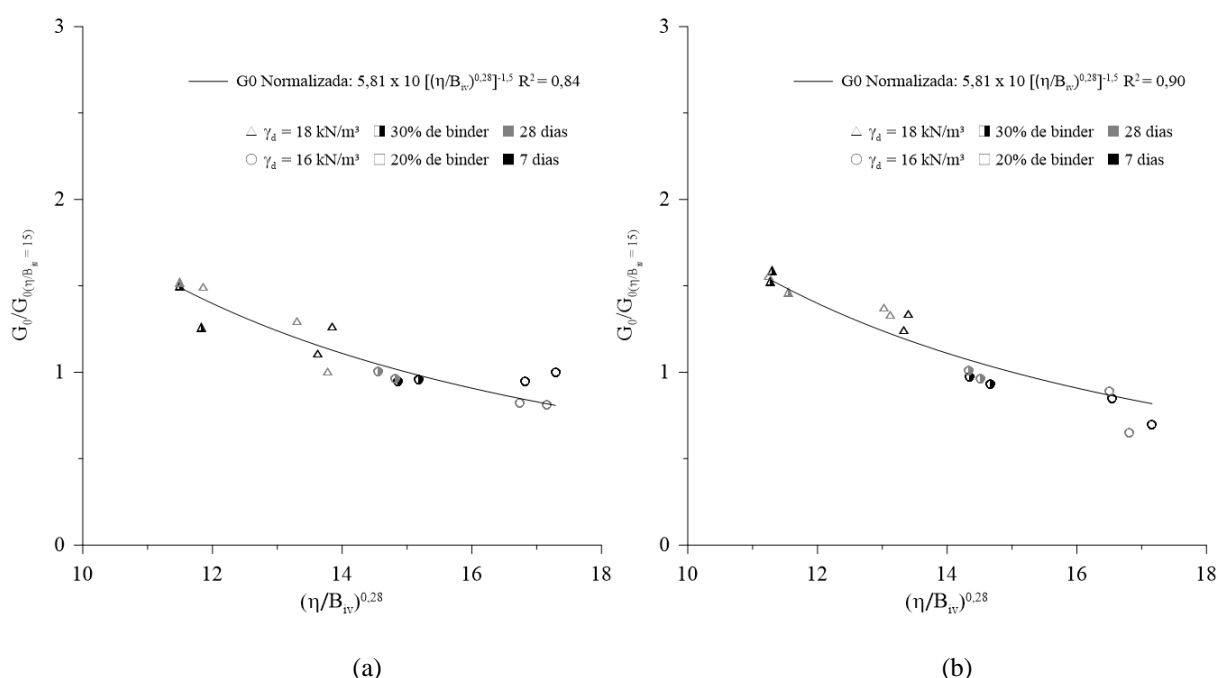


Figura 5.16 – Relação entre o módulo de cisalhamento inicial normalizado e o η/B_{iv} para ambos os tempos de cura (a) Ms = 1; (b) Ms = 2 (Elaborado pela autora, 2022).

Analisando a Figura 5.16, pode-se observar que foi obtida uma única curva ajustada para ambos os períodos de cura em ambos os gráficos. Além disso, as equações de ambos os gráficos se mostraram iguais, apresentando coeficientes de determinação na ordem de 84% e 90%, para as amostras com Ms 1 e Ms 2 respectivamente, indicando alta representatividade e viabilidade de utilização deste método. A equação 5.10 representa a relação matemática obtida para os gráficos.

$$G_0/G_0(\eta/B_{iv}=15) = 5,81 \times 10 \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^{0,28}} \right]^{-1,5} \quad 5.10$$

5.6 SIMPLE SHEAR

Com o objetivo de avaliar o comportamento geomecânico do material estudado, foram realizados ensaios *simple shear* monotônico, com diferentes tensões de confinamento. Foi selecionada a dosagem com peso específico aparente seco de 18kN/m^3 , 30% de ligante de módulo de sílica igual a 1, visto que esta dosagem se mostrou como pior condição em detrimento da dosagem com mesmo peso específico aparente seco e teor de ligante e módulo de sílica igual a 2. Além disso, a realização do ensaio para a dosagem com módulo de sílica igual a 2, foi impossibilitada por limitações do equipamento. Na Figura 5.17 pode-se observar os resultados do ensaio *simple shear* para uma tensão efetiva inicial de 50kPa.

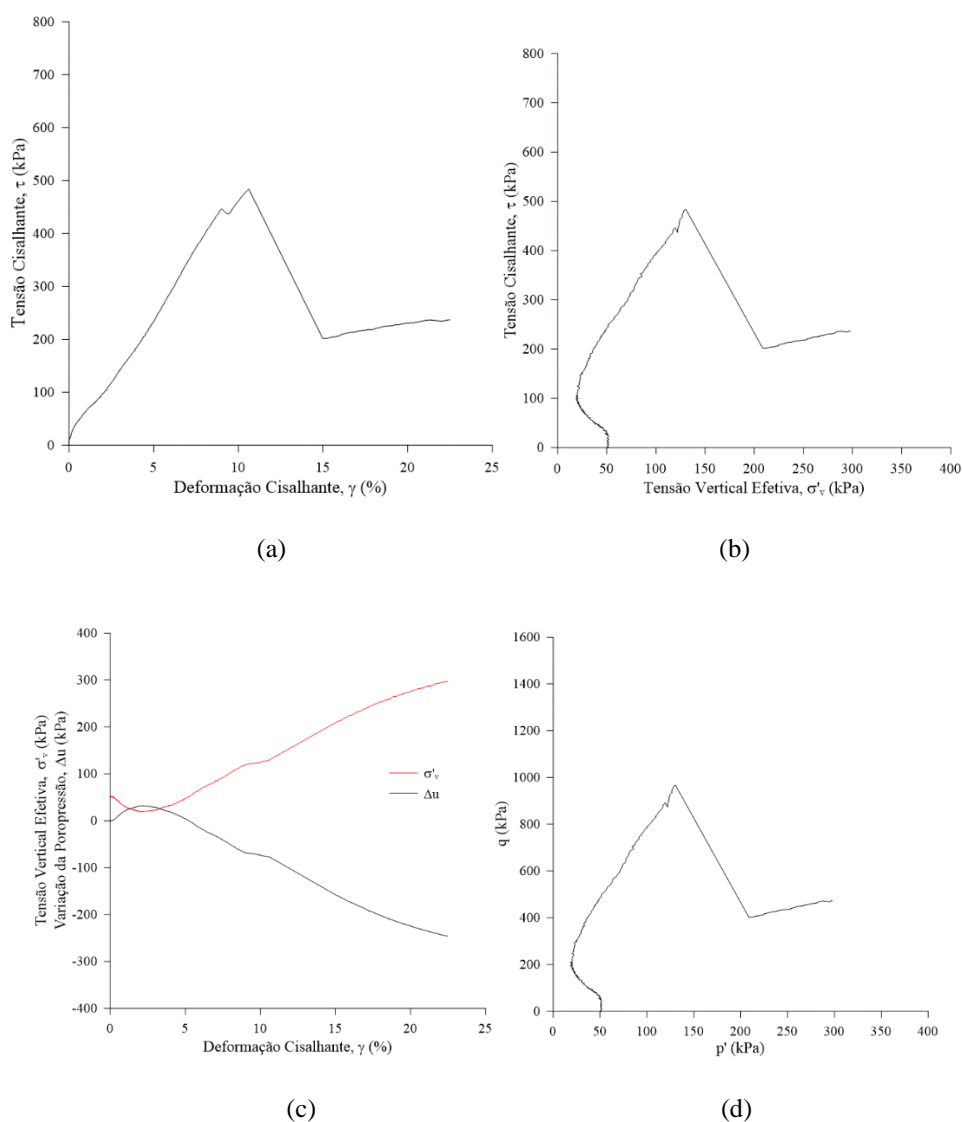


Figura 5.17 - Resposta cisalhante monotônica sob 50 kPa de tensão vertical efetiva inicial (a) tensão cisalhante (τ) em relação a deformação cisalhante (γ), (b) tensão cisalhante (τ) em relação a tensão vertical efetiva (σ'_v), (c) variação de poropressão (Δu) e tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação a deformação cisalhante (γ) e (d) trajetória de tensão (p' x q) (elaborado pela autora 2022).

Analisando a Figura 5.17, nota-se que o material apresenta um comportamento que se difere do convencional. Na Figura 5.17a, pode-se observar que o comportamento tensão deformação apresenta pico bem definido, entretanto, indica ruptura abrupta acarretando em uma queda de resistência instantânea após a tensão de cisalhamento máxima alcançada. Isto pode ser explicado pelo alto teor de ligante (30%) utilizado na dosagem, gerando um plano de ruptura bem definido e reduzindo a resistência pós pico. A tensão de cisalhamento máxima alcançada, foi de 483,8 kPa, para uma deformação cisalhante de 10,62%.

Ao analisar a variação de poropressão apresentada na Figura 5.17c, é possível observar que o acréscimo de tensão cisalhante resulta em uma geração de poropressão positiva até um valor de 32,03 kPa aos 2,08% de deformação cisalhante, reduzindo a partir deste ponto. A geração da poropressão e aumento da tensão vertical efetiva apresentam mesma tendência.

As trajetórias de tensão das Figuras 5.17b e 5.17d, apresentaram comportamento mais próximo ao convencional até as tensões de cisalhamento e desvio máximas, entretanto, apresentando também, uma queda abrupta posteriormente aos valores máximos de resistência.

Na Figura 5.18 pode-se observar os resultados do ensaio *simple shear* para uma tensão efetiva inicial de 100kPa.

Na Figura 5.18a, observa-se que, semelhante ao ensaio com tensão efetiva inicial de 50kPa, o comportamento tensão deformação apresenta pico bem definido, indicando queda abrupta de resistência após a tensão de cisalhamento máxima alcançada. A tensão de cisalhamento máxima alcançada, foi de 561,7 kPa, para uma deformação cisalhante de 11,5%.

Analisando a variação de poropressão apresentada na Figura 5.18c, observa-se que o acréscimo de tensão cisalhante resulta em uma geração de poropressão positiva até um valor de 41,5 kPa aos 1,7% de deformação cisalhante, reduzindo a partir deste ponto. A geração da poropressão e aumento da tensão vertical efetiva apresentam a mesma tendência até o final do ensaio. As trajetórias de tensão das Figuras 5.18b e 5.18d, apresentaram comportamento próximo ao convencional até as tensões de cisalhamento e desvio máximas, entretanto, apresentando também, uma queda abrupta posteriormente aos valores máximos de resistência.

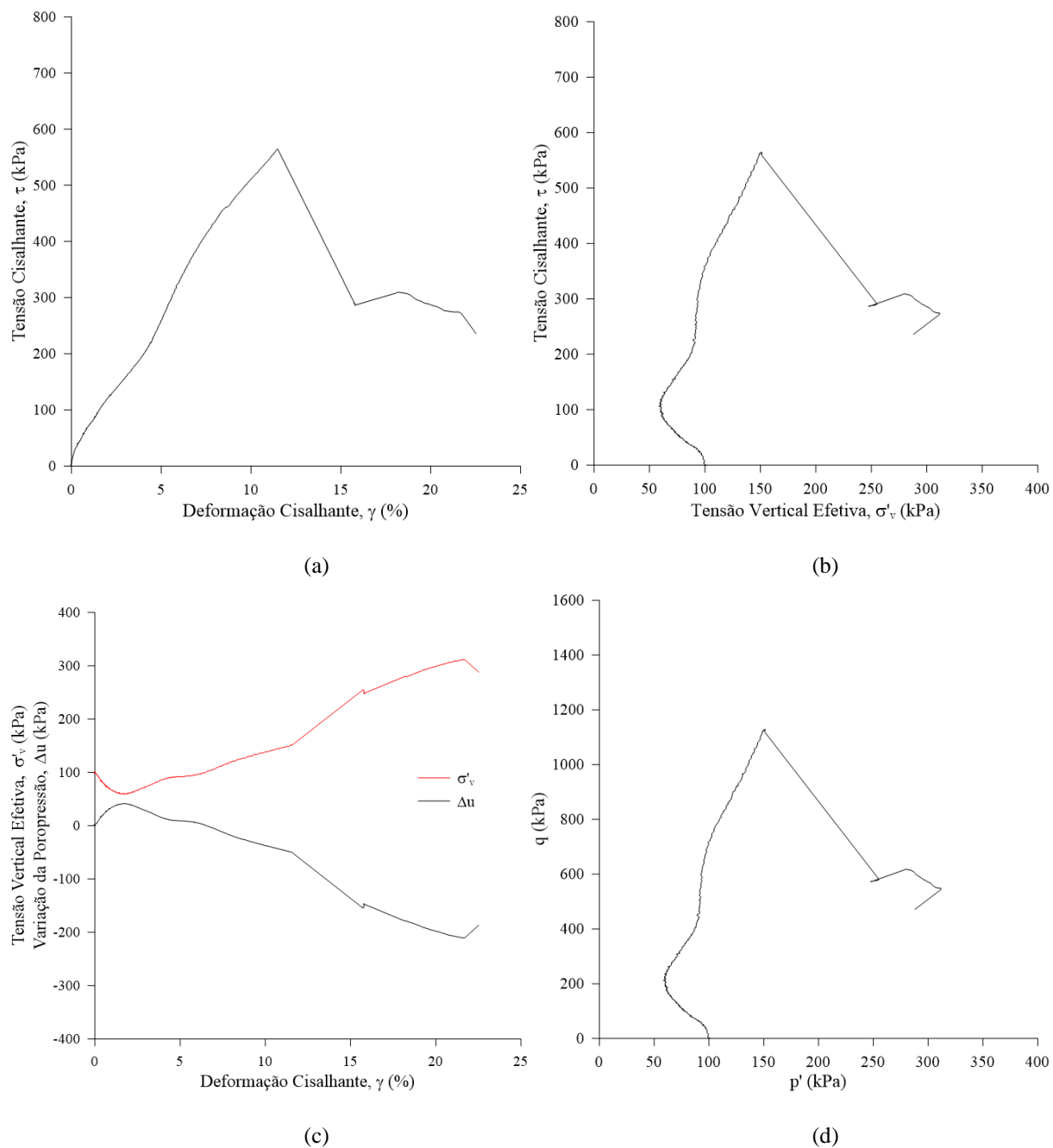


Figura 5.18 - Resposta cisalhante monotônica sob 100 kPa de tensão vertical efetiva inicial (a) tensão cisalhante (τ) em relação a deformação cisalhante (γ), (b) tensão cisalhante (τ) em relação a tensão vertical efetiva (σ'_v), (c) variação de poropressão (Δu) e tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação a deformação cisalhante (γ) e (d) trajetória de tensão ($p' \times q$) (elaborado pela autora 2022).

Na Figura 5.19 pode-se observar os resultados do ensaio *simple shear* para uma tensão efetiva inicial de 150kPa.

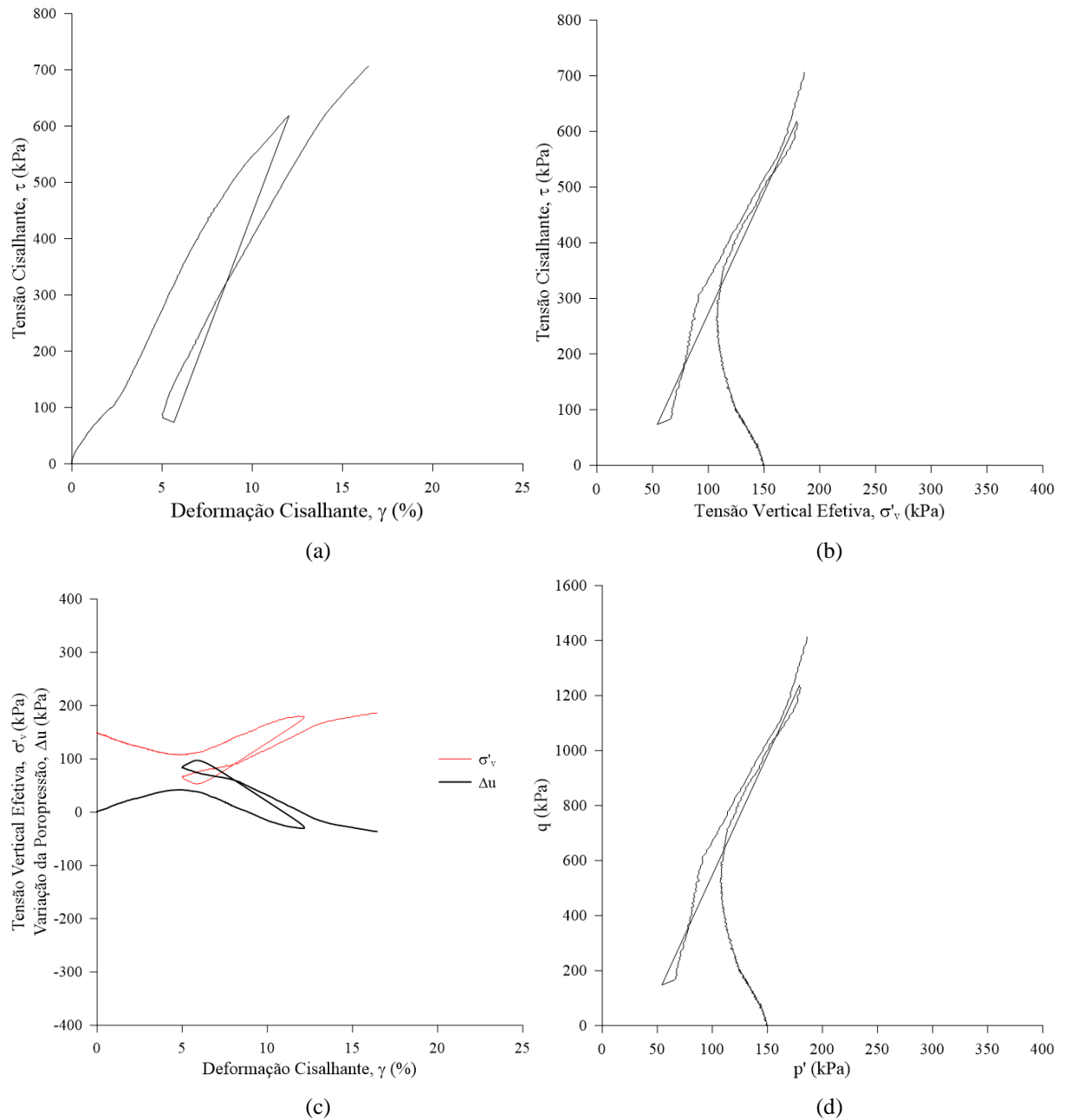


Figura 5.19 - Resposta cisalhante monotônica com descarregamento sob 150 kPa de tensão vertical efetiva inicial (a) tensão cisalhante (τ) em relação a deformação cisalhante (γ), (b) tensão cisalhante (τ) em relação a tensão vertical efetiva (σ'_v), (c) variação de poropressão (Δu) e tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação a deformação cisalhante (γ) e (d) trajetória de tensão (p' x q) (elaborado pela autora 2022).

Na Figura 5.19a, pode-se observar que o comportamento tensão deformação não apresentou pico de resistência, o que pode ser explicado pelo fato de não ter sido levado a maiores deformações. Nota-se que após o recarregamento o material apresentou a mesma tendência obtida no carregamento inicial. A tensão de cisalhamento máxima alcançada para o primeiro carregamento, foi de 618,6 kPa, para uma deformação cisalhante de 12,0% e para o recarregamento a tensão máxima foi de 706,4 kPa e 16,4% de deformação cisalhante.

Ao analisar a variação de poropressão apresentada na Figura 5.19c, é possível observar que o acréscimo de tensão cisalhante resulta em uma geração de poropressão positiva até um valor de 41,9 kPa aos 4,7% de deformação cisalhante, reduzindo a partir deste ponto. A geração da poropressão e aumento da tensão vertical efetiva apresentam a mesma tendência até o final do ensaio, independentemente do ciclo de descarregamento.

As trajetórias de tensão das Figuras 5.19b e 5.19d, apresentaram comportamento próximo ao convencional até as tensões de cisalhamento e desvio máximas do primeiro carregamento e após o recarregamento, o material apresentou a mesma tendência obtida no carregamento inicial. Na Figura 5.20 pode-se observar o estado físico das amostras ao final dos ensaios de 50kPa, 100kPa e 150kPa e seus respectivos planos de ruptura. A partir da Figura 5.20, nota-se que todas as amostras apresentaram plano de ruptura bem definido, o que indica um comportamento frágil.

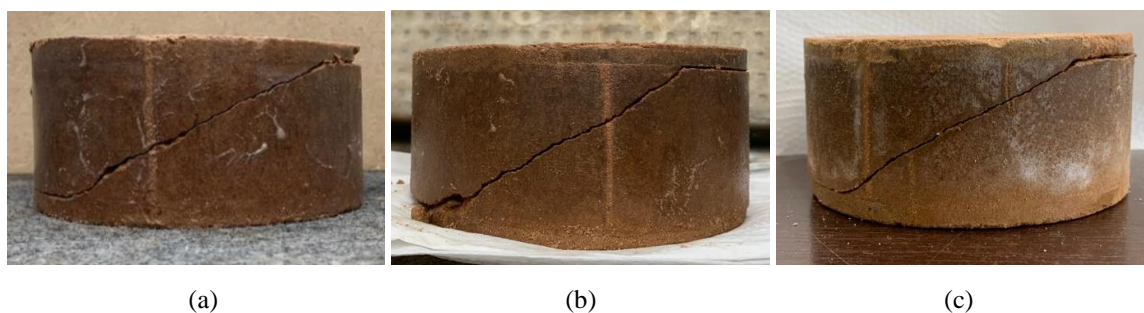


Figura 5.20 – Plano de ruptura das amostras submetidas ao ensaio *simple shear* com tensões efetivas iniciais de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa e (c) 150 kPa

Objetivando uma análise mais aprofundada dos resultados obtidos pelo ensaio, comparando os ensaios entre si, a Figura 5.21 apresenta as curvas de tensão e deformação cisalhante dos ensaios, a Figura 5.22 ilustra as curvas de tensão cisalhante normalizada pela tensão vertical efetiva e, por fim, na Figura 5.23 pode-se observar os módulos de cisalhantes tangentes em relação a deformação cisalhante.

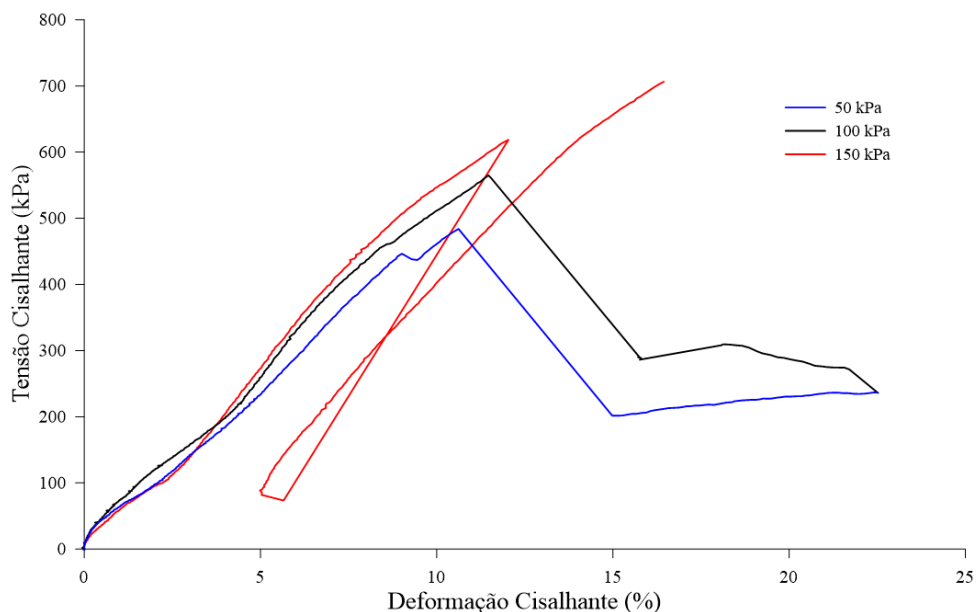


Figura 5.21 – Resultados de tensão e deformação cisalhante para tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 (Elaborado pela autora, 2022).

A partir da Figura 5.21, nota-se que não há significativa diferença entre a linearidade inicial das curvas, o que indica uma baixa influência das tensões de confinamento na resistência ao cisalhamento do material. Isto pode ser explicado em função da parcela coesiva existente por parte do alto teor de ligante. Sabendo-se que o teor de ligante tem alta influência na resistência das amostras, e ligado a isso, as tensões de consolidação não foram suficientemente altas para quebrar as pontes cimentadas geradas pelos produtos de reação, o aumento das tensões de confinamento, por fim, não apresentou significativa influência na resistência do material.

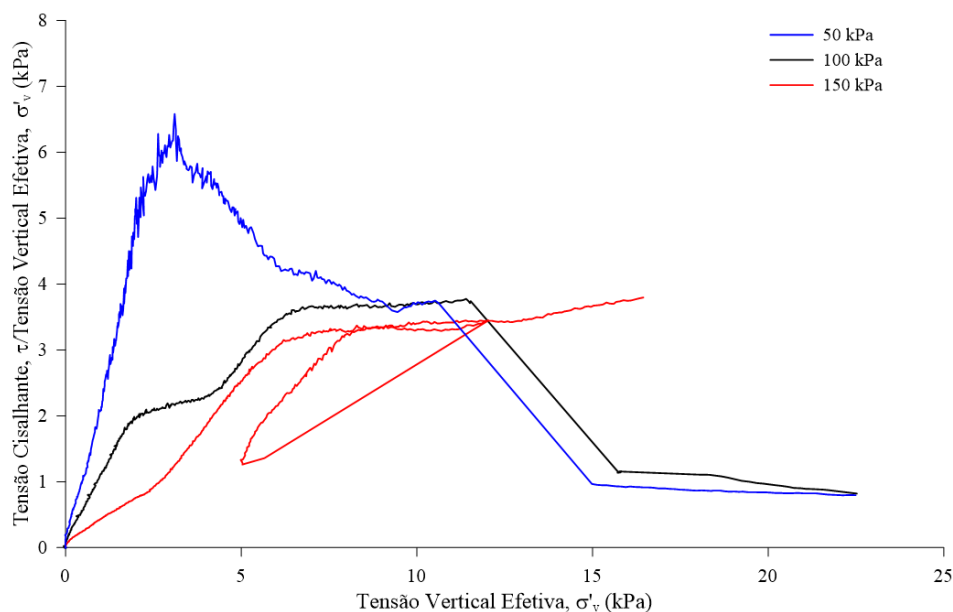


Figura 5.22 – Resultados de tensão cisalhante normalizada pela tensão vertical efetiva ao longo do ensaio em relação a deformação cisalhante para tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 (Elaborado pela autora, 2022).

A partir da Figura 5.22 é possível avaliar um aspecto singular do ensaio, pela condição não drenada, que se trata da tensão de cisalhamento normalizada pela tensão vertical efetiva. Observa-se que o ensaio, cuja tensão efetiva é de 50kPa, apresentou um pico bem definido para pequenas deformações (entre 0 e 5%), diferentemente do ocorrido para as tensões efetivas de 100kPa e 150 kPa, que não apresentaram pico, alcançando a resistência máxima em deformações maiores (entre 10 e 20%). Este comportamento, onde para maiores tensões efetivas a resistência máxima é alcançada em maiores deformações e para menores tensões efetivas em menores deformações, é um comportamento esperado para solos artificialmente cimentados.

Percebe-se também que, para os ensaios com tensões efetivas de 100 kPa e 150 kPa, houve uma mobilização de resistência evidenciada na curva normalizada, alterando o comportamento linear inicial. Ao final do ensaio, é apresentada uma queda resistência, para os ensaios com tensões efetivas de 50 kPa e 100 kPa, que em comparativo com as curvas da Figura 5.21, corresponde a ruptura abrupta das amostras.

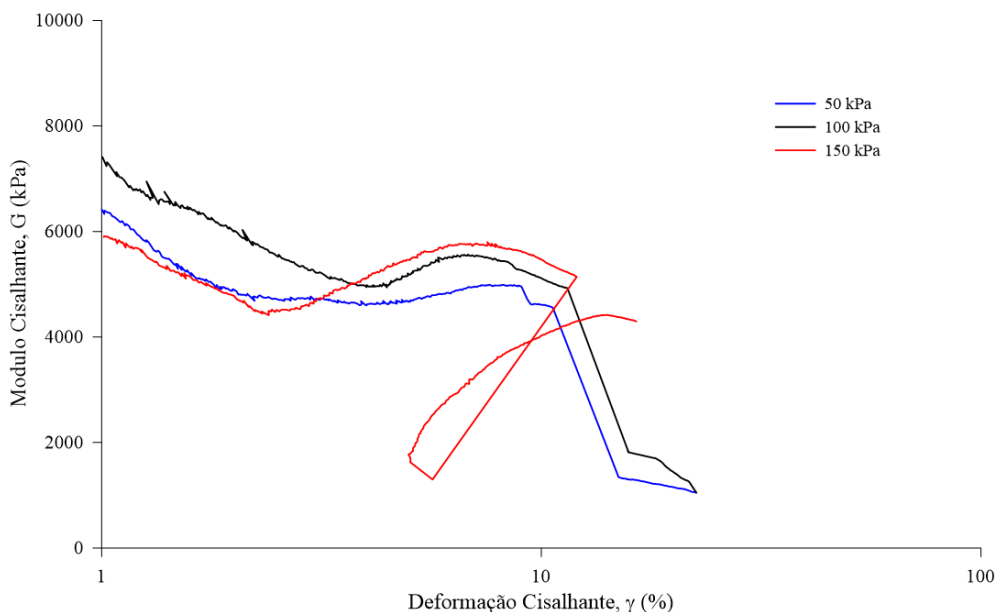


Figura 5.23 – Resultados de módulo cisalhante tangente em relação a deformação cisalhante para tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa (Elaborado pela autora, 2022).

No ensaio *simple shear* também é possível calcular os valores de módulo cisalhante (G) através de uma reta tangente à curva de tensão cisalhante por deformação cisalhante. Através da Figura 5.23, pode-se observar os resultados do módulo de cisalhamento para os ensaios realizados. Analisando o gráfico, nota-se que inicialmente os valores de módulo cisalhante apresentam uma redução para todas as tensões efetivas, seguindo de um aumento nos resultados. Este aumento apresentou maior magnitude para o ensaio de maior tensão efetiva reduzindo a magnitude ao reduzir as tensões efetivas. Ao fim do ensaio nota-se que os ensaios com tensões efetivas de 50 kPa e 100 kPa, apresentaram queda abrupta em função da ruptura das amostras. Já o ensaio com tensão efetiva de 150 kPa, após o ciclo de descarregamento e recarregamento, apresentou a mesma tendência comportamental que havia sido apresentada antes do ciclo.

Em uma pesquisa realizada por Corte *et al.* (2019), a autora analisou o comportamento da areia de Osório em estado natural, submetendo o material a ensaios *simple shear*, com uma densidade relativa de 50%, e tensões efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. Afim de estabelecer um comparativo entre os resultados e avaliar a diferença de comportamento atrelada à estabilização, na Figura 5.24 pode-se observar (a) a envoltória de ruptura para a areia de Osório estabilizada com ligante álcali ativado e (b) a envoltória de ruptura para uma areia Osório natural, elaborada por Corte *et al.* (2019). Para traçar a envoltória de ruptura desta pesquisa, foram utilizados os resultados de tensão cisalhante e tensão vertical efetiva correspondentes à 10% de deformação cisalhante.

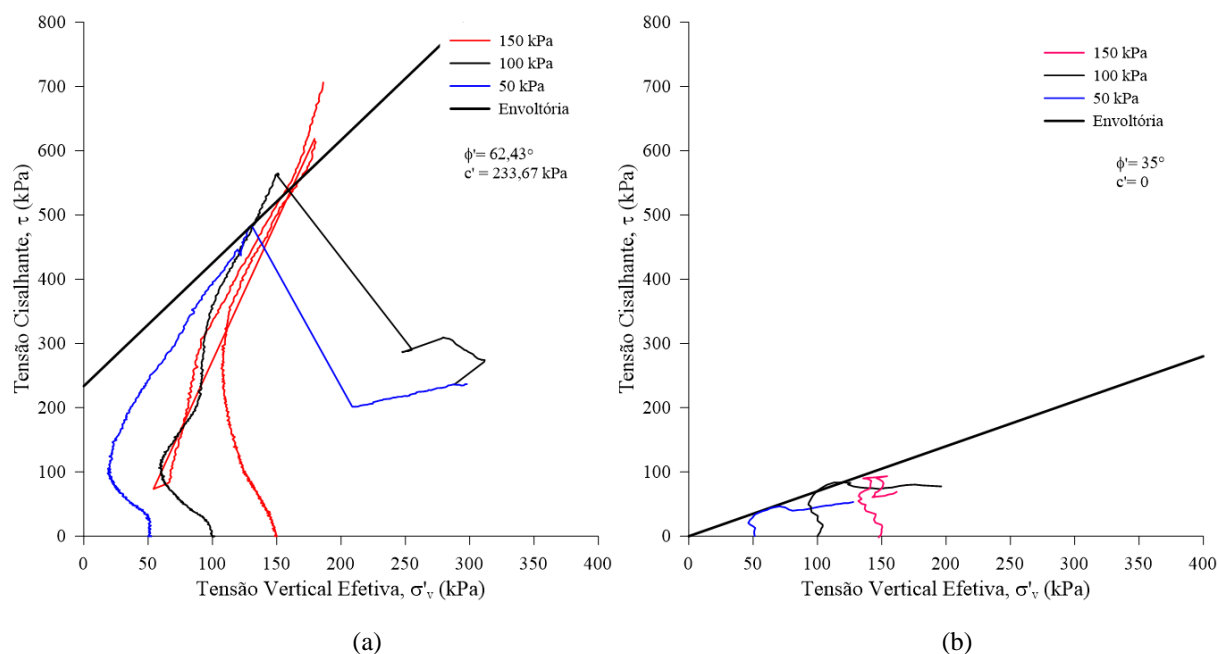


Figura 5.24 – Envoltórias de ruptura (a) desta pesquisa, elaborada pela autora, 2022; (b) pesquisa elaborada por Corte *et al.* 2019.

Ao comparar os resultados das Figuras 5.24a e 5.24b, nota-se uma significativa diferença entre os resultados. Os resultados de tensão de cisalhamento máximo para os ensaios realizados por Corte *et al.* (2019), apresentaram resultados menores que 100 kPa, enquanto os resultados da areia estabilizada apresentaram valores maiores que 400 kPa. Além disso, é possível observar que na Figura 5.24a, é evidenciada a existência de intercepto coesivo, diferentemente da Figura 5.24b, onde este parâmetro é igualado a zero. Na Tabela 5.5, pode-se observar os parâmetros de resistência obtidos através de ambas as envoltórias.

Tabela 5.5 – Parâmetros de resistência

Parâmetros de resistência	Areia Estabilizada (autora, 2022)	Areia Natural (Corte <i>et al.</i> 2019)
ϕ'	62,43°	35°
c'	233,67 kPa	0

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se através dos resultados que houve um aumento significativo tanto no ângulo de atrito do material, como no intercepto coesivo. A presença de um intercepto coesivo, já esperada para um material cimentado, é explicada pela estabilização do solo com o ligante álcali ativado que agrega ao material uma parcela coesiva conferindo maior resistência ao material.

O aumento do ângulo de atrito, pode ser explicado pela diferença entre as densidades relativas iniciais dos ensaios, o que interfere diretamente na quantidade de pontos de contato entre os

grãos, incidindo na mobilização de atrito. Os corpos de prova de solo estabilizado foram compactados com peso específico aparente seco de 18 kN/m^3 , sendo que, no ensaio de compactação Proctor com energia modificada, o maior resultado apresentado foi de $19,32 \text{ kN/m}^3$, resultando em uma densidade relativa de 93%. Sabendo-se que a amostra de solo natural, foi moldada com densidade relativa de 50% e a amostra de solo estabilizada com 93%, explica-se o aumento significativo do ângulo de atrito em função das distintas compacidades entre os materiais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base em todos os ensaios realizados ao longo da pesquisa e as análises dos resultados obtidos, seguem as seguintes considerações finais:

- Para os ensaios de resistência à compressão simples, os fatores controláveis com maior influência na variável resposta são os termos B, D, A, bem como os termos AB, BD, AD e C, em segunda ordem. Na faixa de variação investigada o teor de ligante (B), apresentou-se como fator principal, sendo explicado pela quantidade de reações pozolânicas existentes no ligante álcali ativado, que resulta no aumento gradativo da resistência do material. O fato explica também a influência do tempo de cura (D), como segundo fator principal, pois quanto maior o tempo de cura, maior a quantidade de reações que influenciam no comportamento mecânico. O peso específico aparente seco (A) apresentou-se como terceiro fator principal, explicado, pelo maior número de contato intergranular o que a reduz a porosidade, gerando uma maior mobilização de atrito entre as partículas e, conseqüentemente, aumentando a resistência. O módulo de sílica (C), em menor magnitude, também apresentou significativa influência na variável resposta. O fato pode ser explicado pelas reações imediatas ocorridas entre íons de Ca^{2+} , provenientes da cal de carbureto, com as moléculas de sílica livres, provenientes do silicato de sódio (Na_2SiO_3), formando produtos de reação como C-S-H ou (C,N)-S-H em períodos relativamente curtos. Com os resultados conclui-se que, para o maior o peso específico aparente seco, ambos os teores de ligante e ambos os tempos de cura, a utilização do módulo de sílica igual a 2 é a melhor opção dentro da faixa estudada, apresentando os melhores resultados em detrimento da dosagem com módulo de sílica igual a 1. Mesmo assim os resultados com módulo de sílica igual a 1 com as mesmas condições quanto ao peso específico aparente seco, teor de ligante e tempo de cura, também apresentaram resultados suficientemente altos para aplicação em campo.
- a) Para os ensaios de módulo de cisalhamento inicial, os resultados indicam como fator principal os termos A, bem como os termos B, D e AC, em segunda ordem. Na faixa de variação investigada, o peso específico aparente seco (A), apresentou-se como fator principal, onde a redução da porosidade dos corpos de prova resulta na aproximação das partículas, aumentando a quantidade de pontos de contato, contribuindo com a mobilização de atrito intergranular e conseqüentemente aumentando a resistência e

rigidez do material, como já abordado anteriormente. O teor de ligante (B) se mostrou como segundo fator principal, visto que, neste caso, o teor de material cimentante, é responsável pela quantidade de reações pozolânicas que geram produtos de reação e conseqüentemente elevando a resistência e rigidez do material, como também já abordado anteriormente. O que também explica o tempo de cura (D) como terceiro fator principal, pelo fato das reações pozolânicas ocorrerem ao longo do tempo em um processo gradativo, resultando em maiores valores de resistência e rigidez em maiores períodos de cura. Por fim, a interação entre o peso específico aparente seco e o módulo de sílica (AC) se mostraram como o quarto fator principal, o que pode ser explicado pela quantidade de reações imediatas ocorridas entre cátions de cálcio (Ca^{2+}) e as moléculas de sílica (SiO_2) livres, provenientes do silicato de sódio (Na_2SiO_3), formando produtos de reação em períodos relativamente curtos. Com os resultados conclui-se que, as dosagens com módulo de sílica igual a 2 apresentam maior módulo de cisalhamento inicial em detrimento da dosagem com módulo de sílica igual a 1, independentemente do período de cura. Entretanto o aumento de rigidez, com o tempo, é maior para as dosagens com módulo de sílica igual a 1, tendo as dosagens com módulo de sílica igual a 2 um aumento pouco significativo.

- b) A perda de massa individual (PMI) das amostras com peso específico aparente seco de 16kN/m^3 e 20% de ligante foi maior em detrimento das amostras de 18kN/m^3 com 30% de ligante. Para as dosagens de 16kN/m^3 e 20% de ligante, em ambos os módulos de sílica, houve crescimento gradativo da perda de massa nos três primeiros ciclos, apresentando uma perda maior no terceiro ciclo. Em contrapartida a PMI para as amostras com módulo de sílica de 1, apresentou menor variação entre as perdas ao longo dos ciclos em comparação com a dosagem de módulo de sílica igual a 2, que apresentou um pico de perda individual no sétimo ciclo. As dosagens com de 18kN/m^3 e 30% de ligante, apresentaram pequena variabilidade entre si, apresentando perdas de massa individual regulares. Para os resultados médios de PMI nenhum dos valores obtidos ultrapassou a margem de 0,5%, e ainda, a melhor condição apresentou valores menores que 0,05% apresentando uma PMI extremamente baixa, configurando um desempenho extremamente satisfatório. Os resultados de PMI médios para as amostras com módulo de sílica igual a 2 apresentaram o melhor e o pior resultado em detrimento das demais, onde nota-se um comportamento semelhante ao desempenho, das mesmas dosagens,

nos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias, as quais apresentaram o melhor e o pior resultado.

- c) Para a perda de massa acumulada (PMA), as amostras com peso específico aparente seco de 16kN/m^3 e teor de ligante de 20%, apresentaram maior perda de massa acumulada ao final dos ciclos, em detrimento das amostras com 18kN/m^3 e 30% de ligante, em ambos os módulos de sílica, como já esperado. As dosagens com 18kN/m^3 e 30% de ligante, apresentaram perda de massa acumulada menor que 0,5%, o que configura um desempenho extremamente satisfatório. As demais dosagens apresentaram valores maiores, entretanto inferiores a 6%. Assim como na PMI, as dosagens que compreendem um módulo de sílica igual a 2 apresentaram o melhor e o pior resultado em detrimento das demais, onde, como já citado anteriormente. Com os ensaios de durabilidade, conclui-se que para a melhor condição em ambos os módulos de sílica, o material apresenta integridade física significativa cumprindo os requisitos normativos para aplicação em campo.
- d) Os resultados obtidos pelo módulo de cisalhamento inicial ao longo dos ciclos de durabilidade, apresentaram comportamentos semelhantes entre si para mesmas dosagens, independentemente dos módulos de sílica. As amostras com peso específico aparente seco de 18kN/m^3 e 30% de ligante, para ambos os módulos de sílica, apresentaram comportamento progressivo ao longo dos ciclos, com aumento gradativo do módulo de cisalhamento inicial, sendo o maior resultado obtido no ciclo de número 12, onde para Ms 1 o módulo de cisalhamento inicial foi de $7315,26\text{ MPa}$, e de $6707,91\text{ MPa}$ para Ms 2. Sabe-se que os ciclos de molhagem, secagem e escovação, acarretam na perda de massa das amostras, colaborando com a degradação da rigidez ao longo dos ciclos. Em contrapartida, também é sabido, que o teor de ligante álcali ativado, cujas reações pozolânicas geram produtos de reação que elevam a resistência e rigidez do material, não conclui o processo reativo em um período de cura de 7 dias, ao qual as amostras foram submetidas para a realização do ensaio. As amostras com peso específico aparente seco de 16kN/m^3 e 20%, para ambos os módulos de sílica, apresentaram queda dos valores de módulo de cisalhamento inicial no ciclo 6, apresentando um comportamento relativamente estável nos ciclos subsequentes. Para as amostras com Ms 1, houve um aumento dos resultados, entre os ciclos 1 e 3 na ordem de 5% e entre os ciclos 6 e 9 na ordem de 23%. Já nas amostras Ms 2, as amostras não apresentaram aumento de rigidez entre os ciclos, havendo uma redução gradativa dos

resultados de módulo de cisalhamento inicial. Sendo assim, conclui-se que o aumento dos fatores controláveis que compreendem o peso específico aparente seco e o teor de ligante, impactam positivamente no módulo de cisalhamento inicial, diferentemente do módulo de sílica, onde o aumento impacta negativamente, apresentando menor desempenho. Com isso, conclui-se que para a melhor condição a degradação ocasionada pelos ciclos de molhagem e secagem não é suficiente para reduzir o módulo de cisalhamento dos corpos de prova, tendo, ao invés disso, um aumento gradativo até o final dos ciclos. Em contrapartida para a pior condição a degradação dos corpos de prova ocasionou a redução do módulo de cisalhamento ao longo dos ciclos.

- e) De modo geral, a redução do parâmetro η/B_{iv} , para ambos os módulos de sílica, resultou no aumento da resistência à compressão simples das amostras. Igualmente ocorrido para os ensaios de módulo de cisalhamento inicial. Entretanto, houve divergência nos expoentes de ajuste interno das curvas, visto que, ao saber que os resultados de resistência à compressão simples foram influenciados, tanto pela porosidade quanto pelo teor de ligante em magnitudes aproximadas, foi estabelecida a utilização do expoente de ajuste interno igualado a 1. E sabendo-se também, que os resultados de módulo de cisalhamento inicial foram influenciados de forma mais expressiva pela porosidade, em comparação aos demais fatores, foi estabelecida a utilização de um expoente interno de 0,28.
- f) O comportamento dos ensaios de resistência à compressão simples e módulo de cisalhamento inicial foi normalizado, em relação ao tempo de cura. Para o ensaio de resistência à compressão simples, as normalizações realizadas para ambos os módulos de sílica resultaram em equações iguais, apresentando coeficientes de determinação na ordem de 95%, também para ambas as curvas, indicando grande representatividade e viabilidade de utilização deste método. Para o módulo de cisalhamento inicial, as normalizações realizadas para ambos os módulos de sílica, resultaram em equações também iguais, apresentando coeficientes de determinação na ordem de 84% e 90%, para as amostras com Ms 1 e Ms 2 respectivamente, também indicando alta representatividade e viabilidade de utilização. Conclui-se que os parâmetros apresentaram resultados consistentes e representativos, sendo comprovada a viabilidade de aplicação do método.
- g) No ensaio *simple shear* o material apresentou um comportamento que se difere do convencional. Nos resultados apresentados pela tensão cisalhante *versus* deformação

cisalhante, as amostras com tensões efetivas de 50 kPa e 100 kPa, apresentaram pico bem definido, entretanto, indicaram ruptura abrupta acarretando em uma queda de resistência instantânea após a tensão de cisalhamento máxima alcançada. O ensaio com tensão efetiva de 150 kPa não apresentou pico de resistência, o que pode ser explicado pelo fato de não ter sido levado a maiores deformações, antes do descarregamento. Após o descarregamento e recarregamento, o material apresentou a mesma tendência obtida no carregamento inicial. Ao final dos ensaios, as amostras apresentaram plano de ruptura bem definido, indicando um comportamento frágil. Os parâmetros de resistência obtidos foram, um ângulo de atrito (ϕ') de 62,4° e um intercepto coesivo de (c') de 233,7 kPa. Com os resultados, conclui-se que o material apresenta uma melhora na resistência e nos parâmetros de resistência do material em comparação ao material em estado natural, possibilitando a aplicação deste em campo.

- h) Os valores de módulo cisalhante apresentaram uma redução para todas as tensões efetivas, seguindo de um aumento nos resultados. Este aumento apresentou maior magnitude para o ensaio de maior tensão efetiva reduzindo a magnitude ao reduzir as tensões efetivas. Ao fim do ensaio, as amostras com tensões efetivas de 50 kPa e 100 kPa, apresentaram queda abrupta em função da ruptura das amostras. Já o ensaio com tensão efetiva de 150 kPa, após o ciclo de descarregamento e recarregamento, apresentou a mesma tendência comportamental que havia sido apresentada antes do ciclo. Os resultados máximos de

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS

De forma a agregar ao conhecimento obtido por meio desta pesquisa e dar prosseguimento à novas faixas de pesquisa referentes ao tema, a autora sugere as seguintes possíveis pesquisas:

- a) Estudar outras porcentagens de cal de carbureto e teor de álcalis a fim de entender comportamento de outras dosagens, utilizando o método *one-part*.
- b) Aplicar o ligante estudado em outros tipos de solo, incluindo rejeitos de mineração afim de avaliar o desempenho e a aplicabilidade.
- c) Avaliar o impacto da temperatura de cura no desempenho mecânico das dosagens utilizadas nesta faixa.

- d) Realizar a Análise de Ciclo de Vida (ACV), afim de analisar o impacto socioambiental e econômico do ligante desenvolvido.
- e) Realizar a análise microestrutural das dosagens do ligante álcali ativado, pelos ensaios DRX, FRX e MEV.
- f) Analisar o comportamento geomecânico das amostras por ensaios triaxiais com, e aumentar a faixa estudada pelo ensaio *simple shear*.

REFERÊNCIAS

- 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.261>>
- AKPOKODJE, E. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime, **Quarterly Journal of Eng. Geology and Hydrogeology**, 18, p. 173–180, 1985.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6276**: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Philadelphia, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2845**: Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 559**: Standard test method for wetting and drying compacted soil-cement mixtures, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618**: Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2019.
- ANDERSEN, K. H.; POOL, J. H.; BROWN, S. F.; ROSENBRAND, W. F. (1980). **Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay**. **Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)**, v. 106, n. GT5, p. 499-529.
- ARAÚJO, S., C., J., F., N. **Análise de Microestrutura e de Características Geotécnicas de Misturas de Resíduo de Polimento de Porcelanato e Solo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PEC/UFRGN, Natal.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). 2016. **Informações Técnicas – Processos de Fabricação**. Disponível em:< <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>> Acesso em: 15 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2019). Aplicações: Solo-cimento. **Dados do Setor**. Disponível em: <https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento/>. Acesso em 22 de abr de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Solo – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solos – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Dados do setor**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/revista-anicer/revista-96/historia/>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Dados do setor**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>>. Acesso em: 15 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Dados do setor**. São Paulo, SP. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/historia-da-ceramica#:~:text=As%20primeiras%20cerâmicas%20de%20que,Antiguidade%20em%20grandes%20centros%20comerciais>>. Acesso em: 14 abr. 2021.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de Solos com Adição de Cal. Um Estudo a Respeito da Reversibilidade das Reações que Acontecem no Solo após a Adição de Cal**. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – UFOP, Ouro Preto.

BAO, Y.; GRUTZECK, M.W.; JANTZEN, C. M. Preparation and properties of hydroceramic waste forms made with simulated Hanford low-activity waste. **Journal. Am. Ceram. Soc.** 88: 3287-3302, 2005.

BEHNOOD, A. Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. **Transportation Geotechnics**, v. 17, p. 14–32, 2018.

BILONDI, M. P., TOUFIGH, M. M., TOUFIGH, V., (2018). **Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass power-clay geopolymer**. *Constr. Bulding. Mater.*, 183, 417-428.

BRASIL. Constituição (2010). **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquixídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização)**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CASTRO, J. F. A. (2015). **Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina**. **Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil**. Especialização em Geotecnia, Universidade do Porto.

CHU, J., VARASKIN, S., KLOTZ, U. MENGÉ, P. **Construction processes**, in 17th International Conference on Soil mechanics and geotechnical engineering, Amsterdam, 2009, pp. 3006-3135.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; and RAD, N. S. Cemented sands under static loading. **J. Geotech. Eng. Div.**, 107 (6), pp. 799–817, 1981.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; and HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007) 133:2 (197), 197–205, 2007.

CONSOLI, N. C., LOPES JUNIOR, L.S., PRIETTO, P.D.M., FESTUGATO, L., CRUZ, R.C. (2011). Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 137, 628-632

CONSOLI, N. C. et al. Impact of Severe Climate Conditions on Loss of Mass, Strength, and Stiffness of Compacted Fine-Grained Soils Portland Cement Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 04018174, 2018. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002392>>

CORTE, M. B. **Desenvolvimento de equipamento para ensaio simple shear**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CORTE, M. B.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C. Shear Strength of a Sand Under Plane Strain Conditions. In: **Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges: Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE)**, 17-20 November 2019, Cancun, Mexico. IOS Press, 2019. p. 56.

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.

CRUZ, R., B., **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

DAVIDOVITS, J. (1982). **Mineral polymers and methods of making them**. U.S. Patent (4). 349-386.

DAVIDOVITS, J. (1994). **Geopolymers: man-made rock geosynthesis and resulting development of very early high strength cement**. *J Master Educ.* 16 (2&3), 91-137.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Inorganic polymeric new materials**. *J. Therm. Anal.*, 37, 1633–1656, 1991.

DOHERTY, J. P.; FAHEY, M. (2011a). A three-dimensional finite element study of the direct simple shear test. *Proceedings. 2nd Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG2*, Perth, Western Australia 1, 341–346.

DOHERTY, J. P.; FAHEY, M. (2011b). Three-dimensional finite element analysis of the direct simple shear test. *Computer and Geomechanics*, v. 38, n. 7, p. 917-924.

DUXSON, P., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., MALLICOAT, S. W., KRIVEN, W. M., VAN DEVENTER, J. S. J. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 269, n. 1 3, p. 47 58, 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775705004966>>

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

DUXSON, P., PROVIS, J., L. Designing precursors for geopolymer cements. **J. Am. Ceram. Soc.**, 91, pp. 3864-3869, 2008.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; PALOMO, A. Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1200-1209, 2017.

FESTUGATO, L. **Comportamento mecânico de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. 2011. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GAAFER., MANAR., BASSIONI., HESHAM., MOSTAFA., TAREQ., **Soil improvement techniques**, International journal of scientific and engineering research. vol. 6, no. 12, pp. 217-222, 2015.

GLUKHOVSKY, V. D.; PASHKOV, I. A.; YAVORSKY, G. A. New building material, in Russian, Bulletin of Technical Information, **GlavKievStroy**, Kiev, 1957.

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

GLUKHOVSKY, V.D. **Soil silicate articles and structures**. Budivel'nyk Publish., Kiev, in Russian. 1967.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1ª Edição, São Paulo. 1998.

INDRARATNA, B. and CHU, J. (Eds) (2005) Ground improvement – case histories. **Elsevier**, Oxford, UK

INGLES, O. G. and METCALF, J. B. (1972). **Soil stabilization principles and practice**. Technical.

JOHN, D. A. S., POOLE A. W., SIMS I. **Concrete Petrography**. A handbook of investigative techniques, John Wiley, 1998.

JUNIOR, M. C., TANNO, L. C., SINTONI, A., MOTTA, J. F. M., COELHO, J. M. A Indústria de Cerâmica Vermelha e o Suprimento Mineral no Brasil: Desafios para o Aprimoramento da Competitividade, **Cerâmica Industrial**, São Paulo, SP, 2012.

KIRSCH, K, MOSELEY, M. P. **Ground Improvement**, 2^a ed. Oxon, UK: Spon Press, 2004. p. 331-428. ISBN0-203-57085-5

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.

KRIVENKO, P. 2017. **Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials**. J. Ceram. Sci. Technol. 08 [3] 323-334.

LAMBE, T.W. and WHITMAN, R.V. (1969) **Soil Mechanics**. John Wiley & Sons, New York.

LI, L.G., ZHUO, Z.Y., CHEN, J.J., *et al.*, **Reutilizing ceramic polishing waste as powder filler in mor-tar to reduce cement content by 33% and increase strength by 85%**, Powder Technology. n. 355, pp. 119-126, 2019.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos Solos II: Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Viçosa: Imprensa Universitária – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

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

LIMA, J. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**, Tese de D.Sc., EPUSP/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2010.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) Florianópolis, SC. 2017.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. 2011. 227p Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LOPES, M. V., MARTINS, G. A. P., MOREIRA, J. P. M., BENINI, L. **Rota de Fabricação do Porcelanato Polido Retificado**. SAEMPRO. Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa. 2018.

LOTERO CAICEDO, A. M. **Improvement of a granular soil by alkaline activation of red ceramic wastes and carbide lime** – 2020. Ph.D.'s Dissertation (Ph.D. in Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

LUUKKONEN, T., ABDOLLAHNEJAD, Z., YLINIEMI, J., KINNUMEN, P., ILLIKAINEN, M. One-part alkali-activated materials: A review. **Cemented and Concrete Research**, vol 103, p 21-34, 2018.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.

MALLICOAT, S. SARIN, P. KRIVEN, W. M. Novel alkali-bonded ceramic filtration membranes. **Ceram Eng. Sci. Proc.** 26:26–37, 2005.

MAS, M. A.; MONZÓ, J., PAYÁ, J.; REIG, L.; BORRACHERO, M. V. Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement. *Advances in Cement Research* (2015).

MATTOS, V. L. D.; BARBETTA, P. A.; SAMOHYL, R. W. Identificação de Efeitos de dispersão em experimentos fatoriais 2k e 2k-p. **Revista Produção**. vol 14. 2004. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/prod/a/VgmNZtXkYqYJL3HCd7rrwck/?format=pdf&lang=pt>>.

MDEGE, N. D. *et al.* The 2×2 cluster randomized controlled factorial trial design is mainly used for efficiency and to explore intervention interactions: a systematic review. **Journal of Clinical Epidemiology**, [s. l.], v. 67, n. 10, p. 1083 1092, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclinepi.2014.06.004>>

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, Ed. Pini, p.573, 1994.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry**. Cement and Concrete Composites 31(??): 601–605. 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Análise-síntese da transformação mineral no Brasil**. Brasília: SGM, 2009.

MODESTO, C., BRISTOT, V., MENEGALI, G., *et al.*, Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais, **Revista Cerâmica Industrial**, n. 8, v. 4, pp. 14-18, 2003.

MONCALEANO ACOSTA, C.J. **Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de vidro e cal de casca de ovo** - 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. New York, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2017.

MOSELEY, M. P., KIRSCH, K. **Ground improvement**, 2nd Ed., E & FN Spon, London. 2004.

MUNFAKH G. A. Ground improvement engineering, The state of U.S. practice: part 1, methods. **Ground Improvement**, 1, No. 4, 193±214. 1997.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP (2009) **Recommended Practice for stabilization of subgrade soils and base materials**, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, 67p.Nati

NEGI A. S., FAIZAN, M., SIDDHARTH D. P., SINGH, R. **Soil stabilization using lime**. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 2, Issue 2, ISSN: 2319-8753, India, 2013.

NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J., SHAIKH, F. U. A. Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate. **Ceramics International**, vol 41, issue 4, pp. 5696-5704, 2015.

NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J., Influence of type of fiber on tensile performance of one-part “dry-mix” strain hardening geopolymer composite (SHGC) **Proceedings of the 11th FIB International Symposium in Civil Engineering, FIB 2016**, pp. 831 - 838 2016 11th Tokyo, 2016.

NICHOLSON, P. G. **Soil improvement and ground modification methods**. 1st ed. Massachusetts. Elsevier Inc., 2015.

NWEKE, C. C. **Constitutive modeling of weakly cemented sands**. UC Berkeley. ProQuest ID: Nweke_berkeley_0028E_17436. Merritt ID: ark:/13030/m5ng9xxs.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. rev. – Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.118 p.

OSULA, D. O. A Lime modification of problem laterite. **Engineering Geology**, Volume 30, Issue 2, Pages 141-154, ISSN 0013-7952, 1991.

OSULA, D. O. A. **A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite**, Engineering Geology, Volume 42, Issue 1, Pages 71-81, ISSN 0013-7952, 1996.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. **Woodhead P ed. Cambridge: Elsevier Ltd**, 2014.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes. *Cement and Concrete Research*, [s. l.], v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698002439>.

PALOMO, A. and DE LA FUENTE, J. I. L. Alkali-activated cementitious materials: alternative matrices for the immobilization of hazardous wastes – part I. *Cem. Conc. Res.* 33: 281-288, 2003.

PALOMO, A.; ALONSO, S.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; SOBRADOS, I. AND SANZ, J. Alkaline activation of fly ashes. A ^{29}Si NMR study of the reaction products, *J. Am. Ceramic Soc.*, No. 87 [6], pp. 1141-1145, 2004.

PENG, M.X., WANG, Z.H., SHEN, S.H. *et al.* Synthesis, characterization and mechanisms of one-part geopolymeric cement by calcining low-quality kaolin with alkali. *Mater Struct* **48**, 699–708 (2015). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0350-3>

PROVIS, J. L., DEVENTER, J. S. 2009. **Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications**. UK: Woodhead Publishing Limited, 464 p.

PROVIS, J. L., VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali-activated materials. State of the Art Report**, RILEM TC 224-AAM J. L. Provis & J. S. J. van Deventer, eds., 2014.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Milestones in the analysis of alkali-activated binders. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 4, n. 2, p. 74-84, 2014.

PRUSINSKI, J.R., BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils**. *Transportation Research Record*, Washington, D.C., nº 1652, p.215-227, 1999.

PUERTAS, F., GARCIA-DIAZ, I., BARBA, A., *et al.*, **Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production**. *Cement and Concrete Composites*. v. 30, n. 9, pp. 798–805, Oct. 2008.

RAHIER, H.; VAN MELE, B.; BIESEMANS, M.; WASTIELS, J.; WU, X. low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. **Journal of Materials Science**. 31, 71–79. 1996. <https://doi.org/10.1007/bf00355128>

RAMOS, G. A. **Cimento geopolimérico contendo resíduo do polimento de placas cerâmicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC. 2017.

RANDOLPH, M. F., WROTH, C. P. Application of the failure state in undrained simple shear shaft capacity of driven piles. **Géotechnique**, v. 31, n. 1, p. 143–157, 1981.

REPETTE, W. L. C. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2010. p. 825-862.

SARGENT, P. **The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation**. 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.

SANTANA, G., L., BARBOSA NETO, M., C., CAMPOS, L., F., A., MACEDO, D., A., DUTRA, R., P., S. **Efeito da Adição do Resíduo de Polimento de Porcelanato nas Propriedades de Blocos Cerâmicos**. CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais XXII. 2016. Natal.

SEBRAE/ESPM. **Cerâmica Vermelha. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM – Relatório Completo**. Sebrae Nacional, São Paulo, 2008.

SEBRAE. **Construção Civil – Cerâmica Vermelha**. Sistema de Inteligência de Mercado. Boletim de Inteligência, Sebrae Nacional, São Paulo, 2015. Disponível em: <

http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/%24File/5846.pdf>.

SEVERO, C., G., S., COSTA, D., L., BEZERRA, M., T., MENEZES, R., R., NEVES, G., A., Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8.2, p. 55-67, 2013.

SHEHAB, H. K.; EISA, A. S.; WAHBA, A. M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 126, p. 560-565, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.059>>

SHI, C., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. **Cem. Concr. Res.** 41 (7), 750–763, 2011.

SHOOSH PASHA, I., ALIJANI SHIRVANI, R. (2015). **Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. Geomechanics and Engineering.** 8. 17-31. 10.12989/gae.2015.8.1.017.

SILVANO, L. W. **Estabilização alcalina de misturas de areia, pó de telha cerâmica e cal de carbureto.** 2020. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

SILVEIRA, N., C., G., GOULART, L., CALADO, C., R., **Reaproveitamento do resíduo proveniente do polimento do porcelanato na melhoria no conforto térmico de novos pisos cerâmicos.** Congresso Brasileiro de Cerâmica, LVII e Congresso Iberoamericano de Cerâmica V. 2013. Natal.

SOFI, M.; VAN DEVENTER, J. S. J.; MENDIS, P. A.; LUKEY, G. C. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPC's). **Cement Concrete Res**, 37, 251-257, 2006.

SOMNA, K., JATURAPITAKKUL, C., KAJITVICHYANUKUL, P., CHINDAPRASIRT P. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel**, v. 90, n. 6, p. 2118-2124, 2011.

SOUZA, A. J. S. S. Técnicas computacionais 3D e a utilização de novos materiais no desenvolvimento de modelos para indústria cerâmica. **Desing e Materiais 2019 – III Congresso Internacional e IX Workshop**, p. 16-28. Lorena, 2020.

SPINELLI, L. F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS. Porto Alegre. 1999. 133p

STEINER, L. R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UNESC. Florianópolis, 2014. 135p.

SUJIT, D. and MONOWAR, H. (2012). Lime Stabilization of Soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 24. 707-714. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431.

THOMAS, R., YE, H., RADLIŃSKA, A., PEETHAMPARAN, S., (2016). **Alkali-Activated Slag Cement Concrete: A closer look at a sustainable alternative to Portland cement**. *Concrete International*. 38. 33-38.

TORRES-CARRASCO, M. **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos**. Activación, comportamiento y durabilidad. Memoria para optar al título de Doctor. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC). Madrid, 2015.

TORRES-CARRASCO, M., PUERTAS, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 342-354, 2017.

UNITED STATES ARMY CORP ENGINEERS – USACE (1984). **Soil stabilization for pavements - Mobilization construction**, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 32p.

UNITED STATES ARMY CORP ENGINEERS – USACE (1994). **Soil stabilization for pavements**, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 57p.

VAN BALEN, K., **Understanding the lime cycle and its influence on historical construction practice**, in Proceedings of the First International Congress on Construction History, ed. S. Huerta, Instituto Juan de Herrera, Universidad Politecnica de Madrid, 2003, 2041-2054.

VIEIRA, G. V.; MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. **Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção civil**, Pós Graduação em Engenharia Civil, Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), Porto Alegre, RS (2004).

WANG, S. D., SCRIVENER, K. L., PRATT, P. L. "Factors affecting the strength of alkaliactivated slag". **Cement and Concrete Research**. 24, 6, 1033-1043. 1994.

WIGGERS, W. S., SANTOS, R. A., HOTZA, D. Evolução da Superfície do Porcelanato ao Longo do Processo de Polimento. **Cerâmica Industrial**. Santa Catarina 12 (1/2) jan./abr. 2007.

WHITMAN, W. G.; DAVIS, G. H. B. The Hydration of Lime. **Ind. Eng. Chem**. 1926, 18, 118-120.

WU, J., MIN, Y., LI, B., ZHENG, X. Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading, **Soils and Foundations**, vol 61, Issue 4, 2021, pp 974-988, issn 0038-0806, doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.001.

ZHAO, H., LIU, J., GUO, J., ZHAO, C., GONG, B. 2014, Reexamination of Lime Stabilization Mechanisms of Expansive Clay, **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 7.

APÊNDICE A – Tratamentos de resistência e rigidez

Resistência à compressão simples das amostras

Amostra*	RCS (kPa)	η (%)	B_{iv} (%)	η/B_{iv}
CP_18_7_30_1_I	4713,78	27,99	23,75	1,18
CP_18_7_30_1_II	5049,58	27,24	23,99	1,14
CP_18_7_20_1_I	1722,90	28,71	15,90	1,81
CP_18_7_20_1_II	2464,66	29,17	15,80	1,85
CP_16_7_30_1_I	2390,81	34,47	21,61	1,59
CP_16_7_30_1_II	2020,47	35,13	21,39	1,64
CP_16_7_20_1_I	1575,17	35,68	14,34	2,49
CP_16_7_20_1_II	1714,60	34,82	14,54	2,40
CP_18_28_30_1_I	9236,15	27,23	24,00	1,13
CP_18_28_30_1_II	9134,64	28,05	23,73	1,18
CP_18_28_20_1_I	4472,85	29,01	15,83	1,83
CP_18_28_20_1_II	4740,37	28,09	16,04	1,75
CP_16_28_30_1_I	4949,58	34,39	21,64	1,59
CP_16_28_30_1_II	5716,93	33,84	21,82	1,55
CP_16_28_20_1_I	3020,70	35,46	14,39	2,46
CP_16_28_20_1_II	2748,07	34,68	14,57	2,38
CP_18_7_30_2_I	5818,52	27,00	24,70	1,09
CP_18_7_30_2_II	6297,51	26,97	24,71	1,09
CP_18_7_20_2_I	3147,14	28,50	16,43	1,73
CP_18_7_20_2_II	2357,50	28,38	16,46	1,72
CP_16_7_30_2_I	2710,27	34,31	22,23	1,54
CP_16_7_30_2_II	2789,14	33,62	22,46	1,50
CP_16_7_20_2_I	840,53	35,72	14,77	2,42
CP_16_7_20_2_II	1838,75	34,56	15,04	2,30
CP_18_28_30_2_I	9178,49	27,57	24,51	1,12
CP_18_28_30_2_II	10199,12	26,89	24,74	1,09
CP_18_28_20_2_I	4018,64	27,75	16,60	1,67
CP_18_28_20_2_II	4452,41	27,95	16,56	1,69
CP_16_28_30_2_I	6022,01	33,59	22,47	1,49
CP_16_28_30_2_II	5153,51	34,00	22,33	1,52
CP_16_28_20_2_I	2795,64	35,08	14,92	2,35
CP_16_28_20_2_II	3145,23	34,50	15,05	2,29
CP_17_22,5_25_1,5_I	5266,37	30,44	19,53	1,56
CP_17_22,5_25_1,5_II	4534,68	30,92	19,39	1,59
CP_17_22,5_25_1,5_III	5012,53	31,24	19,30	1,62
CP_17_22,5_25_1,5_IV	4714,72	31,83	19,14	1,66

*CP_U_W_X_Y_Z: *Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de Cura; Teor de Ligante; Módulo de Sílica; Repetição*

Módulo de cisalhamento inicial das amostras

Amostra*	G ₀ (MPa)	η (%)	B _{iv} (%)	η/B _{iv} ^{0,28}
CP_18_7_30_1_I	4340,83	27,99	23,75	11,53
CP_18_7_30_1_II	5157,02	27,24	23,99	11,19
CP_18_7_20_1_I	3815,33	28,71	15,90	13,24
CP_18_7_20_1_II	4353,39	29,17	15,80	13,47
CP_16_7_30_1_I	3253,83	34,47	21,61	14,58
CP_16_7_30_1_II	3292,79	35,13	21,39	14,90
CP_16_7_20_1_I	3433,94	35,68	14,34	16,93
CP_16_7_20_1_II	3254,67	34,82	14,54	16,46
CP_18_28_30_1_I	6063,99	27,23	24,00	11,49
CP_18_28_30_1_II	5968,84	28,05	23,73	11,86
CP_18_28_20_1_I	4009,35	29,01	15,83	13,77
CP_18_28_20_1_II	5183,67	28,09	16,04	13,30
CP_16_28_30_1_I	3847,23	34,39	21,64	14,82
CP_16_28_30_1_II	4020,69	33,84	21,82	14,56
CP_16_28_20_1_I	3236,04	35,46	14,39	17,16
CP_16_28_20_1_II	3284,04	34,68	14,57	16,74
CP_18_7_30_2_I	5990,78	27,00	24,70	11,3
CP_18_7_30_2_II	5753,57	26,97	24,71	11,28
CP_18_7_20_2_I	5045,99	28,50	16,43	13,4
CP_18_7_20_2_II	4693,77	28,38	16,46	13,33
CP_16_7_30_2_I	3519,34	34,31	22,23	14,67
CP_16_7_30_2_II	3673,70	33,62	22,46	14,34
CP_16_7_20_2_I	2627,20	35,72	14,77	17,16
CP_16_7_20_2_II	3200,52	34,56	15,04	16,54
CP_18_28_30_2_I	4340,83	27,57	24,51	11,83
CP_18_28_30_2_II	5157,02	26,89	24,74	11,49
CP_18_28_20_2_I	3815,33	27,75	16,60	13,62
CP_18_28_20_2_II	4353,39	27,95	16,56	13,85
CP_16_28_30_2_I	3253,83	33,59	22,47	14,86
CP_16_28_30_2_II	3292,79	34,00	22,33	15,18
CP_16_28_20_2_I	3433,94	35,08	14,92	17,29
CP_16_28_20_2_II	3254,67	34,50	15,05	16,82
CP_17_22,5_25_1,5_I	4520,30	30,44	19,53	13,24
CP_17_22,5_25_1,5_II	4834,76	30,92	19,39	13,48
CP_17_22,5_25_1,5_III	4632,86	31,24	19,30	13,64
CP_17_22,5_25_1,5_IV	4581,58	31,83	19,14	13,93

*CP_U_W_X_Y_Z: Corpo de prova; Peso específico aparente seco; Tempo de Cura; Teor de Ligante; Módulo de Sílica; Repetição

APÊNDICE B – Tabelas ANOVA

Resistência à compressão simples

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	16	188659017	11791189	50,49	0,000
Linear	4	171533318	42883329	183,62	0,000
Peso Esp. Ap. Seco (A)	1	49283673	49283673	211,02	0,000
Ligante (B)	1	61011987	61011987	261,24	0,000
Módulo de Sílica (C)	1	1634750	1634750	7,00	0,016
Cura (D)	1	59602907	59602907	255,21	0,000
Interações de 2ª Ordem	6	15666584	2611097	11,18	0,000
A*B	1	8037792	8037792	34,42	0,000
A*C	1	754975	754975	3,23	0,088
A*D	1	2167727	2167727	9,28	0,007
B*C	1	224547	224547	0,96	0,339
B*D	1	4446293	4446293	19,04	0,000
C*D	1	35251	35251	0,15	0,702
Interações de 3ª Ordem	4	377162	94291	0,40	0,804
A*B*C	1	60422	60422	0,26	0,617
A*B*D	1	6423	6423	0,03	0,870
A*C*D	1	67440	67440	0,29	0,597
B*C*D	1	242878	242878	1,04	0,321
Interações de 4ª Ordem	1	130	130	0,00	0,981
A*B*C*D	1	130	130	0,00	0,981
Curvatura	1	1081823	1081823	4,63	0,044
Erro	19	4437415	233548	-	-
Total	35	193096432	-	-	-
Resumo do modelo					
Desvio Padrão		483,268		R ²	95,77%
R ² ajustado		97,70%		R ² de previsão	91,17%

Módulo de cisalhamento inicial					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	16	34205060	2137816	19,63	0,000
Linear	4	30690668	7672667	70,46	0,000
Peso Esp. Ap. Seco (A)	1	25000786	25000786	229,59	0,000
Ligante (B)	1	4211123	4211123	38,67	0,000
Módulo de Sílica (C)	1	411117	411117	3,78	0,067
Cura (D)	1	1067642	1067642	9,80	0,005
Interações de 2ª Ordem	6	2152479	358747	3,29	0,021
A*B	1	308222	308222	2,83	0,109
A*C	1	1031894	1031894	9,48	0,006
A*D	1	194583	194583	1,79	0,197
B*C	1	23053	23053	0,21	0,651
B*D	1	194428	194428	1,79	0,197
C*D	1	400300	400300	3,68	0,070
Interações de 3ª Ordem	4	831077	207769	1,91	0,151
A*B*C	1	242484	242484	2,23	0,152
A*B*D	1	36462	36462	0,33	0,570
A*C*D	1	167861	167861	1,54	0,229
B*C*D	1	384271	384271	3,53	0,076
Interações de 4ª Ordem	1	39332	39332	0,36	0,555
A*B*C*D	1	39332	39332	0,36	0,555
Curvatura	1	491503	491503	4,51	0,047
Erro	19	2068937	108891	-	-
Total	35	36273997	-	-	-
Resumo do modelo					
Desvio Padrão		329,987		R ²	89,49%
R ² ajustado		94,30%		R ² de previsão	77,53%