

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

**Estabilização alcalina de misturas de areia, pó de telha cerâmica e
cal de carbureto**

Lukas Wereszko Silvano

Porto Alegre
2020

LUKAS WERESZKO SILVANO

**ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE MISTURAS DE AREIA, PÓ DE
TELHA CERÂMICA E CAL DE CARBURETO**

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

Porto Alegre
2020

LUKAS WERESZKO SILVANO

**ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE MISTURAS DE AREIA, PÓ DE
TELHA CERÂMICA E CAL DE CARBURETO**

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

Porto Alegre, 11 de Setembro de 2020

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

Prof^a. Karla Salvagni Heineck
Dra. pelo PPGEC-UFRGS
Coorientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nuno Miguel Cordeiro Cristelo (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro - PT)
Ph.D. pela Newcastle University – UK

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rodrigo Beck Saldanha (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao apoio de minha família, por todo o suporte e incentivo. Agradeço em especial a minha mãe Nádia por ser meu porto seguro durante toda a minha caminhada. Sem seu amparo e proteção, nada disto seria possível.

Agradeço e ressalto toda a minha admiração ao meu orientador, professor Nilo Consoli, por aceitar fazer parte deste trabalho, pela calma, dedicação e por dividir seu conhecimento e sabedoria, fatores que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço também a professora e coorientadora Karla Heineck pela atenção e contribuição nesta realização.

Expresso toda a minha gratidão aos meus parceiros de trabalho Andrés Lotero e Auxence Daassi-Gli, por todos os momentos compartilhados, desde os primeiros dias de aula até os inúmeros momentos dedicados à realização dos ensaios.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por meio de seus colaboradores. Aos demais professores um muito obrigado pela instrução e por fazerem parte do meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas de PPGEC, pelo convívio, confiança e amizade durante esse período do mestrado, em especial a Aziz Tebechrani, Gustavo Miguel, Bibiana Rossato, Danielle Barros, Andressa Silva e Hortência Fontana. Meu agradecimento aos amigos geotécnicos Brenda Correa, Guilherme Piuze, Helder Chaves, Laís Chaves, Laís Veríssimo, Lucas Dornelles, Mariana Tonini, Ricardo Menezes e demais membros de LEGG.

Aos bolsistas por todo o auxílio prestado neste mestrado. A vocês Guilherme Rochedo e Paulo Maschio deixo um muito obrigado.

A todos colaboradores relacionados ao LACER da UFRGS pela realização dos ensaios solicitados.

Incluo também os professores e demais colegas de UniRitter que me acompanham desde a graduação, em especial ao professor Daniel Winter por todo o auxílio e amizade.

Aos demais amigos de longa data, obrigado pela torcida e companheirismo.

A todos que de certa forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, o meu sincero muito obrigado.

Learning never exhausts the mind.

Leonardo da Vinci

RESUMO

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.

Propõe-se nesta dissertação discorrer sobre a utilização de diferentes materiais no âmbito da construção civil, dada a potencialidade de alguns tipos de resíduos (muitos deles descartados de forma irregular na natureza, dando origem a passivos ambientais), ainda não ou pouco explorados. A presente pesquisa tem por objetivo estudar compostos cimentantes alternativos para o melhoramento de solos com potencial aplicação em obras geotécnicas, como alternativa ao tradicional cimento Portland, tendo em vista a grande quantidade de CO₂ emitida no processo de fabricação deste. A partir da ativação alcalina pode ser feita a transformação de materiais residuais, provenientes da construção civil e/ou da indústria, em compósitos artificialmente cimentados. Este processo se dá pelo contato de um material rico em aluminossilicatos com uma solução alcalina ativadora, de modo que ao se estabelecer contato ocorre a dissolução e posterior reorganização das cadeias moleculares do material amorfo, obtendo-se como resultado um material cristalino com uma estrutura bem ordenada. Este trabalho foi elaborado a partir de um programa experimental que tem como metodologia a adição, em diferentes dosagens, de cal de carbureto (resíduo rico em óxido de cálcio), pó de telha cerâmica (material pozolânico) acrescentado de uma solução a base de hidróxido de sódio (NaOH) para a estabilização alcalina de solos granulares, neste contexto, a areia de Osório. Ao longo do experimento são testados diferentes traços de misturas para verificação do ganho de resistência, rigidez e durabilidade do material estudado. Além disso, difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) também foram realizadas para caracterizar a mineralogia e a microestrutura dos CPs.

Palavras-chave: *ativação alcalina; solos artificialmente cimentados; pó de telha cerâmica; cal de carbureto.*

ABSTRACT

SILVANO, L. W. **Alkaline stabilization of sand mixtures, ceramic tile powder and carbide lime.** 2020. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

It is proposed in this dissertation to discuss about the use of different materials in the scope of civil construction, given the potentiality of some types of waste (many of them discarded irregularly in nature, giving rise to environmental liabilities), not yet or little explored. This research aims to study alternative cement compounds for soil improvement with potential application in geotechnical works, as an alternative to the traditional Portland cement, considering the large amount of CO₂ emitted in its manufacturing process. From the alkaline activation, the transformation of residual materials, from civil construction and industry, into artificially cemented composites can be done. This process occurs through the contact of a material rich in aluminosilicates with an alkaline activating solution, so that when contact is established the dissolution and subsequent reorganization of the molecular chains of the amorphous material occurs, obtaining as a result a crystalline material with a well-ordered structure. This work was elaborated from an experimental program that has as methodology the addition, in different dosages, of carbide lime (residue rich in calcium oxide), ceramic tile powder (pozzolanic material) and a sodium hydroxide-based solution (NaOH) for the alkaline stabilization of granular soils, in this context, Osório sand. Throughout the experiment different traces of mixtures will be tested to check the strength, rigidity and durability of the material studied. Moreover, x-ray diffraction (XRD), back-scattering electron microscopy (BSEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) were also performed to characterize the mineralogy and microstructure of the specimens.

Key words: *alkaline activation; artificially cemented sand; ceramic tile powder; carbide lime.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 DIRETRIZES DA PESQUISA	21
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.3 PRESSUPOSTO	22
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	22
1.5 LIMITAÇÃO DO TRABALHO	23
1.6 DELINEAMENTO E ESTRUTURA DO TRABALHo	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 O SOLO E A SUA IMPORTÂNCIA	26
2.2 SOLOS GRANULARES	26
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	27
2.3.1 Cimentação em solos	27
2.3.1.1 Solo–Cimento Portland	28
2.3.1.2 Solo–Cal	29
2.4 PRODUÇÃO/GERAÇÃO DE RESÍDUOS E O IMPACTO AMBIENTAL	30
2.4.1 A indústria cerâmica	36
2.5 POZOLANAS	37
2.5.1 Argila	41
2.5.2 Produtos cerâmicos	42
2.5.2.1 Histórico	43
2.5.2.2 Produção	44
2.5.2.3 Classificação	45
2.5.2.4 Utilização	47
2.6 CAL DE CARBURETO	48
2.7 REAÇÕES POZOLÂNICAS	50
2.8 ESTABILIZAÇÃO POR ATIVAÇÃO ALCALINA	55
3 METODOLOGIA E PROJETO EXPERIMENTAL	65
3.1 MATERIAIS	66
3.1.1 Areia de Osório	66
3.1.2 Pó de telha cerâmica	68
3.1.3 Cal de carbureto	73

3.1.4 Hidróxido de sódio	76
3.1.5 Água.....	77
3.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	77
3.2.1 Resistência à Compressão Simples.....	77
3.2.2 Rigidez.....	78
3.2.3 Durabilidade	80
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
3.3.1 Definição de variáveis iniciais.....	82
3.3.2 Ensaio de compactação	84
3.3.3 Definição dos teores de concentração molal	86
3.3.4 Pesagem, mistura, moldagem e cura dos corpos de prova	88
3.3.5 Definição das dosagens	89
3.3.5.1 Fatores utilizados nos ensaios de RCS e Rigidez.....	90
3.3.5.2 Fatores utilizados nos ensaios de durabilidade.....	91
4 RESULTADOS	93
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	93
4.1.1 Resistência em função da concentração molal e do tempo de cura.....	93
4.1.2 Resistência em função do peso específico seco (γ_d) e dos teores de pozzolana e cal de carbureto	95
4.1.3 Resistência em função do parâmetro η/B_{IV}	97
4.1.3.1 Resistência em função do parâmetro η/B_{IV} – outras molalidades	99
4.1.4 Análise estatística dos resultados do ensaio de RCS	101
4.2 MÓDULO CISALHANTE INICIAL (G_0).....	107
4.2.1 Rigidez em função da concentração molal e do tempo de cura.....	107
4.2.2 Rigidez em função do peso específico seco (γ_d) e dos teores de pozzolana e cal de carbureto	110
4.2.3 Rigidez em função do parâmetro η/B_{IV}	111
4.2.4 Análise estatística dos resultados do ensaio de rigidez	112
4.3 RESISTÊNCIA EM FUNÇÃO DA RIGIDEZ	116
4.4 DURABILIDADE	117
4.4.1 Durabilidade em função do peso específico seco (γ_d) e dos teores de pozzolana.....	117
4.4.2 Durabilidade em função do parâmetro η/B_{IV}	125
4.4.3 Durabilidade em função da rigidez.....	126
4.4.4 Rigidez em função do parâmetro η/B_{IV}	127
4.4.5 Análise estatística dos resultados do ensaio de durabilidade	128
4.5 ENSAIOS DE MICROESTRUTURA	130

4.5.1 Difração de raios-X	131
4.5.2 Microscopia eletrônica de varredura com EDS	134
5 CONSIDERAÇÃO FINAIS.....	137
5.1 CONCLUSÕES	137
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
REFERÊNCIAS.....	142
ANEXO A.....	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma da pesquisa	23
Figura 2 – Total de RCD coletado no Brasil e por região (adaptado de ABRELPE, 2020; BRASILEIRO <i>et al.</i> , 2015)	32
Figura 3 – Classificação dos materiais pozolânicos (ZAMPIERI, 1989).....	39
Figura 4 – Pantheon romano (MASI <i>et al.</i> , 2018).....	40
Figura 5 – Esquema de fabricação de produtos cerâmicos (PETRUCCI, 1987).....	44
Figura 6 – Classificação dos grupos de argilominerais (ZAMPIERI, 1989).....	46
Figura 7 – Representação da estrutura cristalina dos principais grupos de argilominerais (SOUZA SANTOS, 1975, apud ZAMPIERI, 1989).....	47
Figura 8 – Telha cerâmica (GUIA DO CONSTRUTOR, 2020).....	48
Figura 9 – Variações no conteúdo de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento Portland e do cimento pozolânico (LEA, 1970, apud MANTUANO NETTO, 2006).....	53
Figura 10 – Eficácia da pozolana de argila calcinada na redução da expansão (SAAD <i>et al.</i> , 1983, apud ZAMPIERI, 1989)	54
Figura 11 – Evolução das resistências à compressão de concretos contendo 0, 30 e 50% de adição pozolânica em função do tempo (SAAD <i>et al.</i> , 1983, apud ZAMPIERI, 1989)	55
Figura 12 – Curvas granulométricas da areia de Osório	67
Figura 13 – Foto de microscopia eletrônica da areia de Osório ampliada (a) 40 e (b) 500 vezes (DALLA ROSA, 2009)	68
Figura 14 – Trituradora (a), resíduo cerâmico (b).....	69
Figura 15 – Curva granulométrica do pó de telha cerâmica.....	70
Figura 16 – Corpos de prova	71
Figura 17 – Microscopia eletrônica de resíduo cerâmico vermelho (GARCIA <i>et al.</i> , 2014)...	73
Figura 18 – (a) armazenamento e (b) CC após secagem e peneiramento (SALDANHA, 2014)	73
Figura 19 – Curva granulométrica da cal de carbureto	74
Figura 20 – Microscopia eletrônica da cal de carbureto ampliada (a) 400 e (b) 800 vezes (SCHEUERMANN FILHO, 2019)	76
Figura 21 – Ensaio RCS: (a) prensa, (b) antes da ruptura e (c) após a ruptura	78

Figura 22 – Ensaio PUNDIT: equipamento	80
Figura 23 – Ensaio PUNDIT: software	80
Figura 24 – Ensaio de durabilidade após 12 ciclos de molhagem/secagem e escovação: (a) CPs com maior e menor PMA e (b) CPs com $\gamma_d=17\text{kN/m}$	82
Figura 25 – Resultados do teste ICL (adaptado de: CONSOLI <i>et al.</i> , 2009; SALDANHA, 2014).....	84
Figura 26 – Ensaio de compactação para areia de Osório, telha, CC e NaOH.....	85
Figura 27 – Moldagem de CP.....	87
Figura 28 – RCS versus concentrações molal de NaOH para 7 dias de cura (ensaios piloto) .	88
Figura 29 – Respostas a q_u para (a) 0 molal, (b) 3 molal, (c) 7 dias de cura e (d) 28 dias de cura	95
Figura 30 – Relação entre q_u e poz.;CC para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) $\gamma_d=15\text{kN/m}^3$, (b) $\gamma_d=16\text{kN/m}$ e (c) $\gamma_d=17\text{kN/m}$	96
Figura 31 – Relação entre q_u e γ_d para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) poz.=10%; cal=4%, (b) poz.=20%; cal=7% e (c) poz.=30%; cal=10%.....	97
Figura 32 – Relação entre q_u e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura	99
Figura 33 – Relação entre q_u e η/B_{IV} para 0, 2, 3 e 4 molal aos 7 dias de cura.....	100
Figura 34 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 3 molal aos 7 dias de cura	103
Figura 35 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 3 molal aos 28 dias de cura	103
Figura 36 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 3 molal aos 7 e 28 dias de cura.....	104
Figura 37 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura	105
Figura 38 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 0 e 3 molal aos 28 dias de cura.....	105
Figura 39 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura	106
Figura 40 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 2, 3 e 4 molal aos 7 dias de cura.....	107
Figura 41 – Respostas a G_0 para (a) 0 molal, (b) 3 molal, (c) 7 dias de cura e (d) 28 dias de cura	109

Figura 42 – Relação entre G_0 e poz.;CC para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) $\gamma_d=15\text{kN/m}^3$, (b) $\gamma_d=16\text{kN/m}$ e (c) $\gamma_d=17\text{kN/m}$	110
Figura 43 – Relação entre G_0 e γ_d para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) poz.=10%; cal=4%, (b) poz.=20%; cal=7% e (c) poz.=30%; cal=10%.....	111
Figura 44 – Relação entre G_0 e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura	112
Figura 45 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 7 dias de cura	113
Figura 46 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 28 dias de cura	113
Figura 47 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 7 e 28 dias de cura.....	114
Figura 48 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura	115
Figura 49 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 28 dias de cura.....	115
Figura 50 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura.....	115
Figura 51 – Relação entre q_u e G_0 para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura.....	116
Figura 52 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 15\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura.....	119
Figura 53 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 15\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura.....	119
Figura 54 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 16\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura.....	120
Figura 55 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 16\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura.....	120
Figura 56 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 17\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura.....	121
Figura 57 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 17\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura.....	121
Figura 58 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=10% para sete dias de cura	122
Figura 59 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=10% para sete dias de cura	122

Figura 60 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=20% para sete dias de cura	123
Figura 61 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=20% para sete dias de cura	123
Figura 62 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=30% para sete dias de cura	124
Figura 63 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=30% para sete dias de cura	124
Figura 64 – Relação entre PMA e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura.....	126
Figura 65 – Relação entre PMA e G_0 para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura	127
Figura 66 – Relação entre G_0 e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura	128
Figura 67 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de PMA para 3 molal aos 7 dias de cura	129
Figura 68 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de PMA para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura.....	129
Figura 69 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 7 dias de cura	130
Figura 70 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura	130
Figura 71 – DRX: identificação dos (argilo)minerais	132
Figura 72 –MEV-EDS para mistura sem NaOH	136
Figura 73 – MEV-EDS para mistura com 3 molal de NaOH.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normativas ambientais	33
Tabela 2 – Classificação dos RCD (adaptado de: BRASIL, 2002)	34
Tabela 3 – Estimativas de produção e geração de resíduos na indústria da cerâmica vermelha (adaptado de: ANICER, 2020; GARCIA <i>et al.</i> , 2014)	37
Tabela 4 – Resumo do programa experimental	65
Tabela 5 – Propriedades físicas da areia de Osório	68
Tabela 6 – Propriedades do pó de telha	71
Tabela 7 – Composição química (%) do resíduo cerâmico	72
Tabela 8 – Propriedades da cal de carbureto	75
Tabela 9 – Composição química (%) da cal de carbureto (adaptado de: SALDANHA <i>et al.</i> , 2018; SCHEUERMANN FILHO, 2019)	75
Tabela 10 – Propriedades do NaOH	77
Tabela 11 – Definição de variáveis iniciais	82
Tabela 12 – Ensaio Proctor Modificado e Normal	85
Tabela 13 – Teores de concentração molal de NaOH	87
Tabela 14 – Fatores e níveis utilizados nos ensaios de RCS, G0 e durabilidade	90
Tabela 15 – Tratamentos referentes aos ensaios de resistência e rigidez para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura	91
Tabela 16 – Tratamentos relativos aos ensaios de durabilidade para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura	92
Tabela 17 – Parâmetros, variáveis e níveis	102
Tabela 18 – Resultados para PMA após 12 ciclos	125

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- AA – Ativação alcalina; ativado alcalinamente
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- B_{IV} – teor volumétrico de agente cimentante
- CC – cal de carbureto
- C_{IV} – teor volumétrico de cimento
- CNTP – condições normais de temperatura e pressão
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CP – corpo de prova
- CPO – cimento Portland ordinário
- CV – cinza volante
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DRX – Difração de Raios-X
- EDS – Espectroscopia de Raios-X por Dispersão em Energia
- FRX – Fluorescência de Raios-X
- G₀ – módulo cisalhante a pequenas deformações
- kPa – quilo Pascal
- 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
- PM – perda de massa por ciclo
- PMA – perda de massa acumulada

Poz – pozolana

PTC – pó de telha cerâmica

q_u – resistência à compressão simples.

RCC – resíduo da construção civil

RCD – resíduo da construção e demolição

RCV – resíduo da cerâmica vermelha

SA – sílica ativa

γ_d – peso específico aparente seco

η – porosidade

1 INTRODUÇÃO

É de suma importância conhecer o tipo de solo antes de se iniciar qualquer obra construtiva, pois as características do mesmo influenciam diretamente no desenvolvimento de um determinado lugar já que, por vezes, o solo natural não apresenta condições necessárias para sua utilização.

A medida em que as cidades vão crescendo e se expandindo, o indivíduo construtor pode se deparar com dificuldades na execução de uma obra devido a estas características, podendo causar problemas futuros na edificação em questão, por exemplo, quando seu uso não é o mais apropriado. Assim, segundo Petrucci (1987) o uso racional, adequado, tecnicamente aconselhável e economicamente viável, só é alcançado com o conhecimento tão perfeito quanto possível das propriedades dos materiais, suas vantagens e suas eventuais deficiências, de tal modo que seja permitido um cotejo entre várias soluções possíveis, escolhendo-se a melhor, tanto do ponto de vista técnico como econômico.

O ramo das engenharias está em constante processo de renovação no que diz respeito ao uso e aperfeiçoamento de novos materiais. Estudos e pesquisas sobre o desenvolvimento destes materiais são publicados constantemente, já que o mercado se faz cada vez mais exigente, principalmente em relação à busca por materiais que apresentem melhor desempenho, qualidade, sustentabilidade, segurança, economia e durabilidade.

Uma das possibilidades para melhorar os solos é a inserção de material alternativo com função de reforçar o mesmo, modificando as propriedades do solo existente no local. Porém, no Brasil, o que se vê ainda é pouco investimento no emprego destes materiais alternativos, utilizando-se de materiais convencionais, que acabam impactando na natureza, desde a exploração de recursos naturais, muitas vezes finitos, até seu descarte final, gerando uma grande quantidade de resíduos.

O aprimoramento do campo da geotecnia ao longo dos últimos anos vem a favor da mudança desse cenário, buscando um caminho mais sustentável através do emprego de materiais que antes nem eram considerados para este fim.

Diante deste contexto, será tratado neste trabalho os efeitos do reaproveitamento de dois resíduos como alternativa para o desenvolvimento da sustentabilidade na indústria da construção, acrescido de um ativador alcalino a base de NaOH (hidróxido de sódio). Em primeiro, a telha cerâmica, tendo em vista a abundância da matéria prima, os produtos cerâmicos tornaram-se logo algo essencial na história da humanidade. A telha é um elemento muito utilizado na construção civil, principalmente na cobertura de casas e outras edificações. Assim, seus resíduos podem ser finamente moídos, transformando-se em pó e serem utilizados para outras finalidades.

A argila calcinada, empregada neste estudo no formato de pó de telha, é composta principalmente por sílica e alumina em estado amorfo e dependendo do seu grau de amorfismo, mostra-se um excelente material pozolânico (CASTRO, 1995), e em presença de água é capaz de reagir com hidróxido de cálcio (proveniente da cal carbureto) e ter as propriedades de um cimento (MWITI *et al*, 2018). Logo, o segundo resíduo aqui abordado, a cal de carbureto, resíduo da produção do gás acetileno, é composta basicamente por cálcio.

O solo granular utilizado neste trabalho é uma areia proveniente do município de Osório/RS, cujo nome identifica sua origem. A areia de Osório, solo no qual será avaliado o melhoramento com estes resíduos, consiste em um material com comportamento já conhecido pelo grupo de trabalho do LEGG.

A ativação alcalina vem sendo muito explorada recentemente no desenvolvimento de materiais para os mais variados setores tecnológicos, com destaque para a indústria da construção civil. Palomo *et al*. (1999) mostram que a ativação alcalina é um processo químico que permite ao usuário transformar estruturas amorfas em um compósito bem compactado e cimentante.

Desta forma, o processo se dá pela mistura de um solo granular, de um material rico em alumino-silicatos (pó de telha) com uma solução alcalina ativadora, de modo que ao estabelecer contato ocorre as reações, inicialmente, através da dissolução e posteriormente, da

reorganização das cadeias moleculares do material amorfo, resultando em um material cristalino com uma estrutura bem ordenada.

1.1 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes da pesquisa para o desenvolvimento do trabalho são apresentadas a seguir.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão divididos em geral e específicos e são apresentados nos próximos itens.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a estabilização de um conjunto de misturas a base de areia de Osório adicionados de cal de carbureto, pó de telha cerâmica e hidróxido de sódio, em termos de resistência, rigidez e durabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando o atendimento do objetivo geral, propõe-se:

- a) estudar o comportamento mecânico das misturas para os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), Rigidez e Durabilidade por molhagem/secagem e escovação;
- b) avaliar o efeito da ativação alcalina com hidróxido de sódio em diferentes proporções;
- c) verificar o efeito e influência das variáveis: peso específico aparente seco, teor de pó de telha cerâmica, teor de cal de carbureto, concentração molal e tempo de cura em termos de resistência à compressão simples, rigidez e durabilidade;
- d) avaliar o efeito das variáveis controláveis através de análises estatísticas;

- e) correlacionar entre si as variáveis respostas dos experimentos (q_u , G_0 e perda de massa acumulada [PMA]) e com a relação entre porosidade/teor volumétrico (parâmetro η/B_{IV}) do precursor (pozolana [telha cerâmica] + cal de carbureto);
- f) identificar os novos compostos formados e mudanças na estrutura do solo melhorado através de ensaios de microestrutura, assim como caracterizar os materiais utilizados, a partir de ensaios de difração de raios-X e espectroscopia de raios-X por dispersão em energia.

1.3 PRESSUPOSTO

A presente pesquisa tem por pressuposto a utilização de uma base alcalina forte, neste contexto o hidróxido de sódio (NaOH), em uma solução cujo solvente é a água, como ativador alcalino ou álcali-ativador a fim de catalisar as reações pozolânicas e acelerar o ganho na resistência a compressão simples, rigidez e durabilidade de uma mistura composta de um solo granular e uniforme, neste caso a areia de Osório, solo cujo comportamento este bem difundido no grupo de pesquisa do LEGG, pó de telha cerâmica (material processado de granulometria fina) e cal de carbureto (subproduto da produção do gás acetileno), sendo os dois últimos comumente rotulados como resíduos da construção civil e indústria, respectivamente. A fim de conferir uniformidade quanto ao uso dos materiais utilizados nesta pesquisa, todos são provenientes de um mesmo lote.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa delimita-se ao estudo de um solo granular, a areia de Osório adicionado de pó de telha cerâmica, estabilizado em um primeiro momento apenas pela cal de carbureto (sem presença de hidróxido de sódio – aqui referenciado como 0 molal) e num segundo momento incrementado com uma solução a base de hidróxido de sódio, popularmente conhecido como soda cáustica. O processo de cura dos corpos de prova ocorre em um ambiente climatizado (a uma temperatura $\sim 23^\circ\text{C}$), nas idades de 7 e 28 dias.

1.5 LIMITAÇÃO DO TRABALHO

É uma limitação deste trabalho: quantidades limitadas de telha cerâmica e hidróxido de sódio do mesmo lote para estudo.

1.6 DELINEAMENTO E ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho realizado foi estruturado através das etapas apresentadas no organograma, representado na Figura 1.

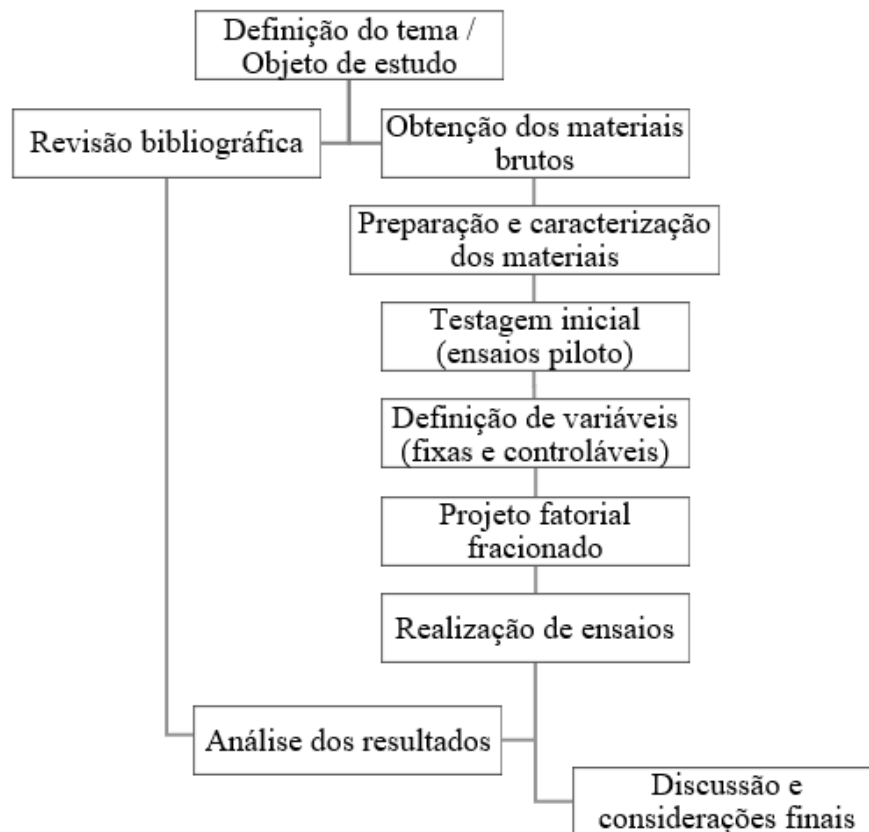


Figura 1 – Organograma da pesquisa

Após a definição da ênfase desta pesquisa, foram executadas duas etapas simultâneas, a revisão bibliográfica e a obtenção dos materiais: areia de Osório, telha cerâmica, cal de carbureto e hidróxido de sódio (NaOH). A partir de então, foi executada a preparação e caracterização destes, inclusive a trituração da telha, até que virasse pó, com granulometria inferior a 0,075mm. O passo seguinte refere-se à obtenção das variáveis fixas e controláveis,

inclusive a investigação da variável hidróxido de sódio (NaOH), adquirindo entendimento quanto a sua influência para com as misturas. A união destes fatores, em seus respectivos níveis, serve de base a um conjunto de misturas que são compreendidas através da realização de um projeto fatorial. Logo após a definição dos traços das misturas, adentrou-se a etapa de realização de ensaios, isto é, a moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova, este último referente ao ensaio de RCS. Com isto, já é possível se fazer as primeiras análises quanto a validade do tema e eficácia da união dos materiais propostos, em alusão a respostas do comportamento mecânico para ensaios de resistência à compressão simples, durabilidade e rigidez. Paralelo a tudo isto, está a revisão da bibliografia, onde também se comparara os resultados obtidos com os de outros autores, que empregam metodologias semelhantes, para que seja possível chegar nas conclusões da pesquisa.

Esta dissertação está contemplada em cinco capítulos, quatro subsequentes a este, sucedidos dos elementos pós-textuais. Sua ordenação ocorre da seguinte maneira:

O segundo capítulo apresenta o enquadramento teórico relacionado ao tema proposto. Neste sentido, os temas pertinentes como comportamento de solos estabilizados, reações pozolânicas e a teoria referente a ativação alcalina serão discutidos.

O terceiro capítulo está relacionado à metodologia aplicada. Inicia-se com um relato referente aos materiais empregados nesta pesquisa, igualmente como suas características, obtenção, etc. Na continuação, é apresentada uma descrição dos ensaios realizados. O capítulo encerra com um retrato do programa experimental. Portanto, define-se neste os artifícios empregados na obtenção das variáveis, fatores e níveis determinantes para a definição das misturas contempladas na matriz de ensaios (projeto experimental).

O quarto capítulo está voltado para os resultados obtidos em todas as etapas de ensaios efetuados, desde análises, representações gráficas e comparações. A partir dos resultados obtidos dos ensaios de cunho mecânico, será feita uma relação entre estes e o parâmetro η/B_{IV} . Também será realizada análise estatística de tais dados. E por fim, uma análise mineralógica de alguns fragmentos será apresentada.

O quinto e último capítulo contém uma discussão quanto aos resultados experimentais obtidos, assim como conclusões acerca do tema, suas vantagens e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo uma revisão de embasamento literário referente ao tema abordado.

2.1 O SOLO E A SUA IMPORTÂNCIA

O solo é um componente fundamental do ecossistema terrestre. Ele é de vital importância na vida do homem. Cerca de 1/3 da superfície terrestre é constituída por solos. A NBR 6502 (ABNT, 1995) define solo como material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica.

Na superfície terrestre podemos encontrar diversos tipos de solo e cada tipo possui características próprias, destacam-se por suas propriedades e pela sua constituição química. O entendimento do comportamento dos solos é muito importante na engenharia geotécnica, sendo motivo de estudo ao longo do tempo.

2.2 SOLOS GRANULARES

Uma das tipologias de solo existentes são os granulares. Os solos granulares normalmente são denominados em função do tamanho de seus grãos, sendo classificados como areias ou pedregulhos. Estes materiais, formados por um sistema de partículas independentes, apoiam-se apenas entre si e são altamente permeáveis. A geomecânica de solos granulares está relacionada com algumas características microscópicas como tamanho dos grãos, forma das partículas, granulometria, arranjo das partículas, etc. e com fenômenos micromecânicos como a não saturação, cimentação, quebra, etc. (ZULUAGA, 2016).

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização é uma técnica indispensável para conferir a um determinado tipo de solo uma série de características que possibilitem seu melhor aproveitamento, de tal maneira que possam ser empregados dentro de condições técnicas e economicamente aceitáveis. Assim, é preciso que haja modificações nos parâmetros geotécnicos do mesmo, sendo necessária a utilização da técnica de estabilização mais adequada àquela finalidade.

2.3.1 Cimentação em solos

A cimentação em solos ocorre de duas maneiras: por processos naturais ou artificiais, como os adotados na estabilização de solos. Este trabalho foca no estudo de solos artificialmente cimentados.

O solo artificialmente cimentado é um produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento (como o tradicional cimento Portland) e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, conforme este projeto, e executada de acordo com a NBR 12253 (ABNT, 2012b). A adição de cimento Portland no solo faz com que este passe por transformações químicas, alterando algumas de suas propriedades.

Conforme constatado por Zuluaga (2016) o efeito da cimentação no comportamento mecânico de solos granulares cimentados se traduz em termos de aumento da rigidez e da resistência do material. Este ganho nas propriedades do material deve-se ao fato de a cimentação entre partículas proporcionar restrições ao movimento, os quais diminuem com o incremento de tensões.

Segundo Leon (2018) o processo de cimentação de solos granulares que não apresentam argilominerais, ocorre através dos produtos gerados na hidratação e hidrólise do cimento, propiciando a cimentação dos grãos nos seus pontos de contato, sendo a cimentação mais eficiente quanto melhor a distribuição granulométrica do solo, quanto menor o índice de vazios e quanto maior o número de contatos entre partículas.

2.3.1.1 Solo–Cimento Portland

O uso de cimento Portland é um dos métodos mais empregados para estabilização de solos, cujas aplicações e vantagens vêm sendo estudadas e bem difundidas na literatura. A adição de cimento ao solo tem sido denominada de diferentes maneiras, variando de autor para autor. Termos como solo melhorado, solo estabilizado, solo modificado ou solo tratado são alguns dos termos mais empregues. Segundo Heineck (1998) a melhoria das características mecânicas dos solos pela adição de cimento Portland constitui em um processo utilizado de forma cada vez mais intensa nas diversas áreas da engenharia geotécnica.

De acordo com Marques (2016) o cimento utilizado no solo vai servir de ligante, do mesmo modo se emprega no concreto, ou seja, o seu objetivo é criar ligações entre o agregado, resultando num produto com melhores características de durabilidade e resistência mecânica.

Os principais fatores que condicionam as propriedades dos solos estabilizados com cimento são: as características dos próprios materiais constituintes da mistura, como suas características mineralógicas, teores, sobretudo a quantidade de cimento, e granulometrias, assim como as condições de cura dos corpos de prova, o tempo de cura, teor de umidade e as condições de compactação (MOORE *et al.*, 1970; CRISTELO, 2001). Winter (2018) acrescenta que a resistência, rigidez e a durabilidade de solos cimentados dependem de diversos fatores, entre eles a porcentagem e qualidade de agente cimentante, a quantidade de material amorfo para que as reações ocorram e o índice de vazios.

Segundo Marques (2016) o ACI (Instituto Americano do Concreto) faz uma distinção entre solo artificialmente cimentado, que o caracteriza como um material capaz de satisfazer as características de durabilidade e/ou resistência, de modo a resistir a carregamentos impostos (como o trânsito, no caso de estradas) ou a resistir a fenômenos naturais (ciclos gelo/degelo, secagem/molhagem, erosão, abrasão sobre condições de fluxo, etc.); e solo melhorado com cimento, que tem como objetivo o de melhorar uma propriedade específica.

O efeito alcançado da adição de um material cimentante no solo é equivalente ao de aglomeração, isto é, este material ligante é capaz de juntar partículas de uma ou mais substâncias e dar coesão ao todo mediante transformações químicas, dando origem a novos compostos. Os materiais aglomerantes mais utilizados nesta aplicação são os de gênero aéreo,

como o gesso e a cal aérea, que reagem com o ar e os de gênero hidráulico, como a cal hidratada, os cimentos pozolânicos, afora o cimento Portland.

Inúmeras pesquisas estão relacionadas à estabilização de solos com cimento, entre elas Fernández-Jiménez *et al.* (2006), Consoli *et al.* (2007 e 2016), Cristelo *et al.* (2012a), Diambra *et al.* (2017) e Corrêa-Silva *et al.* (2018).

2.3.1.2 Solo–Cal

A cal é outro produto utilizado na estabilização de solos, inclusive tem seu uso difundido em outras áreas como a agricultura. A história da estabilização de solos com cal vem de muitos anos. Segundo Cristelo (2001) alguns dos primeiros vestígios de produção industrial de cal surgem no Egito, cerca de 3000 anos a.C., quando as pirâmides foram construídas com blocos de calcário ligados entre si por um ligante constituído por uma mistura de cal e gesso. Contudo, foram os Romanos que desenvolveram as primeiras grandes aplicações da cal em geotecnia.

O acréscimo da cal aumenta a capacidade de suporte do solo e reduz sua expansibilidade. Conforme Guimarães (2002) e Dalla Rosa (2009), a cal utilizada na estabilização ou melhoria de solos é produto resultante da calcinação, em temperaturas próximas a 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Na forma hidratada deve obedecer às determinações da NBR 7175 (ABNT, 2003).

Relativo aos solos arenosos, Castro (1981) descreve que os minerais quartzo e feldspatos cristalinos são praticamente inertes nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Eles possuem pequenas reservas de energia livre interna e por isso a interação entre eles e a cal, é retardada apesar de existir. As ligações produzidas na estrutura endurecida são devidas à cimentação mecânica e ao preenchimento físico de cavidades com os produtos de hidratação do cimento. São ligações do tipo físico-mecânicas. A resistência deste tipo de ligação às forças mecânicas é relativamente fraca.

Quando a cal é adicionada a um substrato argilomineral, solos argilosos, conforme Castro (1981) além das interações mecânicas que já ocorrem existem também a ligação coagulação-

tixotrópica entre as partículas do argilomineral (por coesão) e a sua adesão aos produtos da hidrólise do cimento, causada principalmente pela ação da energia de atração intermolecular. Segundo Castro (1995), quando a cal é adicionada a um solo fino com a presença de água ocorrem simultaneamente algumas reações químicas, que podem ser caracterizadas por duas etapas distintas, baseadas na velocidade com que as transformações sofridas pelo solo ocorrem, uma etapa inicial rápida que dura de horas a dias e outra mais lenta, que se estende por meses a anos. A etapa inicial rápida consiste em: troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, adsorção da cal e reações químicas. A etapa lenta consiste nas reações pozolânicas e na carbonatação.

Algumas das especificações mais importantes relativas à cal são relacionadas a sua granulometria, propriedades químicas, como densidade, superfície específica, solubilidade e sua reatividade. Estudaram o emprego da cal no solo Consoli *et al.* (2009), Cristelo *et al.* (2012a), Corrêa-Silva *et al.* (2018), entre outros.

2.4 PRODUÇÃO/GERAÇÃO DE RESÍDUOS E O IMPACTO AMBIENTAL

O desenvolvimento econômico e sustentável de um país está diretamente ligado com questões ambientais. Em qualquer nação, não há crescimento sem que a indústria da construção, um dos setores que mais geram empregos e renda, o acompanhe. Crescimento este, que gera grandes impactos ambientais, desde a extração de matérias primas, passando pela produção de insumos, como o cimento Portland, material que consome grandes quantidades de energia para sua produção, até a produção de resíduos, que são descartados no meio ambiente, e geralmente, sem nenhum controle.

O cimento Portland é um dos principais materiais utilizados no melhoramento químico dos solos, se não o mais empregado. Sua adição produz resultados interessantes ao nível da resistência mecânica dos materiais. No entanto, sua produção implica em grandes problemas ambientais, que vão desde a extração das matérias-primas (calcário e argila), até emissão de gases poluentes (óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono). As cimenteiras são responsáveis por grande parte da emissão de dióxido de carbono (CO₂) na cadeia da construção civil. No Brasil, por exemplo, a indústria de cimento foi responsável por

29,7% das emissões de CO₂ de processos industriais no ano de 2012 (BRASIL, 2014). As emissões originadas da produção de cimento e cal devem-se à calcinação de calcários e argilas. A indústria da construção civil é uma das atividades humanas com maior impacto sobre o meio ambiente. Estima-se que a construção civil utiliza algo entre 20 e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (SJÖSTRÖM, 1992; BRASILEIRO et al., 2015).

Como em todo processo industrial, o uso dos insumos da indústria da construção civil gera resíduos em grande escala, que necessitam ser gerenciados. Sejam estes resíduos provenientes da fabricação, como as escórias de alto forno, de perdas produtivas, executivas, demolições ou de reformas. Segundo a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e resíduos especiais) a comparação entre os dados de RCD (Resíduos de Construção civil e Demolição) nos anos 2012 e 2013 resulta na constatação de um aumento de mais de 4,6% na quantidade coletada, conforme Figura 2, totalizando 36.640.000 toneladas de resíduos apenas no ano de 2013. Observa-se nesta mesma imagem que no decorrer do período (2010-2013) o total de RCD coletado no Brasil vem avançando com o passar dos anos, o que também implica num aumento na quantidade de matérias primas empregadas pelo setor. Parte dos resíduos gerados durante a produção e ao final da vida útil dos produtos são depositados em aterros, caracterizando um modelo linear de produção (CARNEIRO *et al.*, 2001).

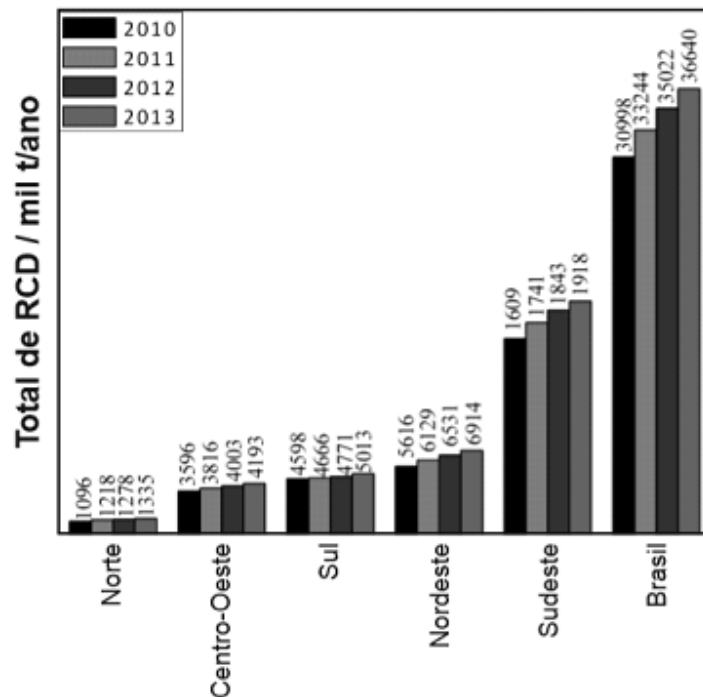


Figura 2 – Total de RCD coletado no Brasil e por região (adaptado de ABRELPE, 2020; BRASILEIRO *et al.*, 2015)

As questões de cunho ambiental vêm ganhando cada vez mais destaque e emendas nas legislações dos países, devido ao passivo ambiental derivado dos resíduos da construção civil. Soma-se aos resíduos a consequente escassez dos recursos naturais. Diante desse contexto, buscam-se cada vez mais alternativas para o reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição, modificando a cadeia produtiva do setor da construção civil. A indústria desta categoria tem procurado alternativas por meios de técnicas que possam viabilizar a sustentabilidade dessa atividade produtiva.

Os resíduos provenientes do ramo da construção civil representam um significativo percentual do total de resíduos sólidos produzidos nas cidades e nos centros urbanos. O inadequado gerenciamento dos RCD contribui para a degradação da qualidade ambiental, principalmente devido a destinação final dada a estes materiais. Com isto, muitas normas, resoluções e leis vem sendo criadas nas últimas décadas no Brasil. Elas formam uma base importante para permitir ao país um avanço no confronto dos principais problemas ambientais, econômicos e sociais decorrentes do manejo inadequado dos RCD.

Tabela 1 – Normativas ambientais

Norma	Órgão	Ação
Lei 9.605/1998	MMA	Lei de Crimes Ambientais
Lei 12.305/2010	MMA	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos
Resolução 307/2002	CONAMA	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil
Resolução 348/2004	CONAMA	
Resolução 420/2009	CONAMA	Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas
NBR 10.004/2004	ABNT	Classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente
NBR 15.113/2004	ABNT	Fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes
NBR 15.114/2004	ABNT	Fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A
NBR 15.115/2004	ABNT	Esta Norma estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado agregado reciclado, em obras de pavimentação
NBR 15.116/2004	ABNT	Esta Norma estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil

A Tabela 1 acima apresenta as principais leis, normas e resoluções referentes as questões nacionais de cunho ambiental. Destacam-se a Lei Federal 12.305/2010 que constituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 307/2002 e a normativa NBR 15.114/2004.

A Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tem seu enfoque principal relacionado à gestão de resíduos sólidos, que preconiza a redução, reutilização e tratamento destes resíduos, bem como sua destinação final ambientalmente apropriada. Segundo informações do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2020) a Lei nº 12.305/2010, prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o

aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado).

No início do século XXI, para ser mais preciso em 5 de julho de 2002, o Ministério do Meio Ambiente através do seu Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, criou a resolução de número 307 (BRASIL, 2002), a fim de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (RCC) também conhecido como RCD, instruindo as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ao meio ambiente. Para a criação desta resolução do CONAMA considerou a necessidade de implementação de métodos para a redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil, conferindo responsabilidade aos agentes públicos e privados para a implementação de planos integrados de gerenciamento dos resíduos, criando condições legais para aplicação das leis que definem os crimes ambientais (BRASIL, 2002; BRASILEIRO *et al.*, 2015; RODRIGUES, 2019). Segundo o Art. 3º da Resolução nº 307 e a Resolução nº 348 (BRASIL, 2002; BRASIL, 2004) os resíduos da construção civil são classificados em quatro classes, vide Tabela 2, em que, dependendo da sua composição, podem ou não serem reutilizados.

Tabela 2 – Classificação dos RCD (adaptado de: BRASIL, 2002)

Classe	Descrição
Classe A	resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
Classe B	resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
Classe C	resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
Classe D	resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Uma ação, que a cada dia ganha força entre os pesquisadores e profissionais da área, é a reciclagem de RCD e sua reutilização na própria construção civil, como matéria-prima alternativa. Na composição do RCD, segundo Cabral (2008, apud POSSA E ANTUNES, 2016), argamassa, concreto e materiais cerâmicos somam 62% do total de RCD produzidos nas cidades brasileiras. Esses materiais são classificados como resíduos classe A, conforme Tabela 2, isto é, resíduos com grande potencial para ser reutilizável ou reciclado como agregados (BRASIL 2002). A reciclagem de RCD traz benefícios econômicos e ambientais para as cidades em que é implantada. Além da diminuição dos custos de gerenciamento do resíduo, o custo do produto reciclado é bem menor que o agregado natural (BRASILEIRO *et al.*, 2015).

Vários estudos e pesquisas vem sendo realizadas para avaliar o reaproveitamento destes resíduos no âmbito da engenharia civil. Os mesmos podem ser empregues em áreas como estabilização de solos; como agregados na pavimentação e em aterros; em substituição ao tradicional cimento Portland; na fabricação de novas peças de materiais de construção; entre outros.

A indústria do cimento há algum tempo busca procedimentos que efetivamente reduzam os altos custos energéticos e ambientais relacionados a fabricação de cimento. A incorporação de resíduos na produção de cimentos e concretos contribui substancialmente para que haja uma melhora nestes aspectos. Segundo Garcia *et al.* (2014), além de vantagens com a diminuição de custos, as adições minerais (resíduos) conferem maior sustentabilidade na cadeia produtiva do cimento, pois possibilitam a reciclagem de subprodutos ou resíduos industriais, reduz as emissões perigosas lançadas na atmosfera durante a sua fabricação, bem como minimiza o gasto de energia e, por vezes, o consumo de recursos naturais não renováveis.

A indústria do cimento trabalha em conjunto com a comunidade científica a fim de minimizar este impacto ambiental negativo oriundo de sua produção. O uso de subprodutos, ou materiais alternativos, como substitutos parciais de combustível, matérias-primas ou até clínquer, são vistos de uma forma positiva. Estes materiais podem ser de origem pozolânica, dentre elas cinzas volantes, sílica ativa, resíduos de construção, azulejos, dentre outros (PUERTAS *et al.*, 2008; MURILLO *et al.*, 2017).

Ainda relativo ao produto da indústria cimenteira, Mantuano Netto (2006) corrobora com o tema, pois segundo ele em determinados aspectos o cimento Portland comum apresenta deficiências, ou insuficiências, para atender necessidades específicas da construção civil. Nesse sentido, o uso de pozolanas em adição ao cimento pode suprir tais necessidades, conferindo certas características aos materiais de base cimentícia.

2.4.1 A indústria cerâmica

Uma das mais comuns adições minerais que vem ganhando espaço no mercado brasileiro corresponde à argila calcinada. Nesse contexto, um material com propriedades potencialmente similares e pouco aproveitado como pozolana refere-se aos resíduos da cerâmica vermelha (GARCIA *et al.*, 2014).

Sabe-se que a indústria de cerâmica, em especial a cerâmica vermelha, é responsável por gerar grandes quantidades de resíduos sólidos ao redor do mundo, pois ela se encontra presente em grande parte da cadeia produtiva do ramo da construção civil. Segundo Azevedo *et al.* (2020) algumas das causas relacionadas a produção destes resíduos são devidos a falhas no processo de fabricação, como queima ineficaz e questões relacionadas ao transporte de produtos.

A Tabela 3 apresenta um pressuposto anual da produção nacional de produtos cerâmicos, bem como da quantidade de resíduos da cerâmica vermelha (RCV), segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER). Estima-se que, segundo Garcia *et al.* (2014), as perdas em produtos acabados se situam na faixa de 3 a 5%, o que representa uma produção de cacos cerâmicos entre 4 e 6,5 milhões de toneladas por ano no país.

Tabela 3 – Estimativas de produção e geração de resíduos na indústria da cerâmica vermelha (adaptado de: ANICER, 2020; GARCIA *et al.*, 2014)

Tipologia	Produção Cerâmica		Geração de RCV (t)
	Peças (und)	Toneladas (t)	
Blocos/Tijolos	48 bilhões	94 milhões t	3 – 5 milhões de t
Telhas	16 bilhões	30 milhões t	1 – 1,5 milhões de t
Total Brasil	64 bilhões	124 milhões t	4 – 6,5 milhões de t

Como fora dito, é necessário que os resíduos provenientes da atividade civil tenham uma correta destinação, reforçando um desenvolvimento mais sustentável do setor. Conforme Azevedo *et al.* (2020) somado a esta necessidade de alternativas limpas para descartar os resíduos sólidos, a indústria da construção civil vem exigindo o desenvolvimento de melhores propriedades tecnológicas para progredir no quesito novos materiais.

2.5 POZOLANAS

Conforme definição da NBR 12653 (ABNT, 2014): pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades aglomerantes.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica as pozolanas em duas categorias:

- Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% SiO₂) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica;
- Pozolanas artificiais: materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica.

A NBR (12653, 2014) divide as pozolanas artificiais em: argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais. A norma americana ASTM C618 (ASTM, 2019), de forma similar regulamenta o uso de materiais pozolânicos naquele país. Na Figura 3 é possível visualizar de uma forma mais ampla como as pozolanas são classificadas.

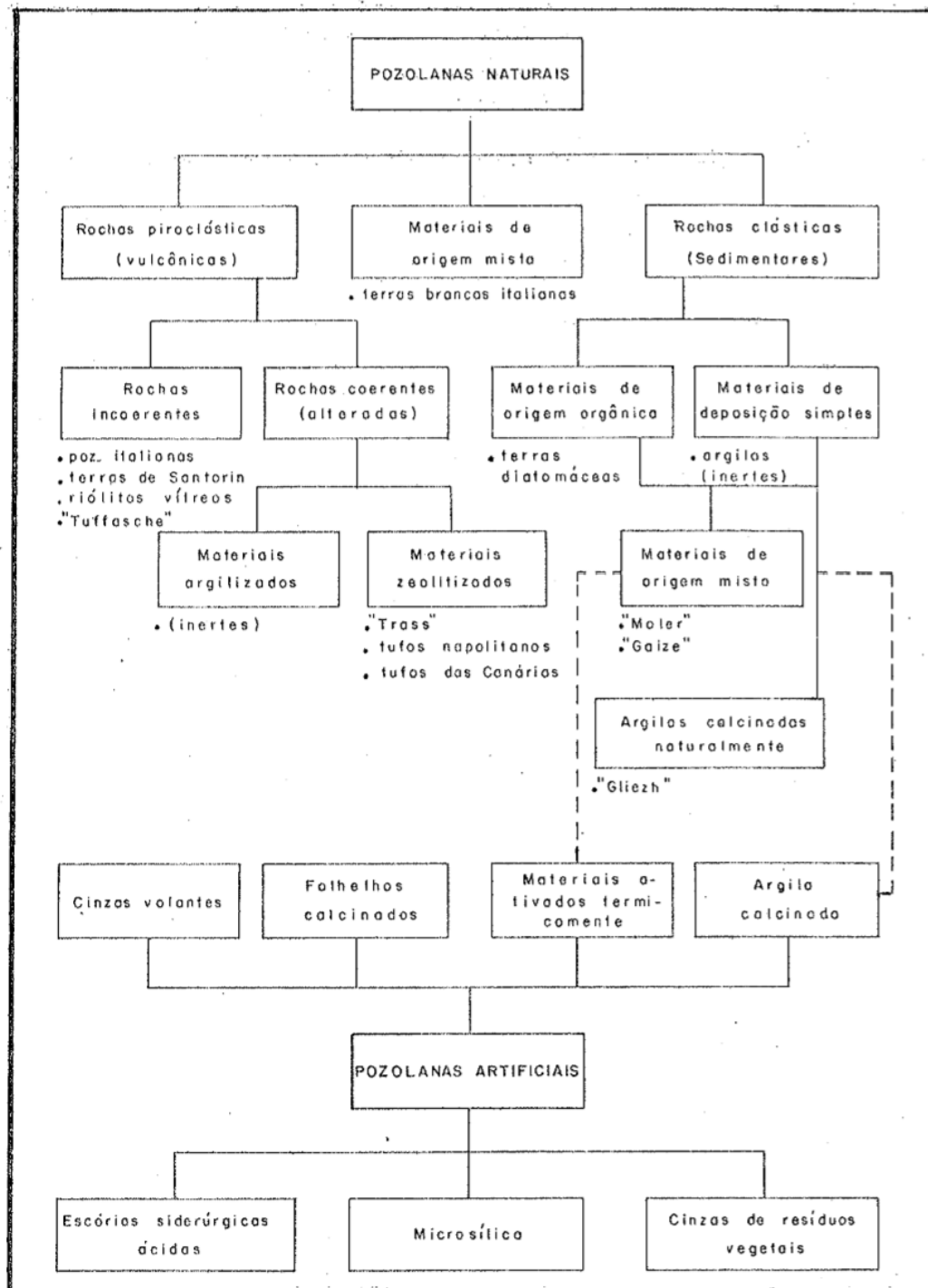


Figura 3 – Classificação dos materiais pozolânicos (ZAMPIERI, 1989)

As primeiras pozzolanas foram utilizadas a muito mais tempo do que se imagina. Gregos e romanos são as primeiras civilizações a utilizarem estes materiais. Há evidências de que fragmentos cerâmicos triturados foram adicionados à uma argamassa a base de cal na

civilização Minoica, originária da ilha de Creta (Grécia), já os romanos usavam adições de telhas ou ladrilhos triturados antes de descobrirem as pozolanas naturais provenientes dos arredores de Roma e Nápoles (ZAMPIERI, 1989, BLEZARD, 1998; LEA, 1971 apud MALHOTRA, V. M.; MEHTA, 1996). Conforme Zampieri (1989) tanto o material cerâmico moído quanto o de origem vulcânica eram empregues com a mesma finalidade e conferiam efeitos similares. Com isto, muito provavelmente, estas são as primeiras pozolanas de argilas termicamente ativas. Estes solos argilosos calcinados, na forma de fragmento de materiais cerâmicos moídos, dão base as primeiras pozolanas artificiais e, misturados à cal, constituíram, o primeiro cimento hidráulico produzido pelo homem (COOK, 1986 apud FARIAS FILHO *et al.*, 2000).

Lea (1971 apud MALHOTRA e MEHTA, 1996) comenta que uma das fontes de pozolana da época era referente as cinzas vulcânicas produzidas da erupção do Monte Vesúvio em 79 a.C. que destruiu cidades como Pompéia e algumas outras próximas a Nápoles. Conforme Blezard (1998) o mais famoso dos edifícios romanos erguidos em cimento pozolânico é o Panteão (Pantheon, Figura 4), cujas paredes possuem 6m de espessura, produzidos a base de tufo e revestimentos cerâmicos finos, enquanto a cúpula, 43,5m de extensão, é sólida em concreto contendo pedra-pomes e pozolana.

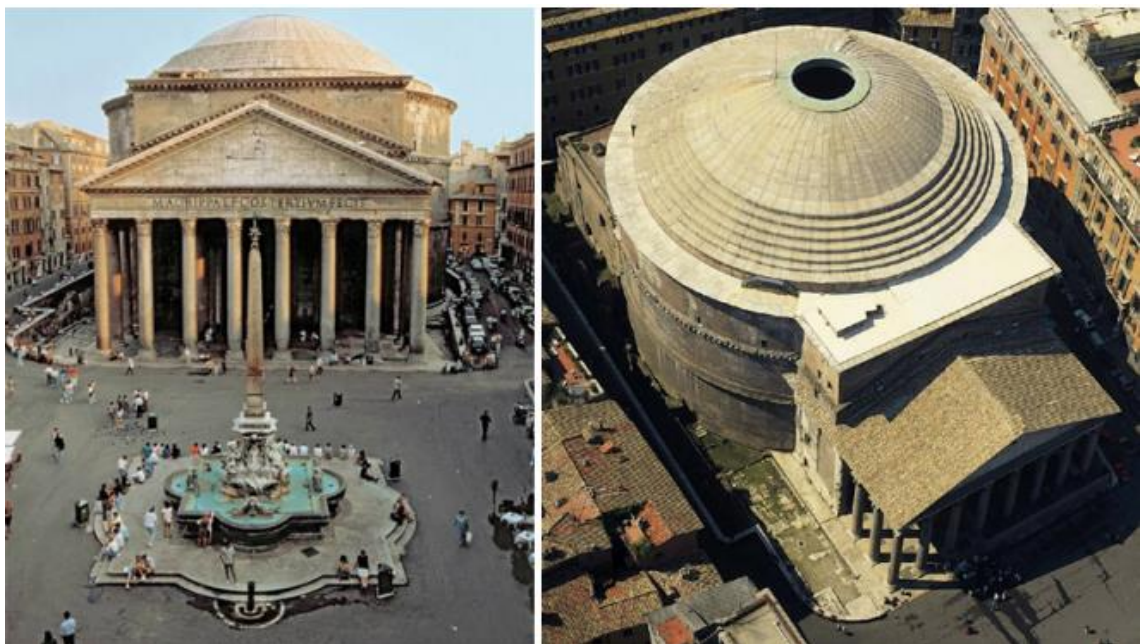


Figura 4 – Pantheon romano (MASI *et al.*, 2018)

Na estabilização de um solo, a adição de uma pozolana (são exemplos, pó de vidro moído, telha moída, cinza de casca de arroz e cinza volante), combinada a um ativador alcalino (hidróxido de cálcio), visa à melhoria das características mecânicas desse em decorrência da formação de uma matriz cimentícia oriunda das reações entre o hidróxido de cálcio e as frações sílico-aluminosas do material pozolânico adicionado. Logo, obtêm-se produtos finais com características conceitualmente comparáveis às decorrentes das reações de hidratação do cimento Portland (MASSAZA, 2004; SCHEUERMANN FILHO, 2019). Assim sendo, a principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (MANTUANO NETTO, 2006).

Os materiais de origem pozolânicas podem ser utilizadas em adição ao cimento Portland, caso do CP II-Z (cimento Portland composto com pozolana) que é normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018), correspondendo a uma adição de minerais ao produto, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, conferindo uma maior estabilidade a ele. Pozolanas também podem ser adicionadas as misturas durante a produção de concretos e argamassas. Contudo, para um material ser considerado de origem pozolânica, ele deve cumprir a alguns critérios, sendo estes estabelecidos a nível nacional pela NBR 12653 (ABNT, 2014). As adições minerais correspondem, basicamente, a materiais silicosos ou sílico-aluminosos finamente cominuídos, que uma vez adicionados ao cimento e ao concreto, interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, modificando a microestrutura do material. O efeito químico está associado à capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, gerado durante a hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. A reação entre a adição mineral e o $Ca(OH)_2$ é denominada reação pozolânica (GARCIA *et al.*, 2014).

2.5.1 Argila

Denomina-se argila ao conjunto de argilo-minerais, compostos principalmente de silicatos de alumínio hidratados, que possuem a propriedade de formarem com a água uma pasta plástica suscetível de conservar a forma moldada, secar e endurecer sob a ação do calor. Também se caracteriza por ser um material natural, terroso e de granulometria fina.

Segundo Petrucci (1987) os materiais argilosos são unidades estruturais simples e se diferenciam um dos outros pela diferente relação entre sílica e alumina, pela quantidade de água de constituição e pela sua estrutura. São muitos os materiais argilosos, mas somente três têm a importância para a fabricação de produtos cerâmicos: a caulinita, a montmorilonita e a illita, todas com estrutura laminar ou foliácea. Somente as de estrutura laminar são usadas na fabricação (calcinação) de produtos cerâmicos.

O aproveitamento da argila caulínica calcinada (metacaulinita) como material pozolânico vem sendo cada vez mais constante, uma vez que as argilas sofrem alterações em suas propriedades físicas e químicas quando submetida a tratamentos térmicos. Segundo Oliveira *et al* (2004), uma maneira de quebrar a estrutura cristalina da argila tornando-a amorfa e quimicamente reativa é fornecer energia na forma de calor.

Conforme Garcia *et al.* (2014) as indústrias de cerâmica vermelha queimam seus produtos, usualmente na faixa de temperatura entre 700°C a 900°C. Nesse intervalo de queima, os processos de sinterização são incipientes, com alguma geração de fase vítrea e sem praticamente a formação de novas fases minerais. Em termos de transformações químicas, ocorre, em especial, a desidroxilação e amorfismo dos argilominerais, o que deve conferir a esses materiais cerâmicos, quando devidamente cominuídos, reatividade química de natureza pozolânica.

Conforme apresentado por Souza Santos (1975, apud ZAMPIERI, 1989) os argilominerais são os constituintes típicos das argilas, caracterizando-se normalmente por haverem dimensões bastante reduzidas e em estado preferencialmente cristalino; quimicamente são aluminossilicatos hidratados, contendo certos tipos de outros elementos como magnésio, ferro, cálcio, potássio, sódio, etc.; após moagem, formam com a água uma pasta mais ou menos plástica, que endurece após secagem ou num processo de queima.

2.5.2 Produtos cerâmicos

A argila é o produto, matéria prima, que dá origem aos materiais cerâmicos. Seu uso é bastante difundido, sendo a base para diversos produtos cerâmicos, desde utensílios domésticos até produtos para a construção civil.

2.5.2.1 Histórico

Por ser material barato, pois a matéria prima é abundante, os produtos cerâmicos tornaram-se logo algo essencial na história da humanidade. O emprego dos produtos cerâmicos, obtidos por cozimento de argilas, primeiro ao sol e depois em fornos, iniciou-se naqueles lugares onde escasseava a pedra e eram abundantes os materiais argilosos.

Segundo Lea (1970, apud ZAMPIERI, 1989) os muros das antigas construções egípcias exemplificam uma das mais primitivas formas de utilização dos materiais argilosos. Nestas obras, o material argiloso, proveniente do rio Nilo era utilizado na preparação de tijolos, os quais, posteriormente eram secos (calcinados) ao sol. Romanos também empregavam argilas calcinadas em suas construções. Argamassas do produto pozolana + cal, na forma de telhas ou cerâmicas moídas, eram empregues sempre que pozolanas naturais, como aquelas derivadas de rochas vulcânicas não eram disponíveis. Os hindus eram outros que se valiam de argamassas de cal e argila cozida e moída (ZAMPIERI, 1989).

Com o advento do cimento Portland, em meados do século XIX, e em função das notáveis propriedades deste novo ligante, houve um período de declínio das antigas misturas a base de cal e, conseqüentemente, dos próprios materiais pozolânicos. Contudo, dada a qualidade das construções edificadas com esses materiais e que ainda perduram nos dias de hoje, valida-se sua eficácia.

Com o aparecimento das estruturas metálicas e do concreto armado, o tijolo foi relegado da sua função estrutural para a utilização como elemento de vedação. Visando a redução do peso próprio e a melhoria da qualidade de isolamento térmico, desenvolveu-se o uso de tijolo furado. Mais tarde, na execução das lajes mistas, nas coberturas, nos pisos e erguimento de paredes, os materiais cerâmicos foram se impondo e em muitas destas aplicações são ainda hoje absolutos. Os produtos cerâmicos, apesar da disputa existente no mercado frente a concorrência de outros materiais de construção, continuam em uso e em evidência mercê de suas qualidades e resistência mecânica, durabilidade, estética, conforto e preço relativamente barato.

2.5.2.2 Produção

A matéria prima para a fabricação dos produtos cerâmicos é a argila, material muito abundante na superfície terrestre. As argilas caulinita, montmorilonita e illita são as utilizadas na manufatura dos produtos cerâmicos. Os artefatos cerâmicos necessitam ser calcinados em altas temperaturas e tem como características a sua plasticidade, capacidade de absorver e ceder água, capacidade aglutinante, trabalhabilidade, contração na secagem e quando sua queima ocorre, a altas temperaturas, lhe atribuem rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa (SEBRAE, 2008 apud RODRIGUES, 2019). A produção de um produto cerâmico, desde a coleta do material argiloso até o transporte visando chegar ao seu destino final, é ilustrada na Figura 5, na seqüência.

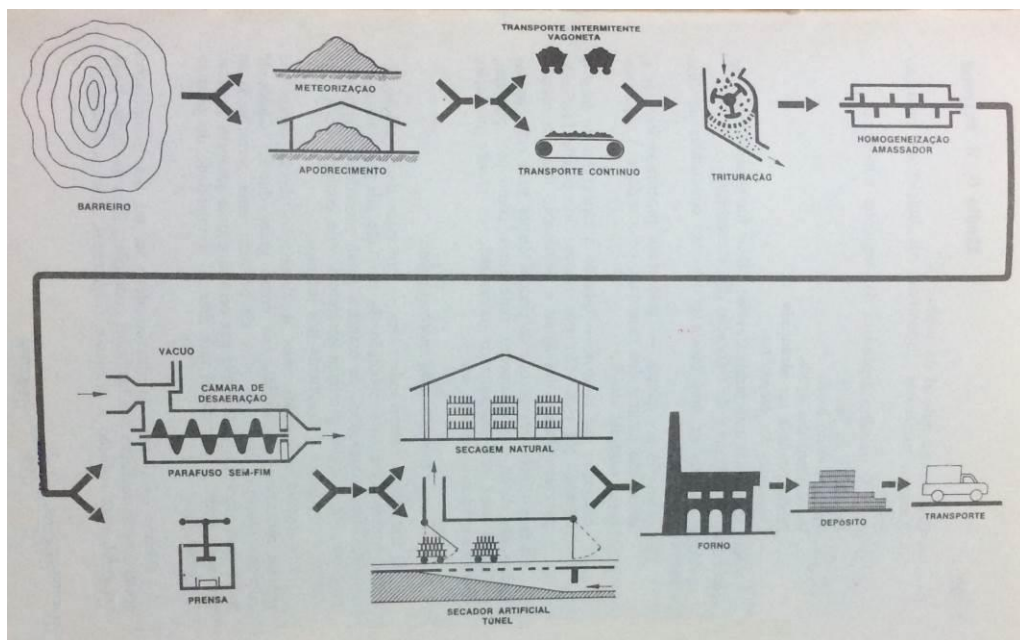


Figura 5 – Esquema de fabricação de produtos cerâmicos (PETRUCCI, 1987)

A fabricação dos produtos cerâmicos compreende várias fases, desde a exploração do barreiro e tratamento prévio da matéria-prima, passando pela homogeneização, moldagem e secagem do material até sua queima. O processo de queima, ou calcinação, dos argilominerais é uma etapa imprescindível na obtenção de pozolanas a partir de ativação térmica de argilas. Deve seguir algumas recomendações conforme normatizado pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Zampieri (1989) relata que a temperatura ótima de queima é aquela necessária tão somente à

desestruturação e colapso do argilomineral, na qual os óxidos de silício, alumínio e ferro se tornam bastante reativos e distribuídos em um material de elevada área específica.

Com respeito à produção de cimentos pozolânicos, Farias Filho *et al.* (2000) discorrem que a nível nacional, várias cimenteiras produziram, no período entre 1975 e 1982, cimentos pozolânicos, com incorporação de argila calcinada, e desde então, por razões econômicas, poucas fábricas atuam neste segmento com esse tipo de adição. Porém, conforme Mantuano Netto (2006) tem-se observado nos últimos anos interesse crescente no uso da metacaulinita e de outros aditivos minerais, como substitutos parciais do cimento Portland para a produção de concretos e argamassas de alto desempenho, em função dos benefícios que essas adições podem trazer.

2.5.2.3 Classificação

Os produtos cerâmicos são materiais amplamente empregados no ramo da construção civil. São moldados conforme sua finalidade, blocos, telhas, revestimentos, entre outros, seguidos de sua calcinação, a altas e controladas temperaturas. A matéria prima predominante na fabricação de produtos cerâmicos são as argilas. A cerâmica vermelha é de grande destaque neste âmbito. A cerâmica vermelha é caracterizada por produtos oriundos da argila ou misturas contendo argila, através de moldagem, secagem e queima da mesma, de onde vem à cor avermelhada que dá seu nome (VERÇOZA, 1987, apud RODRIGUES, 2019).

Do ponto de vista mineralógico, em conformidade com Zampieri (1989) as argilas se caracterizam por constituírem em grande parte de minerais específicos, denominados minerais de argila ou argilominerais, ocorrendo normalmente em caráter subordinado, outros materiais e minerais associados, tais como quartzo, feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonatos, matéria orgânica, etc. Ainda segundo o mesmo autor, os argilominerais são, de fato, o produto de alteração de uma grande variedade de rochas, notadamente daquelas portadoras de quantidades apreciáveis de silicatos de alumínio (também chamados de aluminossilicatos), seja pela ação dos processos intempéricos, seja em decorrência de processos hidrotérmicos de baixa temperatura.

Segundo Petrucci (1987), os minerais que constituem um produto cerâmico:

- A sílica forma, em geral, de 40 a 80% do total da matéria prima;
- A alumina aparece ordinariamente com teores de 10 a 40%;
- O óxido de ferro não ultrapassa, usualmente, 7% e é o mais importante fator na coloração do produto cozido.

Outras formas de classificação dos argilominerais refere-se ao seu arranjo cristalino, características estruturais, morfologia e características físicas, conforme pode ser visualizado na Figura 6.

CRISTALINIDADE	HÁBITO PREDOMINANTE	ARRANJO ESTRUTURAL	GRUPO DE ARGILOMINERAIS
Cristalinos	Lamelar ou placóide	Estratificado (1:1)	Caulinitas
		Estratificado (2:1)	Expansivos – Esmectitas Vermiculitas Não expansivos - Ilitas
		Estratificado (2:1:1)	Cloritas
	Fibroso	Em cadeia	Paligorskita, atapulgita, sepiolita
Amorfos	---	---	Alofanos – minerais amorfos aos raios X, nos quais os constituintes Al, Si e H ₂ O se combinam ao acaso

Figura 6 – Classificação dos grupos de argilominerais (ZAMPIERI, 1989)

Em relação ao seu arranjo cristalino, segundo Zampieri (1989) a estrutura cristalina desses minerais exibe um padrão lamelar estratificado ou, menos frequentemente, fibroso, sendo no primeiro caso definida por folhas contínuas de tetraedros de SiO₄, as quais se ligam e se alternam com outros de composição essencialmente aluminosa e magnésiana, cuja unidade elementar apresenta uma coordenação octaédrica. A combinação dessas duas folhas elementares (tetraédrica e octaédrica) promove arranjos determinados (denominados camadas) que podem ocorrer separadas entre si por vários materiais, tais como moléculas de água, cátions e moléculas orgânicas. A representação destas estruturas está esquematizada na Figura 7.

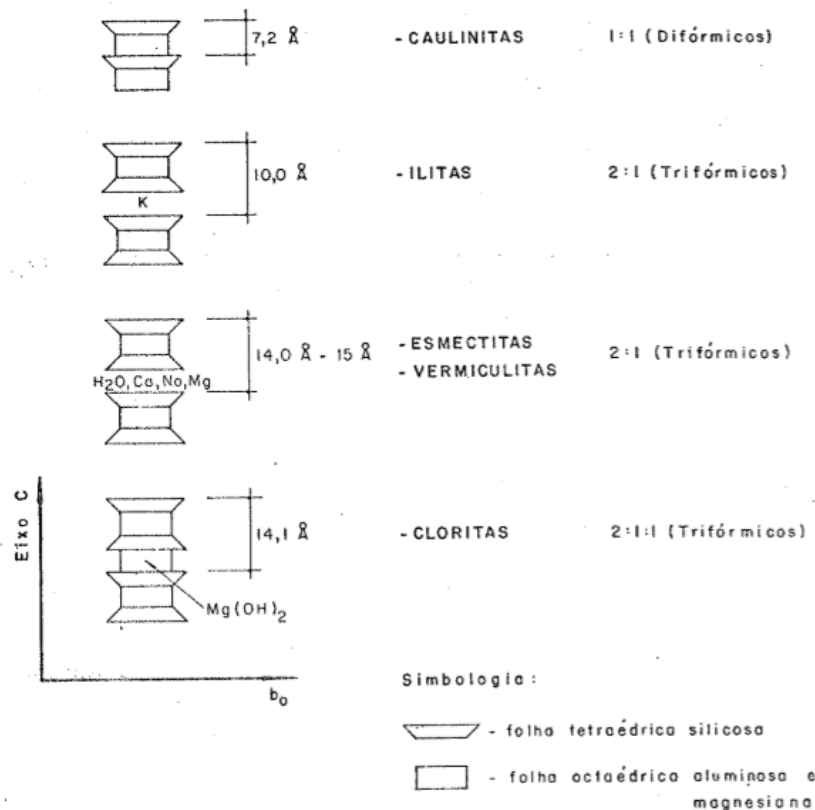


Figura 7 – Representação da estrutura cristalina dos principais grupos de argilominerais (SOUZA SANTOS, 1975, apud ZAMPIERI, 1989)

2.5.2.4 Utilização

A cerâmica, de um modo geral, é representada por uma imensidade de aplicações, dadas as características principais da argila como a plasticidade quando úmida, o que possibilita o desenho de peças de várias formas e tamanhos, e a resistência quando seca. São procedentes itens como tijolos, blocos, telhas, tubos, ladrilhos, lajes para forro, entre outros. Os produtos cerâmicos são empregados, por exemplo, como material de cobertura sob a forma de telhas (Figura 8). Contudo, os produtos cerâmicos, quando calcinados podem ser empregues para outras finalidades. Dependendo de suas características físico-químicas, e quando finamente moídos, os materiais cerâmicos podem apresentar atividade pozolânica, podendo ser empregues para produção de novos materiais cimentícios.



Figura 8 – Telha cerâmica (GUIA DO CONSTRUTOR, 2020)

A utilização de pozolanas para a produção de concretos e argamassas não é assunto novo. Numa breve análise histórica, pode-se observar que o emprego de materiais pozolânicos, sob certos aspectos, se mostra cíclico. Gregos e Romanos utilizaram a pozolana como material de construção em épocas e locais diferentes. Atualmente a engenharia está em um novo ciclo no que diz respeito ao uso desse material, com estudos sendo divulgados por diversos pesquisadores, especialmente porque o mercado se faz cada vez mais exigente, principalmente em relação à durabilidade das construções (MANTUANO NETTO, 2006).

Muitos destes materiais cerâmicos são provenientes principalmente da indústria de produção de cerâmica e do setor de construção e demolição, e encontram-se em formato de resíduo. Com isto, buscando uma solução sustentável para o setor, pesquisas e estudos havendo o emprego de materiais cerâmicos como pozolanas vem sendo gradualmente difundido. Os resíduos cerâmicos caracterizam uma ampla variedade de composições e podem ser agrupados de acordo com sua origem, como: resíduos de ladrilhos, tijolos, telhas, azulejos etc. São trabalhos que empregam resíduos cerâmicos: Ay & Ünal (2000), Farias Filho *et al.* (2000), Puertas *et al.* (2006, 2008), Reig *et al.* (2013, 2014), Sun *et al.* (2013), Fadaly *et al.* (2014), Garcia *et al.* (2014), Murillo *et al.* (2017), Mwiti *et al.* (2018), Araújo *et al.* (2019), Azevedo *et al.* (2020), entre outros.

2.6 CAL DE CARBURETO

Cabe a civilização grega o título de pioneirismo na utilização da cal como aglomerante. Uma prática que tem seus indícios relacionados com a ilha grega de Creta. Posteriormente egípcios

e romanos utilizavam de argamassas a base de cal em suas construções (DAVIS, 1934 e LEA, 1970 apud ZAMPIERI, 1989; BLEZARD, 1998).

A cal está presente em vastos ramos da engenharia civil. A adição de cal é uma técnica atraente quando o projeto exige a melhoria do solo local. O tratamento de solos com cal encontra uma aplicação, por exemplo, na construção de camadas de base de pavimentos, na proteção de declives de barragens de terra e como uma camada de suporte para fundações rasas (CONSOLI *et al.*, 2009).

A cal de carbureto configura-se por ser um resíduo do processo produtivo do gás acetileno, muito empregado em operações de corte e solda. Segundo Thomé (1999, apud SALDANHA, 2014) a cal de carbureto possui algumas peculiaridades que acabam restringindo o seu uso na construção civil, devido a sua coloração pouco azulada e devido a sua granulometria mais grosseira. Entretanto, estas características não devem ser fatores que inviabilizem a sua utilização, pois o importante é a sua afinidade com silicatos e aluminatos para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

Por ainda ter seu uso pouco difundido no âmbito da engenharia civil, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de reutilizar este material, que é rico em óxido de cálcio, em soma de um material com origem pozolânica. Saldanha (2014) emprega a cal de carbureto em seu trabalho. O autor aponta que no período de sua pesquisa, a empresa cujo seu resíduo é proveniente, e, diga-se de passagem, o resíduo de cal de carbureto empregue nesta pesquisa é derivado da mesma empresa, gerava aproximadamente 2160 toneladas/ano de cal de carbureto.

Conforme citado em Saldanha *et al.* (2018), a cal de carbureto pode ser reciclada devido as suas propriedades químicas e físicas, podendo ser utilizada em diferentes processos, como agricultura, em indústrias, em estações de tratamento de água, na construção civil e em Engenharia Geotécnica para a estabilização de solos. Os mesmos autores analisaram a composição química da cal de carbureto e da cal hidratada comercializada, e identificaram que os resultados entre as cales são equivalentes.

2.7 REAÇÕES POZOLÂNICAS

Originalmente, o termo pozolana era associado com cinzas vulcânicas, que são formações naturais, e argilas calcinadas. Atualmente, este termo foi estendido a todos os materiais sílico-aluminosos, que quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar componentes com propriedades cimentantes (SABIR *et al.*, 2001). A atividade pozolânica ocorre da reação do cálcio da cal com a sílica e/ou alumina, que podem ser provenientes de material pozolânico, como materiais de origem cerâmica calcinada (pó de telha, blocos de tijolo), gerando os silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, responsáveis pela maior parte do ganho de resistência das misturas solo–pozolana–cal.

Depreende-se dos dados da literatura que são poucas as fases que podem conferir alguma atividade pozolânica a um determinado material, pois são inúmeras as características necessárias para que um material pertença a essa classe. Conforme Zampieri (1989), a pozolanicidade se manifesta normalmente com maior intensidade naqueles materiais onde o silício e o alumínio encontram-se em estruturas amorfas ou atômica e desordenadas (vidros sílico-aluminosos, materiais que contenham sílica amorfa, argilas termicamente ativadas) ou ainda em materiais portadores de minerais zeolíticos. Saldanha (2014) salienta que a reação pozolânica caracteriza-se pela interação da fase amorfa do material pozolânico com o hidróxido de cálcio que na presença de umidade reagem quimicamente formando compostos com propriedades cimentantes.

A reação pozolânica se desencadeia porque a sílica e a alumina, em estado amorfo, possuem uma forte aptidão de reagir com a cal em condições normais de temperatura e pressão [CNTP], devido à fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso das argilas calcinadas (MALQUORI, 1960, apud MANTUANO NETTO, 2006; ZAMPIERI, 1989).

A capacidade de reação da cal com os óxidos presentes da pozolana e a subsequente formação de compostos de propriedades cimentícias deve ser encarada como uma busca por um equilíbrio físico-químico nas novas condições impostas ao material. Conforme Zampieri (1989), a cinética da reação pozolânica dependerá, além das características mineralógicas dos materiais, de sua finura (área de reação) e, também da temperatura e da concentração de

reagentes. Scheuermann Filho (2019) complementa esta afirmação e conforme o mesmo as reações pozolânicas ocorrem entre as fases ativas da pozolana e o óxido de cálcio, sendo caracterizadas pela quantidade total e taxa de consumo desse e são influenciadas pelas características químicas, físicas e mineralógicas intrínsecas à pozolana, assim como por condições ambientais externas ao sistema.

Segundo Johann (2013), as reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de minério sílica, alumina e ferro presentes no solo/materiais origem pozolânicos reagem com a cal e a água, formando novos compostos com características cimentantes. Conforme Rogers e Glendinning (2000), e Winter (2018), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas do solo. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Segundo Zampieri (1989) quanto maiores forem o desarranjo estrutural (atômico) do material e a sua instabilidade em meio básico (uma vez que a solução intersticial da pasta de cimento exibe valores de pH próximos de 12), mais intensamente se manifestará a reação pozolânica.

As estabilizações à base de cálcio, como o cimento Portland ou aqueles com propriedades pozolânicas, envolvem algumas etapas para melhorar as propriedades dos solos. Segundo Castro (1995) e Behnood (2018) são estas: (a) hidratação; (b) troca catiônica; (c) floculação e aglomeração; (d) reação pozolânicas; e (e) (potencial) carbonatação, sendo este último uma reação prejudicial.

O processo de troca catiônica devido à mistura de estabilizadores com o solo causa floculação e aglomeração de partículas do solo, o que, por sua vez, produz um solo com distribuição mais granulométrica, maior permeabilidade e menor plasticidade. Esse processo começa imediatamente após a mistura do agente estabilizador com o solo e dura apenas algumas horas. (BEHNOOD, 2018). Segundo o mesmo autor, o processo de hidratação dura mais de um mês após a mistura. Além disso, a presença de OH^- aumenta os valores de pH, o que desenvolve a reação pozolânica. Devido à reação pozolânica, o Ca^{2+} fornecido pelo agente de estabilização reage com Si e Al e produz compostos cimentícios como silicatos de cálcio hidratado (CSH), aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e/ou aluminossilicatos de cálcio hidratado (CASH). Esses compostos em síntese melhoram as propriedades do solo, pois são

responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica do solo, como resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, resistência à tração, módulo resiliente e módulo de elasticidade.

A etapa das reações pozolânicas ocorre de forma lenta, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência e o calor de hidratação associado a essa reação (CASTRO, 1981; CASTRO, 1995; MEHTA, 1987, apud MANTUANO NETTO, 2006; BEHNOOD, 2018). Segundo Castro (1995) como a cristalização dos géis sílico-aluminosos transcorre de forma lenta, sobre condições normais de temperatura, confere-se acréscimos na resistência mecânica somente após a cristalização.

Para que ocorram as reações pozolânicas, alguns outros aspectos devem ser levados em consideração. Um deles é referente a sua hidratação. É fundamental a presença da água, pois é neste meio que ocorrem as reações. A cal deve se dissolver para liberar os íons Ca^{+2} e OH^- que se difundem para e através da estrutura da pozolana até atingirem sítios adequados para reagirem, originando compostos com poder cimentante, análogos aos encontrados no cimento hidrolisado. Outra questão é referente a natureza dos argilominerais. Os minerais de partida de uma pozolana, (a título de exemplo escórias, cinza volante e produtos cerâmicos) são bem mais estáveis, possuem energia superficial menor e são mais organizados estruturalmente, em relação ao cimento. Com isto, a velocidade das reações químicas (pozolânicas) são menores e, portanto, o desenvolvimento da resistência mecânica ocorre gradualmente e estende-se por um período mais prolongado (CASTRO, 1995).

Por outro lado, a hidratação no cimento Portland ocorre mais rapidamente, uma vez que, em contato com a água, a hidrólise se instala pela ação dos íons H^+ e OH^- que rapidamente atacam suas estruturas, rompendo numerosas ligações e aliviando tensões estruturais. Deste modo, a taxa de desenvolvimento da resistência (endurecimento) e o calor de hidratação são maiores neste estágio inicial. A reação de hidratação do cimento produz hidróxido de cálcio, enquanto a reação pozolânica consome (CASTRO, 1995; MANTUANO NETTO, 2006).

O gráfico representado Figura 9 sintetiza este processo, onde verifica-se o consumo de cal ao avançar do tempo para um cimento (Portland) comum e outro que contém uma pozolana em sua composição, e neste segundo ocorre um decréscimo gradual com o tempo do teor de hidróxido de cálcio livre, em função do progresso da reação pozolânica. A evolução do

consumo do conteúdo de cal com o tempo mostra ser uma grande valia para a definição da qualidade de uma pozolana. Conforme Zampieri (1989), quanto mais rápido e intenso for o decréscimo do teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mais reativa será, a princípio, a pozolana. Cristelo (2001) corrobora com o assunto, pois segundo o autor a reatividade da pozolana define a rapidez de ação da cal após aplicação e exprime a eficiência da sua ação estabilizante. Exposto isto, pode-se afirmar que a velocidade da reação pozolânica está também relacionada com as condições de cristalinidade dos seus materiais. As argilas calcinadas dispõem de estruturas amorfas (CASTRO, 1995), já o quartzo, a título de comparação, apresenta baixíssima reatividade devido à boa cristalinidade.

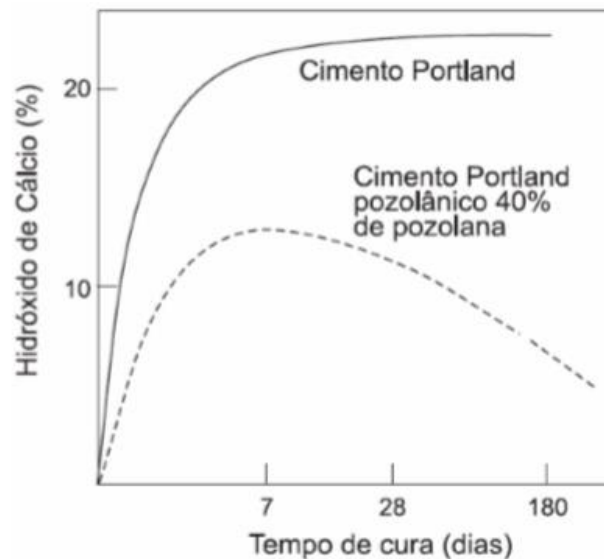


Figura 9 – Variações no conteúdo de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento Portland e do cimento pozolânico (LEA, 1970, apud MANTUANO NETTO, 2006)

O fornecimento da quantidade adequada de cálcio desempenha um papel importante na capacidade dos estabilizadores à base de cálcio, para fornecer propriedades melhoradas em tempo hábil dos solos. Em outras palavras, a eficácia dos estabilizadores à base de cálcio depende muito do seu teor de cal livre (BEHNOOD, 2018).

Devido às suas propriedades físico-químicas, como disponibilidade de silicatos e aluminatos em uma estrutura amorfa (fase reativa) e área superficial específica elevada (depois de finamente moída), espera-se que misturas combinadas com cal ou cimento adicionadas de um

material de procedência pozolânica, quando expostos a um ambiente hidratado produzam reações pozolânicas, originando novos compostos de cimentação (CASTRO, 1995; MASSAZA, 2004; BEHNOOD, 2018). Conforme já fora explanado, o tempo é outro fator de grande relevância para a ocorrência das reações pozolânicas. A reação pozolânica consiste em ser uma reação contínua e pode ocorrer ao longo de meses ou anos (BEHNOOD, 2018). Saad *et al.* (1983, apud Zampieri, 1989) conforme as obras de barragem (Jupuíá/MS) empregou-se pozolana de origem argilosa calcinada em substituição ao cimento Portland. Alguns dos benefícios advindos desta prática são relatados a seguir:

- Redução efetiva da expansão devido à reação álcali-agregado (Figura 10);
- Os concretos contendo 0, 30 e 50% dessa pozolana apresentaram praticamente os mesmos valores de RCS após 90 dias decorridos; entretanto, após um ano os cimentos que continham adição pozolânica superaram as resistências dos cimentos puros, sem adição de pozolana (Figura 11);
- Registrou-se uma substancial economia no custo da obra, na época.

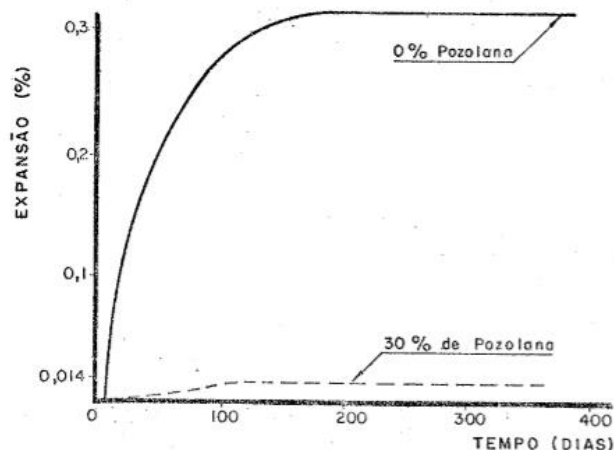


Figura 10 – Eficácia da pozolana de argila calcinada na redução da expansão (SAAD *et al.*, 1983, apud ZAMPIERI, 1989)

As curvas contendo as porcentagens de resistência à compressão simples adquiridas pelos cimentos adotados na construção da Usina Hidrelétrica de Jupuíá, exibidas na Figura 11, evidenciam que o cimento Portland comum, onde não há concentrações de pozolanas

adicionadas, atinge 50% de sua resistência a aproximadamente 7 dias de cura (onde os 100% são analisados sobre a ótica de 365 dias – 1 ano), enquanto os que continham alguma adição de material pozolânico tardaram um pouco mais em tal; aos 90 dias ambos apresentaram resultados similares; decorrido os 365 dias, nota-se que o cimento pozolânico com a maior incidência de material de tal origem foi o que apresentou os maiores ganhos de resistência no intervalo, isto devido as reações pozolânicas que ali ocorreram, pois as mesmas tardam mais em suceder.

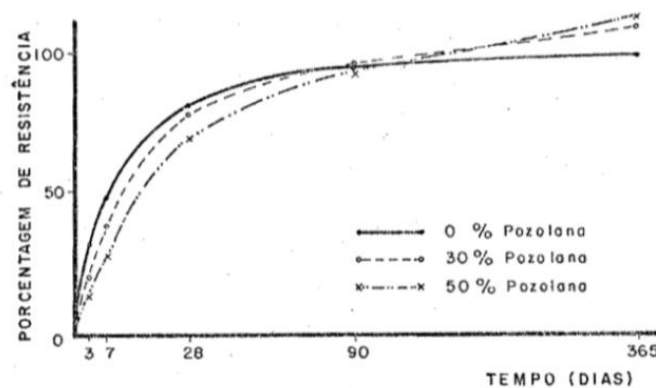


Figura 11 – Evolução das resistências à compressão de concretos contendo 0, 30 e 50% de adição pozolânica em função do tempo (SAAD *et al.*, 1983, apud ZAMPIERI, 1989)

2.8 ESTABILIZAÇÃO POR ATIVAÇÃO ALCALINA

A técnica de ativação alcalina surge com gregos e romanos. A excelente durabilidade das antigas construções é atribuída as quantidades consideravelmente maiores de compostos de metal alcalino contidos nos cimentos antigos. Contudo, a difusão da técnica ocorre somente no século XX, mais precisamente por volta da década de 1930, quando H. Kühn relatou estudos sobre o comportamento de misturas de escória em combinação com hidróxido de potássio. Na década seguinte, em 1940, Purdon realizou estudos com escórias de alto forno ativadas por álcalis e concluiu que os hidróxidos dos metais alcalinos atuam como catalisadores. Posteriormente, em 1957, um cientista da União Soviética Victor Glukhovsky foi o primeiro a descobrir a possibilidade de produzir ligantes usando aluminossilicatos (argilas) com baixo/inexistente teor de cálcio e soluções de metais alcalinos. Nas décadas de 1970/80, J. Davidovits publicou seus resultados sobre a fabricação de ligantes misturando

álcalis e produtos calcinados derivados da caulinita, calcário e dolomita. Ele chamou esses ligantes de geopolímeros porque sua estrutura era semelhante a polímeros. Davidovits constatou que era possível produzir ligantes, aproveitando a reação alcalina produzida por uma solução e materiais contendo silício (Si) e alumínio (Al) de origem geológica ou resultante de subprodutos industriais, como a cinza volante e a escória (LEITÃO et al., 2017; KRIVENKO, 2017).

O geopolímero, é definido como a síntese dos polímeros orgânicos por meio altamente alcalino e usado como materiais cimentícios suplementares. A ativação alcalina é um processo químico chamado também geopolimerização pelo qual determinadas estruturas parcialmente ou totalmente amorfas se transformam em estruturas com propriedades cimentícias (CASTRO, 2015). Segundo Fernández-Jiménez *et al.* (2017), a ativação alcalina requer dois componentes principais, sendo o primeiro o precursor, rico em sílica e alumina (com o maior grau de amorfização possível); e a solução ativadora, baseada em um metal alcalino (geralmente sódio ou potássio) ou um metal alcalino-terroso (geralmente cálcio). Esta técnica constitui uma excelente solução para potencializar as propriedades da maioria dos resíduos industriais.

Além de serem chamados de geopolímeros, outras nomenclaturas utilizadas para descrever um aluminossilicato alcalino amorfo são: cimentos ativados alcalinamente, geocimento, cimentos alcalinos, polímeros inorgânicos, etc. Apesar desta variedade de nomenclaturas, todos esses termos descrevem materiais sintetizados utilizando a mesma base química. Os geopolímeros são considerados a terceira geração de cimentos, depois da cal e do cimento Portland comum (SINGH et al., 2015).

Materiais pozolânicos, dentre eles as argilas calcinadas, têm sido utilizadas com sucesso na substituição parcial do cimento Portland comum (CPO) em cimentos misturados. Com isto, muitas pesquisas são produzidas visando entender o comportamento de materiais cimentícios (concretos e argamassas), com utilização (adição ou substituição parcial do cimento) de pozolanas, dentre elas: materiais de origem argilosa, como resíduos cerâmicos, argilas calcinadas, metacaulinitas, etc.: Ay & Ünal (2000), Farias Filho *et al.* (2000), Mantuano Netto (2006), Rojas *et al.* (2006), Toledo Filho *et al.* (2007), Puertas *et al.* (2008), Cabral *et al.* (2009), Fernández *et al.* (2010), Ribeiro *et al.* (2011), Amankwah, *et al.* (2014), Garcia *et al.*

(2014), Danner *et al.* (2015), Rahhal *et al.* (2015), Mwiti *et al.* (2018), Araújo *et al.* (2019) e Rodrigues (2019).

Rojas *et al.* (2006) ensaiaram compostos contendo materiais cerâmicos e, mais especificamente, telhas de argila calcinada como material pozolânico na fabricação de cimento. Os resultados obtidos são comparados com os de outros subprodutos industriais tradicionalmente usados na construção, como a cinza volante (CV) e a sílica ativa (SA). Puertas *et al.* (2008) estudaram a viabilidade de utilização de três tipos de resíduos cerâmicos como matéria-prima nas misturas utilizadas para a fabricação de clínquer de cimento Portland. Ribeiro *et al.* (2011) observaram o potencial uso de lama vermelha natural como pozolana em substituição ao cimento Portland.

Muitos pesquisadores têm demonstrado que a adição de ativadores alcalinos pode aumentar o potencial pozolânico de tais materiais suplementares e melhorar as propriedades dos respectivos sistemas cimentícios, especialmente em idades iniciais (SHI *et al.*, 2011). A utilização de ligantes obtidos por ativação alcalina (AA) representa uma alternativa ecologicamente correta ao cimento Portland, pois permite o reaproveitamento de resíduos industriais. A ativação alcalina consiste na dissolução da sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) por uma fase líquida de alto pH. Em seguida, ocorre a polimerização, onde as moléculas aglutinam para formar moléculas maiores que precipitam como um gel. Resíduos industriais, também chamados de precursores, são partículas sólidas quimicamente interessantes, pois são ricos em aluminossilicatos em um estado amorfo (devido ao tratamento térmico a que foram submetidos), tornando-os menos estáveis e, subsequentemente, receptivos a reações químicas capazes de produzir um material novo e melhor organizado. A taxa de dissolução dos aluminossilicatos depende fortemente do nível de alcalinidade da mistura precursor-ativador, que é fortemente dependente do ativador usado (TORRES-CARRASCO & PUERTAS, 2017; CORRÊA-SILVA *et al.*, 2018).

Ativação alcalina é a reação de síntese dos geopolímeros, sendo definida, de modo geral como uma reação de hidratação de aluminossilicatos com substâncias alcalinas ou alcalino-terrosos, sendo uma vasta gama de materiais aluminossilicosos, caso das pozolanas, suscetíveis a esse tipo de reação. O mecanismo de reação que dá origem aos materiais ativados trata-se de um processo químico complexo de dissolução alcalina e precipitação numa solução aquosa de um

precursor, sendo responsável pelo endurecimento e propriedades dos álcali-ativados (SEVERO *et al.*, 2013). O processo inicial da reação de ativação alcalina é governado pela dissolução de partículas sólidas de aluminossilicatos em solução alcalina.

A reação de hidratação ocorre na presença de metais alcalinos ou alcalino-terrosos, incluindo: (i) hidróxidos (ROH , $\text{R}(\text{OH})_2$); (ii) sais de ácidos fracos (R_2CO_3 , R_2S , RF); (iii) sais de ácidos fortes (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); (iv) sais de silicato do tipo $\text{R}_2 \cdot (\text{n})\text{SiO}_2$, onde R é um íon alcalino como sódio (Na), potássio (K) ou lítio (Li) ou um íon alcalino-terroso como cálcio (Ca). Teoricamente, qualquer cátion pode ser o elemento alcalino em reações de ativação alcalina; porém a maioria dos estudos têm se concentrado no efeito de íons de sódio (Na^+) e potássio (K^+). A escolha do tipo de cátion de metal alcalino utilizado durante a síntese geopolimérica depende de muitos fatores, como o tipo de matérias primas, considerado o mais importante, bem como a aplicação prevista para os geopolímeros produzidos (SEVERO *et al.*, 2013; LEITÃO *et al.*, 2017).

O geopolímero é sintetizado pela mistura da fração reativa dos aluminossilicatos com soluções alcalinas fortes, como hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), silicato de sódio ou silicato de potássio. A mistura pode ser curada à temperatura ambiente ou curada à altas temperatura. Sob uma solução alcalina forte, os materiais reativos ao aluminossilicatos se dissolvem e formam unidades tetraédricas livres de SiO_4 e AlO_4 . Com o progresso da reação, a água é removida gradualmente e os agrupamentos tetraédricos de SiO_4 e AlO_4 são ligados para produzir precursores poliméricos através do compartilhamento de todos os átomos de oxigênio entre duas unidades tetraédricas, formando assim geopolímeros amorfos. Três tipos comuns de geopolímeros são a cadeia polissilato Al-O-Si, a cadeia polissilato siloxo Al-O-Si-Si e a cadeia polissilato disiloxo Al-O-Si-Si-Si (SOMNA *et al.*, 2011).

Durante a geopolimerização, uma vez que os aluminossilicatos são misturados com a solução alcalina, uma pasta se forma e rapidamente se transforma em um geopolímero rígido. Portanto, não há tempo e espaço suficientes para o gel ou pasta crescer em uma estrutura bem cristalizada; essa é a diferença fundamental entre zeolitas e geopolímeros. Após menor tempo de endurecimento, formam-se geopolímeros com estrutura policristalina firmemente

compactada, exibindo melhores propriedades mecânicas do que as zeolitas que possuem menor densidade e estrutura cristalina (KOMNITSAS & ZAHARAKI, 2007).

A ativação alcalina é influenciada por vários fatores, segundo Castro (2015), tais como o tipo e concentração do ativador alcalino, o tipo de matérias-primas utilizada como fonte de aluminossilicatos e as condições de cura, que devem ser conhecidos e estudados de modo que se verifique a melhor combinação de reagentes a usar na solução alcalina de ativação.

A cinética da reação e as características microestruturais dos geopolímeros são fortemente dependentes das características do precursor usado, juntamente com a quantidade de SiO_2 / Al_2O_3 e o tipo e concentração do ativador alcalino. Especificamente, o cátion de metal alcalino presente no ativador influencia a dissolução, a cinética de policondensação e os consequentes processos de formação de gel e cristal geopolimérico. Isso é uma consequência do papel dos cátions alcalinos na ordenação da água e dos complexos de Al e Si dissolvidos em solução, bem como seu papel de direção estrutural na geopolimerização (BERNAL *et al.*, 2015).

Os ativadores alcalinos mais empregados na temática são, segundo Duxson *et al.* (2007); Singh *et al.* (2015); Singhi *et al.* (2015), o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3) e silicato de potássio (K_2SiO_3), são usados para ativar as frações de aluminossilicatos. Contudo, descobriu-se que o NaOH possui maior capacidade de liberar monômeros de silicato e aluminato (DUXSON *et al.*, 2007). Torres-Carrasco (2015), afirma que os ativadores a base de sódio, como o NaOH, são os produtos químicos mais utilizados no processo de ativação alcalina, devido a disponibilidade, ao seu menor custo e baixa viscosidade. Ainda ressalta que as propriedades dos compostos de sódio e potássio são muito semelhantes. Os efeitos de cátions alcalinos maiores, como Cs e Rb, sobre a estrutura dos geopolímeros têm atraído menos atenção que os Na^+ e K^+ , principalmente devido ao alto custo das soluções de hidróxido que contêm esses álcalis (BERNAL *et al.*, 2015).

Fernández-Jiménez *et al.* (1996) estudaram uma serie de ativadores junto a escórias de alto-forno e concluíram que o hidróxido de sódio foi o ativador que apresentou as melhores respostas. Bernal *et al.* (2015) examinaram quatro hidróxidos alcalinos de grau reagente (NaOH, KOH, RbOH e CsOH) em combinação com metacaulim pelo período de 5 anos e os resultados elucidam que pequenas mudanças microestruturais estão ocorrendo nos

geopolímeros de metacaulim, independente do cátion alcalino, ao longo de um período prolongado de cura, demonstrando a alta estabilidade dos geopolímeros de metacaulim adequadamente formulados após o envelhecimento.

A presença relativa de cálcio no precursor e / ou no ativador é muito importante, uma vez que a velocidade das reações é altamente dependente do tipo de gel de aluminossilicato que está sendo formado, seja N – A – S – H ou C – S – H. A primeira precisa de períodos mais longos para amadurecer em uma matriz estável e confiável, enquanto o último tem períodos de cura / desenvolvimento semelhantes aos obtidos com ligantes à base de cimento (RIOS *et al.*, 2016).

Dentre as pesquisas que empregam a cal como ativador em conjunto com uma pozolana estão: (i) cinza volante: NCHRP (1976), Consoli *et al.* (2011 e 2018b), Saldanha (2014); (ii) vidro: Consoli *et al.* (2018a, 2018b, 2019), Winter (2018) e Scheuermann Filho (2019); (iii) cinza de casca de arroz: Winter (2018); (iv) Resíduo cerâmico/argila calcinada: Zampieri (1989), Justnes & Østnor (2015) e Araújo *et al.* (2019).

Os cimentos ativados alcalinamente, geralmente, consistem em dois componentes: um componente cimentício e os ativadores alcalinos. Álcalis cáusticos ou sais alcalinos são normalmente usados como ativadores alcalinos em cimentos e concretos ativados alcalinamente. Uma variedade de subprodutos industriais e resíduos, bem como uma série de matérias-primas de aluminossilicato, têm sido usados como componentes cimentícios em cimentos e concretos ativados por álcali. Esses materiais incluem escória de alto forno, escória de fósforo, escória de aço, cinza volante de carvão, vidro vulcânico, metacaulim, sílica ativa etc. (SHI *et al.*, 2011). Segundo Shi *et al.*, (2011) os cimentos alcalinos podem ser classificados em cinco categorias:

- (1) cimentos à base de escória ativada alcalinamente;
- (2) cimentos pozolânicos ativados alcalinamente;
- (3) cimentos de cal-pozolana/escória ativados alcalinamente;
- (4) cimentos combinados de aluminato de cálcio ativado alcalinamente;
- (5) cimentos Portland ativados alcalinamente (cimentos híbridos).

Atualmente, a indústria cimenteira trabalha em conjunto com a comunidade científica visando uma atividade mais sustentável, onde o emprego de materiais como as pozolanas (cinzas volantes, sílica ativa, resíduos de construção, revestimentos cerâmicos entre outros) surgem como alternativa aos métodos mais tradicionais. Com isto, os geopolímeros ganham grande destaque devido à sua alta resistência, durabilidade e redução do impacto ambiental (MURILLO *et al.*, 2017). Desta forma, pesquisas envolvendo os geopolímeros ativados com cátions de sódio e/ou potássio são as mais disseminadas, sobretudo aquelas contendo algum material de origem residual. Incluem-se os estudos de cinzas volantes ativadas alcalinamente [AA]: Palomo *et al.* (1999), Fernández-Jiménez *et al.* (2006, 2017), Somna *et al.* (2011), Cristelo *et al.* (2012a, 2012b, 2013, 2015), Joseph & Mathew (2012), Ruiz-Santaquiteria *et al.* (2013), Castro (2015), Silva *et al.* (2015), Leitão *et al.* (2017), Miranda *et al.* (2017), Corrêa-Silva *et al.* (2018); resíduo da construção e demolição + cinza volante AA: Cristelo *et al.* (2018); vidro AA: Fernández-Jiménez *et al.* (2017), Torres-Carrasco & Puertas (2017); escórias de alto-forno AA: Fernández-Jiménez *et al.* (1996, 2003); escórias de alto-forno + cinza volante AA: Singhi *et al.* (2015), Nath & Sarker (2017); escórias de alto-forno + metacaulim AA: Lecomte *et al.* (2006), Bernal *et al.* (2012); materiais de origem argilosa (resíduo cerâmico, argila calcinada, etc.) AA: Heah *et al.* (2013), Reig *et al.* (2013), Ruiz-Santaquiteria *et al.* (2013), Sun *et al.* (2013), Zhang *et al.* (2013), Fadaly *et al.* (2014), Komnitsas *et al.* (2014), Bernal *et al.* (2015), Song *et al.* (2015), Azevedo *et al.* (2020). Todos os trabalhos aqui expostos estão enquadrados nas categorias um e dois, conforme proposto por Shi *et al.*, (2011).

Os próximos trabalhos referem-se à categoria três (cal mais precursor). Entre eles cinza volante AA: Rios *et al.* (2016), Nath & Sarker (2017), Hanjitsuwan *et al.* (2018); sílica ativa AA: Kim & Olek (2014); de origem argilosa (resíduo cerâmico, argila calcinada) AA: Puertas *et al.* (2006), Reig *et al.* (2014), Danner *et al.* (2015). Por último, os contemplados na categoria cinco, também conhecidos como cimentos híbridos: cimento + cinza volante AA: Nath & Sarker (2017); cimento + resíduo cerâmico AA: Murillo *et al.* (2017).

Puertas *et al.* (2006) estudaram a ativação alcalina de seis resíduos cerâmicos calcinados produzidos em diferentes plantas de fábricas de revestimentos cerâmicos. A ativação alcalina foi obtida com o uso de NaOH e silicato de sódio, para um período de 8 dias de cura, onde duas concentrações molal diferentes foram testadas, 6 e 12 molal. Os valores de resistência

mecânica à compressão alcançaram os 14 MPa. Os valores de resistência se dão em função do pequeno período de cura. A natureza do ativador (dissolução do NaOH e Na₂SiO₃) não parece ser um fator que influenciou o processo. As maiores taxas de resistência estão compreendidas quando a concentração de ativador é de 6 molal.

Reig *et al.* (2013) estudaram pastas e argamassas ativadas por álcalis produzidas a partir de resíduos de tijolos de argila vermelha, utilizando NaOH e solução de silicato de sódio como ativadores. O tipo e a concentração do ativador alcalino, além das quantidades de aluminossilicatos, foram otimizados para produzir amostras de argamassa com resistência à compressão até a 50 MPa após sete dias de cura a 65°C. A concentração de Na⁺ fornecida por NaOH e silicato de sódio variou de 2,5 a 10 molal (mol/kg). As melhores amostras ativadas alcalinamente foram obtidas usando NaOH 5 molal após a cura por 7 dias, enquanto as propriedades mecânicas diminuíram significativamente para concentrações mais altas de NaOH.

Sun *et al.* (2013) utilizaram resíduos cerâmicos (principalmente de ladrilhos e blocos) que foram ativados com hidróxidos alcalinos e / ou soluções de silicato de sódio / potássio para sintetizar o material geopolimérico estudado. As pastas de geopolímero sintetizadas foram caracterizadas por meio de ensaios mecânicos e químicos. O comportamento térmico dos geopolímeros sintetizados foi determinado em termos de evolução da resistência à compressão devido à exposição a elevadas temperaturas, chegando de (100-1000°C). As pastas de geopolímero sintetizadas apresentaram resistência máxima à compressão de 71,1 MPa após 28 dias, para as pastas curadas a 100°C e de 75,6 MPa após um tratamento térmico a 1000°C. O aumento de temperatura mostrou-se favorável para os ganhos de resistência, assim como o resíduo cerâmico apresentou ser um material adequado para a formação de geopolímeros.

Komnitsas *et al.* (2014) estudaram o potencial, para síntese de geopolímero, de três resíduos da construção (RCD) sendo um deles o concreto, e dois resíduos cerâmicos, tijolos de argila vermelha e telhas cerâmicas. Ambos RCD foram submetidos a pulverização prévia, e as pastas AA curaram 7 dias a 60, 80 ou 90°C. As misturas contendo telha cerâmica atingiram um máximo de 57,8 MPa, as misturas à base de tijolo 49,5 MPa, enquanto as de concreto, apresentaram valores consideravelmente menores de resistência de 13 MPa, concluindo assim

que o RCD originado do concreto apresentou um potencial precursor menor do que os resíduos cerâmicos. No entanto, deve-se notar que tais valores de resistência à compressão só foram possíveis usando temperaturas de cura de 80°C ou 90°C, e após extensa pulverização dos resíduos iniciais.

Reig *et al.* (2014) estudaram a influência da concentração de ativador alcalino e da adição de hidróxido de cálcio no comportamento da resistência à compressão e na microestrutura de amostras de resíduos cerâmicos, utilizando NaOH e silicato de sódio como ativadores. Os resultados mostram que a concentração do ativador e a razão molar cálcio-sódio influenciam fortemente o comportamento no estado fresco e no endurecimento das argamassas feitas a partir de resíduos cerâmicos. Uma evolução linear da resistência à compressão pela adição de sódio foi observada quando a concentração de SiO₂ foi mantida constante, atingindo resistências à compressão de até 36 MPa após 7 dias de cura a 65°C.

Murillo *et al.* (2017) desenvolveram pastas com ligantes de sistemas híbridos à base de resíduo cerâmico (resíduos de construção e demolição de paredes e pisos) em conjunto com o cimento Portland, que atua também como provedor de cálcio. Relações entre os RCD/(RCD+CPO) foram entre 0,85 e 0,95%. Foram utilizados na solução alcalina uma soma de hidróxido de sódio (99% puro) dissolvido em água e uma solução de silicato de sódio. Os ensaios de resistências mecânicas à compressão simples ocorreram para as idades de 7, 28 e 90 dias de cura; com o passar do tempo, a resistência à compressão aumentou até atingir 30,06 MPa (90 dias de cura).

Outros fatores também interferem nas reações dos geopolímeros. Segundo Castro (2015), as condições de cura, temperatura e umidade, são fatores importantes no aumento da resistência mecânica do composto obtido por ativação alcalina. Uma das questões onde se deve deter a atenção na fase de cura é a retração devida à perda de água de hidratação. A temperatura é reconhecidamente um fator de extrema relevância na geopolimerização. Ela exerce grande influência na taxa de cristalização e na síntese e desenvolvimento dos geopolímeros. Palomo *et al.* (1999) constataram que há um aumento de temperatura durante as 2 horas e as 5 horas de cura, aumentando a resistência mecânica, mais do que durante as 24 horas de cura. Duxson *et al.* (2007) e Torres-Carrasco (2015) também abordam este assunto em seus respectivos trabalhos.

Segundo Castro (1981), são quesitos relevantes quanto a temática: o pH do material é um bom guia para a quantidade de aditivo a ser adicionado; o teor de material orgânico no solo é uma indicação de uma possível resposta negativa, principalmente com o cimento; a capacidade de troca catiônica é ótima indicação do tipo de argilomineral dominante, servindo inclusive para uma rápida avaliação semiquantitativa do mineral expansivo existente na amostra; a dissolução alcalina em NaOH fornece, apesar da interpretação ser delicada, teores de SiO_2 e Al_2O_3 que são considerados como extremamente ativos frente aos reagentes alcalinos; a superfície específica do material é também fonte de numerosas informações mineralógicas e de atividade química do material, já que a sua reação com os aditivos alcalinos é essencialmente uma reação de superfície; os teores de sílica, alumina e ferro combinados nas estruturas dos minerais, indicam as quantidades disponíveis e capazes de sustentar, na presença do aditivo, as reações pozolânicas a médio e longo prazos.

Outro fator que deve ser levado em conta é o efeito da compacidade da mistura. Consoli *et al.* (2007) propuseram uma metodologia de dosagem que, para um mesmo material, a resistência a compressão (q_u) é função da porosidade (η) da mistura e do teor volumétrico de cimento (C_{iv}). Mais tarde, Consoli *et al.* (2018a) idealizaram um novo parâmetro, denominado índice de porosidade / ligante (η/B_{iv}), permitindo normalizar o comportamento da resistência à compressão não confinada (q_u), em solos artificialmente cimentados adicionados de uma pozolana + cal. Consoli *et al.* (2018a) introduziram este parâmetro, o índice $\eta/(B_{iv})^x$, visando expressar em apenas uma relação à combinação dos efeitos da porosidade, do teor de pozolana e teor de cal (precursores) no comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados. O índice equivale a relação entre porosidade e o teor volumétrico de ligante sendo este o total do teor volumétrico da pozolana acrescido ao teor volumétrico de cal, ajustado pelo expoente x.

3 METODOLOGIA E PROJETO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por objetivo descrever o conjunto de materiais, os ensaios e a metodologia empregada nesta pesquisa. Sendo assim, este capítulo é dividido em várias etapas. A Tabela 4 apresenta um resumo. As 3 primeiras fases da Tabela 4 mostram um resumo das etapas deste capítulo. Já a fase 4 refere-se ao capítulo subsequente a este.

Tabela 4 – Resumo do programa experimental

	ETAPA	Fatores	Parâmetro / Obs	Variável	Níveis
FASE 1	Materiais da pesquisa: coletas, preparações e caracterização	Areia de Osório	Principal material: quartzo	Constante	-
		Pó de telha cerâmica	Fonte de SiO ₂ e Al ₂ O ₃	Constante	-
		Cal de carbureto	Fonte de CaO	Constante	-
		Hidróxido de sódio	-	Constante	-
		Água destilada	-	Constante	-
FASE 2	Ensaio e equipamentos: descrição	Ensaio resistência à compressão simples (RCS)	q _u (kPa)	Resposta	-
		Ensaio de rigidez	G ₀ (MPa)	Resposta	-
		Ensaio de durabilidade por molhagem/secagem e escovação	PM/PMA (%)	Resposta	-
FASE 3	Definição das variáveis (I)	Pó de telha cerâmica	Poz. (%)	Controlável	3
		Cal de carbureto	CC (%)	Controlável	3
		Umidade de moldagem	w (%)	Constante	1
		Peso esp. aparente seco	γ _d (kN/m ³)	Controlável	3
		Molalidade	NaOH (molal)	Controlável	2
		Tempos de cura	TC (dias)	Controlável	2
		Temperatura de cura	T(°C)	Constante	1
Programa experimental (II)					
FASE 4	Realização de ensaios (I)	RCS, rigidez, durabilidade e microscópicos			
	Comparações de resultados - relação dos entre os resultados obtidos e/com o parâmetro η/B _{IV} (II)				
	Análise das variáveis controláveis e respostas (III)				

A primeira etapa (*Fase 1*) refere-se quanto aos materiais utilizados, bem como suas particularidades cujos resultados são apresentados no item 3.1. Com esses, características físicas, químicas e mineralógicas, pertinentes ao presente estudo, foram avaliadas para os materiais estudados.

Na segunda etapa (*Fase 2*) disserta-se sobre os ensaios, equipamentos necessários e os parâmetros sucedidos destes.

A *Fase 3* está agrupada em duas subdivisões. A primeira parte mostra os procedimentos feitos para a realização dos ensaios, isto quer dizer, a definição de todas as variáveis pertinentes as moldagens dos CPs, neste contexto, serão sete o número de variáveis (Poz.; CC; w ; γ_d ; molalidade; cura [7 e 28 dias]). Já a segunda parte desta etapa ilustra o programa experimental, abordando o processo feito para as misturas dos materiais, isto é, as dosagens utilizadas para os diferentes teores de γ_d , Poz., CC e NaOH (onde várias molalidades foram testadas com o intuito de melhor compreender a variável), assim como os diferentes tempos de cura, levando em consideração os diferentes tipos de ensaio.

A última etapa (*Fase 4*) remete ao Capítulo 4, onde são apresentados os resultados dos ensaios realizados após a cura dos corpos de prova, assim como suas análises e comparações.

3.1 MATERIAIS

Os materiais empregues nesta pesquisa, igualmente como suas características, obtenção, etc. serão descritos nos próximos itens.

3.1.1 Areia de Osório

O solo utilizado neste trabalho foi a areia de Osório, proveniente do município de Osório, localizado no litoral norte gaúcho, distante cerca de 100 km de Porto Alegre. A areia de Osório caracteriza-se por apresentar uma granulometria fina, uniforme e não conter matéria orgânica. Após a obtenção e estocagem do material, o processo de preparação do mesmo

segiu algumas etapas, sendo a primeira de secagem do material (em estufas a 100°C), em seguida foi realizado o peneiramento (mesh #10 – 2mm) para homogeneização do material.

A curva granulométrica do presente estudo é determinada segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995) ensaio por peneiramento, realizado no LEGG, onde foram empregues peneiras com aberturas desiguais, possibilitando realizar uma curva granulométrica. Marques (2016) e Consoli *et al.* (2018a) utilizam em suas pesquisas o mesmo solo do presente trabalho. Entretanto, a metodologia de ensaio utilizado foi por difração a laser. Na Figura 12 observa-se a comparação de tais curvas granulométricas.

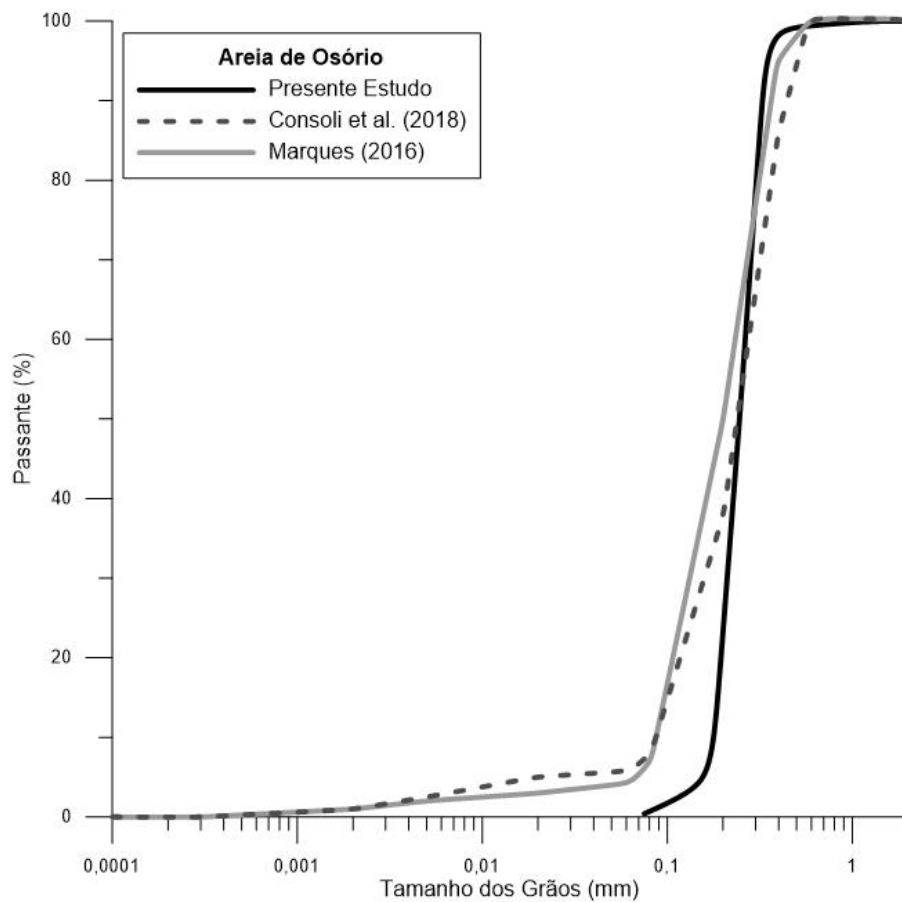


Figura 12 – Curvas granulométricas da areia de Osório

Na Figura 13, é possível visualizar as arestas arredondadas dos grãos da areia de Osório nas fotos de microscopia eletrônica (MEV) ampliados 40 e 500 vezes.

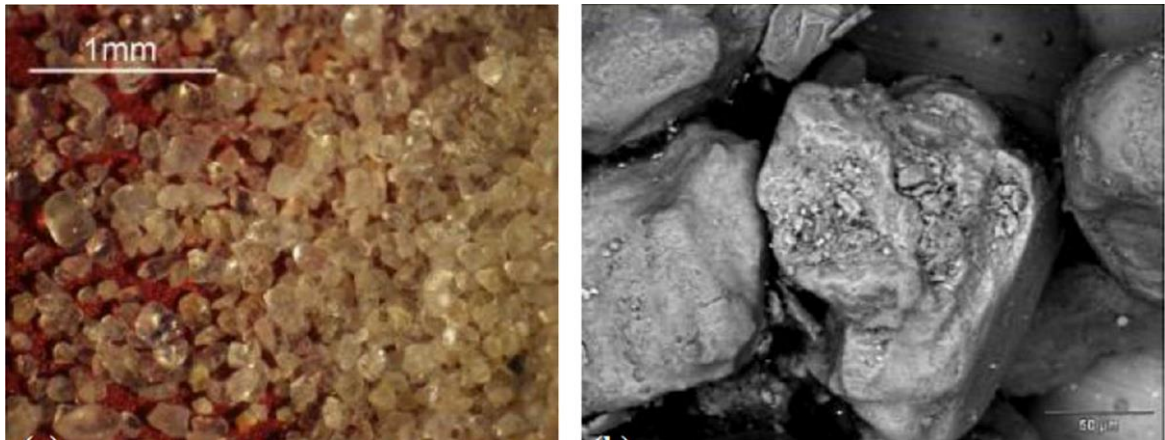


Figura 13 – Foto de microscopia eletrônica da areia de Osório ampliada (a) 40 e (b) 500 vezes (DALLA ROSA, 2009)

As propriedades físicas da areia de Osório são exibidas na Tabela 5. As faixas granulométricas estão conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2016b).

Tabela 5 – Propriedades físicas da areia de Osório

Propriedades	Valores
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,61
% Pedregulho ($d > 2$ mm)	0%
% de Areia Grossa ($0,6 < d < 2$ mm)	0,6%
% de Areia Média ($0,2 < d < 0,6$ mm)	47%
% de Areia fina ($0,06 < d < 0,2$ mm)	48%
% de Silte ($0,002 < d < 0,06$ mm)	4%
% de Argila ($d < 0,002$ mm)	0,4%

3.1.2 Pó de telha cerâmica

A telha cerâmica utilizada na pesquisa é oriunda de uma empresa de materiais de construção localizada na cidade de Porto Alegre/RS. O processo de preparo do material se inicia com uma moagem generalizada inicial feita em uma trituradora na empresa Graniplast, com endereço fixo no bairro Rubem Berta na zona norte da capital. A empresa tem como um dos principais produtos a venda do pó de telha/tijolo cerâmico, material muito utilizado em quadras de saibro em jogos de tênis (Figura 14).

Na sequência, no LEGG, um moinho de bolas deu continuidade ao trabalho de moagem do material cerâmico. O tempo de moagem no moinho de bolas ficou definido como 4 horas e, após o processo, a telha foi peneirada manualmente, cuja abertura da peneira era de 0,075mm (mesh #200; 75 μ m), ganhando um formato e consistência de pó, e o material que ficava retido retornava ao moinho de bolas. Após a moagem, todo o pó de telha foi misturado para garantir a homogeneidade do material.



Figura 14 – Trituradora (a), resíduo cerâmico (b)

Conforme definição da NBR 12653 (ABNT, 2014) a telha cerâmica é considerada uma pozolana artificial, de classe N – argila calcinada. Esta mesma norma tem por definição que argilas calcinadas são materiais provenientes da calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500°C a 900°C, de modo a garantir a sua reatividade com o hidróxido de cálcio.

Na Figura 15 é exibida a curva granulométrica do material pó cerâmico, obtido após a moagem do resíduo. A análise granulométrica foi realizada através do ensaio de granulometria a laser utilizando o equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser*, no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER localizado nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Azevedo *et al.* (2020) e Murillo *et al.* (2017) também

empregaram em suas pesquisas resíduos de cerâmica vermelha, sendo o primeiro proveniente de uma indústria cerâmica do município de Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. Ambas curvas granulométricas são apresentadas na Figura 15.

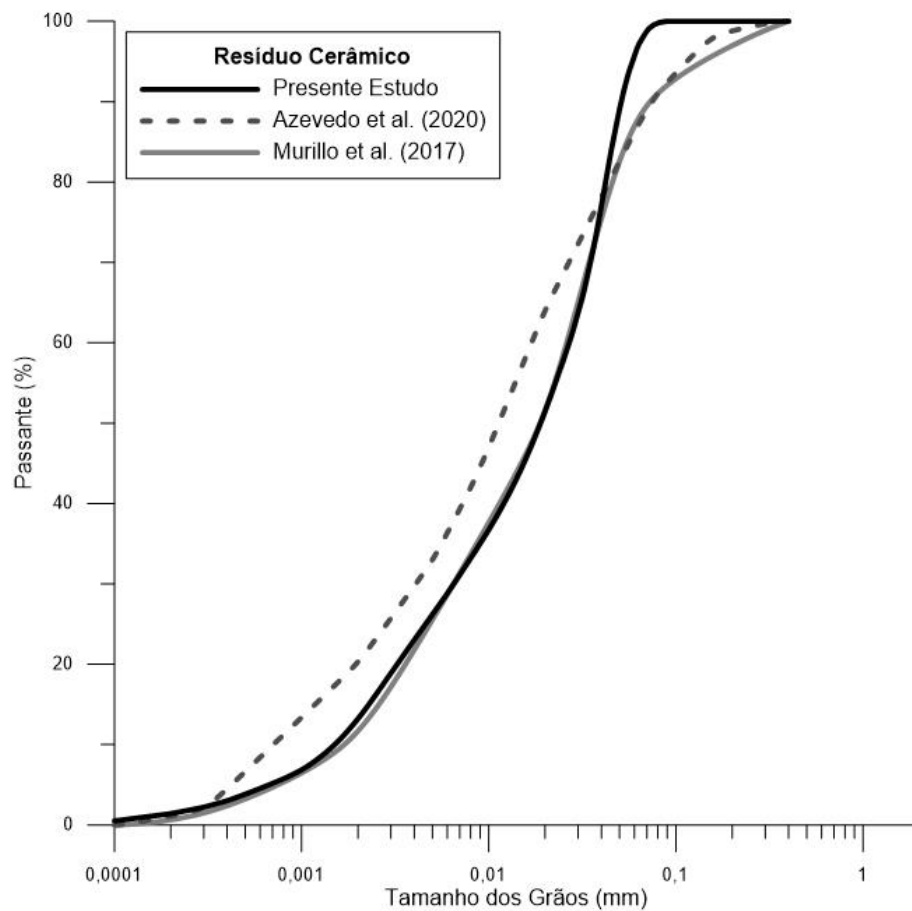


Figura 15 – Curva granulométrica do pó de telha cerâmica

As propriedades do pó de telha são exibidas na Tabela 6. As faixas granulométricas estão conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995). O ensaio de Gs da amostra seguiu as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2016b), onde foi obtido o valor de 2,58 de massa específica, resultado semelhante ao encontrado por Azevedo *et al.* (2020) de 2,60.

Tabela 6 – Propriedades do pó de telha

Propriedades	Valores	Procedimento
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,58	NBR 6458/2016
Superfície específica (m ² /g)	19,33	BET
% de Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm)	3,00%	Granulometria a laser*
% de Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	83,80%	
% de Argila (d < 0,002 mm)	13,20%	
Identificação de elementos químicos	SiO ₂ - 61,36% Al ₂ O ₃ - 21,96% Fe ₂ O ₃ - 10,36% K ₂ O - 3,07% MgO - 2,08% Na ₂ O - 0,42% CaO - 0,36%	FRX

*Dados obtidos através de análise realizada pelo laboratório LACER

A telha utilizada possui cerca de 10% de óxido de ferro (Fe₂O₃) em sua composição. O Fe₂O₃ é o responsável pela coloração marrom-alaranjada do material. Inclusive, ao ser incorporado nas misturas dos corpos de prova, esta cor ganha destaque conforme as proporções de pó de telha cerâmica são adicionadas à mistura. Na Figura 16 tem-se um exemplo, onde é possível notar a variação da tonalidade dos CPs. O CP mais à esquerda possui 10% desta pozolana, e na sequência 20 e 30%, conferindo este tom mais terroso ao CP à direita.

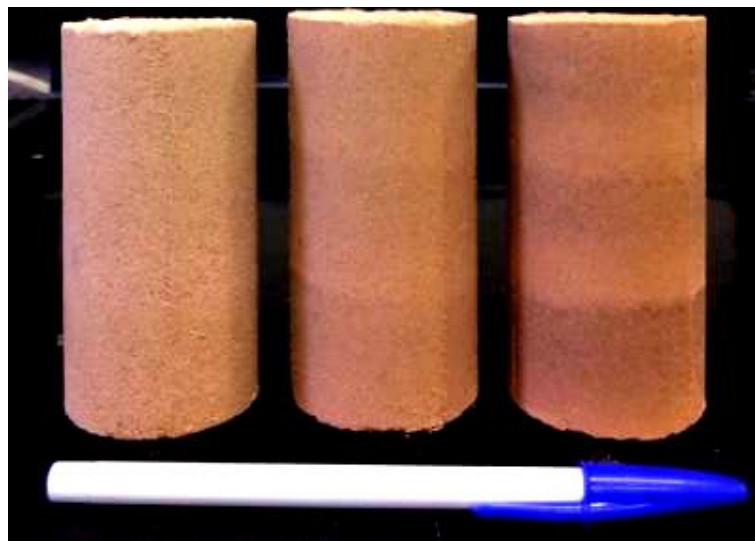


Figura 16 – Corpos de prova

Tabela 7 – Composição química (%) do resíduo cerâmico

Químico	Presente estudo (pó de telha)	Azevedo <i>et al.</i> (2020)	Murillo <i>et al.</i> (2017)	Garcia <i>et al.</i> (2014)			
				RCV1	RCV2	RCV3	RCV4
SiO ₂	61,36	57,30	64,51	60,40	67,10	59,60	66,40
Al ₂ O ₃	21,96	32,70	17,37	21,80	17,20	21,10	18,70
Fe ₂ O ₃	10,36	3,50	4,81	8,17	6,64	8,39	6,07
K ₂ O	3,07	1,40	2,09	1,60	1,31	1,90	1,38
MgO	2,08	-	0,94	0,29	0,30	0,30	0,40
Na ₂ O	0,42	0,78	0,85	0,14	0,10	0,15	0,10
CaO	0,36	0,83	2,08	0,29	0,31	0,24	0,36

A NBR 12653 (ABNT, 2014) e a ASTM C618 (ASTM, 2019) a nível internacional estabelecem, dentre outras exigências, que para um material ser classificado como pozolânico, a quantidade de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ deve ser de no mínimo 70% para materiais das classes N, caso da telha cerâmica. Conforme pode ser observado nas Tabelas 6 e 7, a composição química do resíduo estudado se mostrou compatível com os valores de referência normatizados pela norma nacional (NBR 12653, ABNT, 2014).

Além de Azevedo *et al.* (2020) e Murillo *et al.* (2017), Garcia *et al.* (2014) também empregaram em suas pesquisas resíduos de origem cerâmica. A Tabela 7 apresenta uma comparação dos valores dos componentes químicos desta pesquisa com os valores dos componentes químicos dos materiais cerâmicos para os referidos autores. Garcia *et al.* (2014) trabalha com resíduos de cerâmica vermelha (RCV), provenientes de quatro amostras coletadas no polo cerâmico de Panorama, cidade localizada na região oeste do Estado de São Paulo. Assim, nota-se que o resíduo utilizado nesta pesquisa possui uma composição química semelhante as amostras anteriormente analisadas por outros autores, estando todas de acordo com os valores padrões da norma NBR 12653 (ABNT, 2014). A Figura 17 ilustra micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), de argilas calcinadas, cacos cerâmicos, da cidade de Panorama/SP (GARCIA *et al.*, 2014).

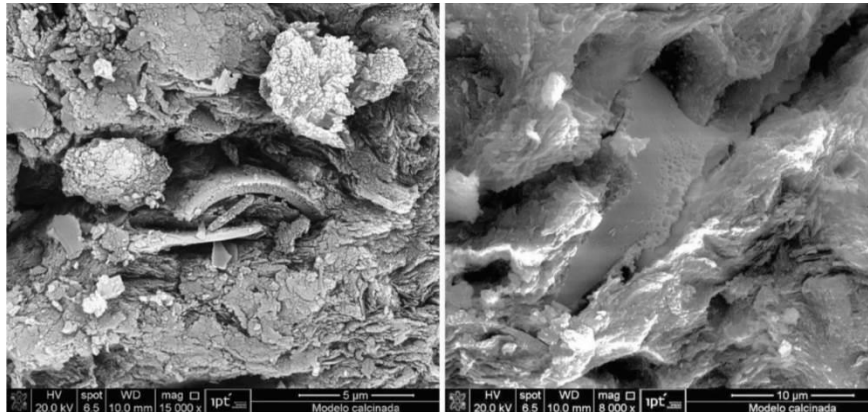


Figura 17 – Microscopia eletrônica de resíduo cerâmico vermelho (GARCIA *et al.*, 2014)

3.1.3 Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada na pesquisa é um resíduo oriundo da produção de gás acetileno da empresa White Martins, com sede na cidade de Sapucaia do Sul (região metropolitana de Porto Alegre). Após a coleta, estoca-se o mesmo. O material, quando coletado, vem úmido e com uma consistência pastosa. Portanto, anteriormente ao seu uso, foi seco em estufa a 60°C durante dois dias. Após seco, o material é destorroado e passado na peneira de malha com abertura de 0,075mm (mesh #200), a fim de que se obtenha um pó uniforme (Figura 18). O material em pó deve ser muito bem armazenado de modo a evitar a exposição ao ar, o que ocasionaria reação com o dióxido de carbono existente na superfície terrestre, que levaria a carbonatação do material (formação de CaCO_3), comprometendo na qualidade deste.



Figura 18 – (a) armazenamento e (b) CC após secagem e peneiramento (SALDANHA, 2014)

A distribuição granulométrica da cal de carbureto é apresentada na Figura 19, na sequência. Empregou-se material já processado (moído), sendo a análise granulométrica da cal obtida por granulometria a laser, ensaio realizado no laboratório LACER, utilizando o equipamento CILAS 1180: *Particle Size Analyser*. Saldanha *et al.* (2018) e Winter (2018) também utilizam em suas pesquisas este resíduo. Na Figura 19 observa-se a comparação das três curvas granulométricas.

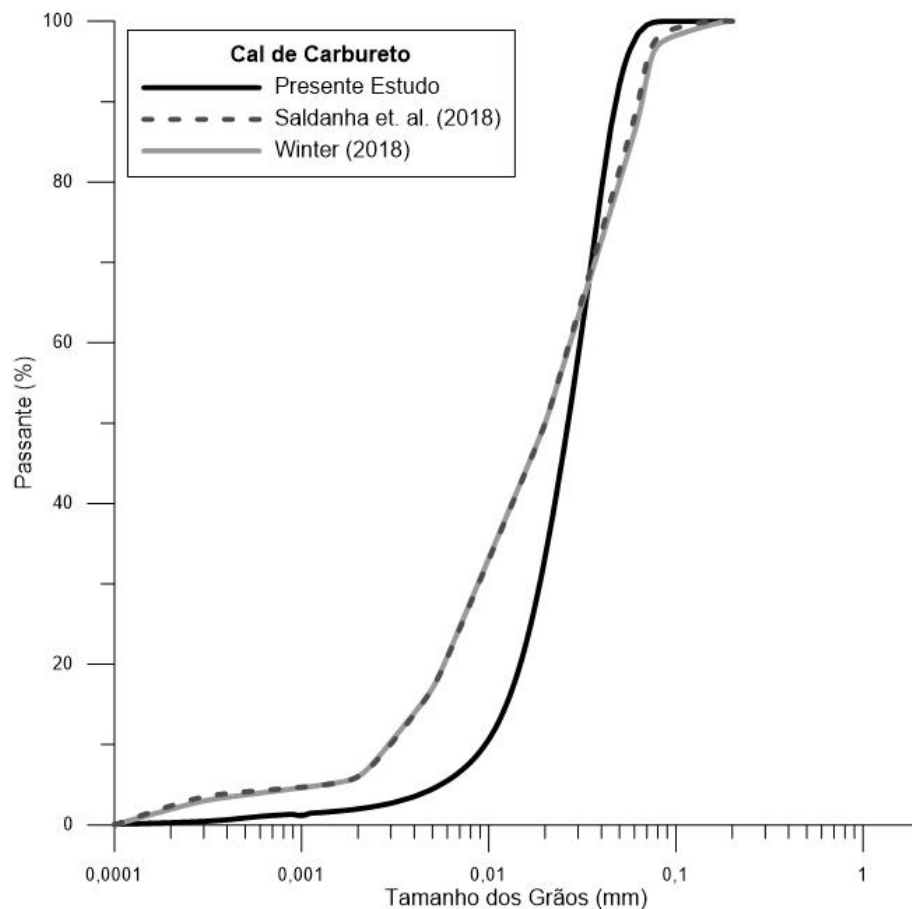


Figura 19 – Curva granulométrica da cal de carbureto

As propriedades da cal de carbureto encontram-se descritas na Tabela 8. As faixas granulométricas estão conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995). O ensaio de massa específica real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2016b).

Tabela 8 – Propriedades da cal de carbureto

Propriedades	Valores	Procedimento
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,19	NBR 6458/2016
Superfície específica (m ² /g)	9,57	BET
% de Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm) % de Silte (0,002 < d < 0,06 mm) % de Argila (d < 0,002 mm)	1,50% 96,50% 2,00%	Granulometria a laser*
Identificação de elementos químicos	CaO - 97,86% SiO ₂ - 0,73% Fe ₂ O ₃ - 0,30% Al ₂ O ₃ - 0,19% Demais - 0,92%	FRX

*Dados obtidos através de análise realizada pelo laboratório LACER

A superfície específica foi analisada pelo método de BET no LACER. O valor encontrado destoa de Saldanha *et al.* (2018). Nesse, o valor é 9,57 m²/g enquanto que para o segundo 22,60 m²/g. A composição química da cal de carbureto foi determinada através do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX). Na Tabela 9, compara-se os valores desta pesquisa, com os de Saldanha *et al.* (2018) e Scheuermann Filho (2019) assim como de outros autores mencionados em suas pesquisas.

Tabela 9 – Composição química (%) da cal de carbureto (adaptado de: SALDANHA *et al.*, 2018; SCHEUERMANN FILHO, 2019)

Químico	Presente estudo*	Saldanha <i>et al.</i> (2018); Scheuermann Filho (2019)	Jiang <i>et al.</i> (2016)	Horpibulsuk <i>et al.</i> (2013)	Vichan e Rachan (2013)
CaO	97,86	74,00	68,99	70,78	83,10
SiO ₂	0,73	3,10	2,84	6,49	5,71
Al ₂ O ₃	0,19	0,46	2,16	2,55	2,61
Fe ₂ O ₃	0,30	0,26	0,15	3,25	0,72
SO ₃	0,33	0,54	0,76	0,66	0,05
SrO	0,59	-	-	-	-

*Dados obtidos através de análise realizada pelo laboratório LACER; análise não levou em consideração o efeito de perda ao fogo

Na Figura 20 é exibida uma foto de microscopia eletrônica da cal de carbureto.

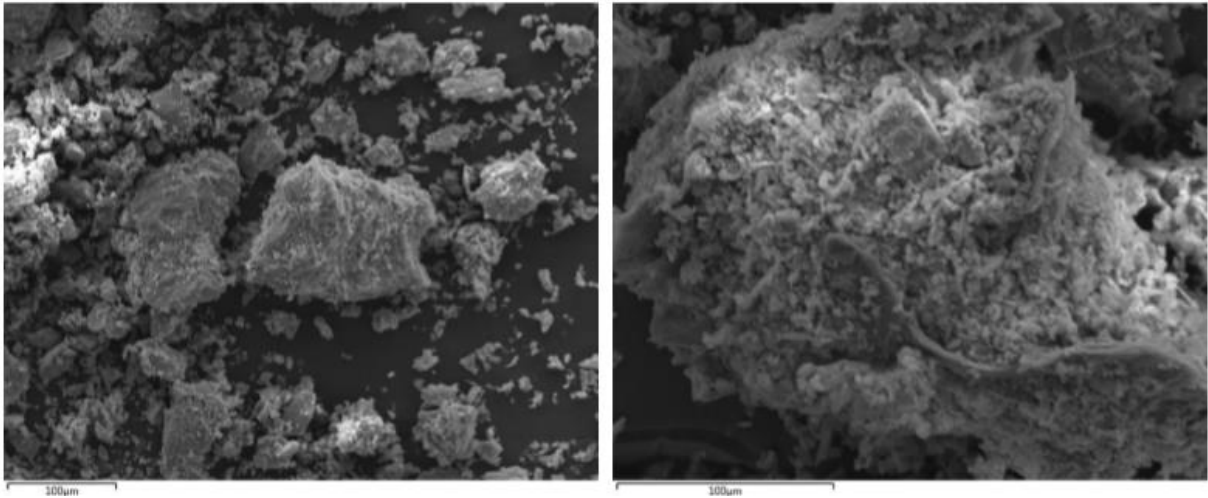


Figura 20 – Microscopia eletrônica da cal de carbureto ampliada (a) 400 e (b) 800 vezes (SCHEUERMANN FILHO, 2019)

3.1.4 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH), ativador alcalino utilizado na pesquisa, também conhecido como soda cáustica, é um hidróxido cáustico usado na indústria, principalmente como base química, na fabricação de papel, tecidos, etc. O hidróxido de sódio é uma base forte, também chamada de composto iônico, e por isso ao ser misturado com água se dissolve na mesma, isto é, teores de NaOH formam juntamente com a água a essência da solução utilizada nesta pesquisa.

O material foi adquirido junto à empresa Alpha Química, com sede na cidade de Cachoeirinha (região metropolitana de Porto Alegre). Na Tabela 10 pode-se observar um resumo das propriedades do material. O formato dele é em escamas. Assim como a cal de carbureto, o NaOH deve ser muito bem armazenado de modo a evitar a exposição ao ar, o que ocasionaria reação com o dióxido de carbono existente na superfície terrestre, que levaria a carbonatação do material (formação de $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$), comprometendo na qualidade deste. A pureza deste material é na ordem de 98%, segundo dados do fabricante. O ensaio densidade real dos grãos da amostra seguiu as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2016b).

Tabela 10 – Propriedades do NaOH

Propriedades	Valores	Procedimento
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,12	NBR 6458/2016
Pureza do material	98 (%)*	

*Dados do fabricante

3.1.5 Água

Para o processo de moldagem dos corpos de prova utilizou-se água destilada. Uma fração dos ensaios (0 molal) utiliza apenas deste recurso, enquanto aos demais CPs dilui-se concentrações de NaOH neste fluido para formarem uma solução. O processo de destilação da água proveniente da rede pública de água de Porto Alegre foi realizado no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais (LEGG).

3.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Nos próximos itens disserta-se quanto aos procedimentos que serão executados para a obtenção dos parâmetros dos seguintes ensaios: Resistência à Compressão Simples, Ultrassom para a medida da Rigidez e Durabilidade por molhagem/secagem e escovação, bem como as normas utilizadas para a sua correta realização.

3.2.1 Resistência à Compressão Simples

Para a verificação do parâmetro q_u , parâmetro de resistência à compressão simples, é verificada a resistência à compressão não confinada da amostra, onde o corpo de prova é submetido a um carregamento que aumenta progressivamente até que ocorra a sua ruptura. A norma brasileira NBR 12025 (ABNT, 2012a), é quem dá as diretrizes para a realização deste ensaio. Para estes ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de aproximadamente 5 cm e altura de 10 cm. Após a ruptura dos corpos de prova, toma-se nota do valor de máxima força aplicada pela prensa. Posteriormente, os dados são tabelados, calculados, processados e analisados.

Para que se faça o teste e posterior ruptura e coleta dos dados de resistência, o LEGG conta com uma prensa mecânica com capacidade máxima de carga igual a 100 kN (Figura 21). Para a realização dos ensaios, células de carga com capacidade de carga de 5 kN, 10 kN e 20 kN foram empregados. Durante o ensaio, colocava-se o corpo de prova na máquina de compressão coincidindo o seu eixo com o centro da placa de carregamento. O topo e base do CP era disposto entre a base da célula de carga (esta era fixada) e o topo da prensa (Figura 21). A velocidade de cisalhamento da prensa é constante, de 1,14mm/min. Vale se ressaltar que no dia anterior ao dia da ruptura, tratando-se ensaios de RSC, todos os corpos de prova ficavam mantidos imersos em água durante 24 horas, para evitar eventuais efeitos de sucção.



Figura 21 – Ensaio RCS: (a) prensa, (b) antes da ruptura e (c) após a ruptura

3.2.2 Rigidez

A medição de rigidez a pequenas deformações (G_0) utilizou-se de um equipamento de ultrassom da marca Proceq modelo *Pundit Lab Plus*, e envolve a medição dos tempos de propagação de ondas de compressão e de cisalhamento, denominados de onda P e onda S, respectivamente. Os primeiros corpos de prova, a serem ensaiados, são de formato cilíndrico e possuem dimensões 5cm de diâmetro por 10cm de altura, os quais posteriormente foram

utilizados para a realização do ensaio de Resistência à Compressão Simples. Também foi verificado o módulo cisalhante dos CPs de durabilidade após a conclusão do décimo segundo e último ciclo de tal ensaio (molhagem/secagem e escovação). Por ser este um ensaio não destrutivo, as medições das velocidades de propagação da onda sempre foram executadas antes da ruptura dos espécimes, em se tratando de CPs de RCS, e após a conclusão do último ciclo quanto ao ensaio de durabilidade, conforme comentado anteriormente. Estes ensaios foram realizados em conformidade com a norma internacional ASTM D2845 (ASTM, 2008).

A realização do ensaio é descrita a seguir:

- I. O equipamento deve ser interligado a um computador. O mesmo deve haver o software *Pundit Link* já instalado;
- II. Calibra-se o equipamento a uma frequência de 54 kHz acoplando os transdutores ao bloco de calibração, aplicando gel de acoplamento nos transdutores e nas duas extremidades do bloco. Com isto, já era possível obter a primeira medida em cada CP, a onda P (compressão). A leitura da onda P dava-se diretamente no instrumento;
- III. Troca-se os primeiros transdutores, pelos transdutores de ondas S (cisalhamento) “*shear*”. Os mesmos devem ser novamente calibrados, porém, desta vez a uma frequência de 250 kHz, aplicando o *shear gel*;
- IV. Além de haver necessidade da utilização do gel no bloco de calibração, para a realização de cada leitura, tanto de onda P quanto de onda S, a interface entre o corpo de prova e o transdutor era preenchida com um gel específico que auxiliava na transmissão e leitura do sinal;
- V. Estando o equipamento calibrado, inicia-se o *Pundit Link* no computador (Figura 22). As leituras da segunda onda, a onda S, ou t_2 (cisalhante) eram realizadas na interface computacional do próprio software.



Figura 22 – Ensaio PUNDIT: equipamento

A Figura 23 representa o resultado típico do ensaio de rigidez. Notam-se os valores dos tempos de propagação das ondas de compressão (t_1) e da onda cisalhante (t_2). O módulo cisalhante a pequenas deformações do material (G_0) é obtido da multiplicação entre a massa específica do material pelo quadrado da velocidade da onda cisalhante. A segunda foi determinada a partir da relação entre o tempo de propagação da onda, t_2 , e a altura média de cada corpo de prova.

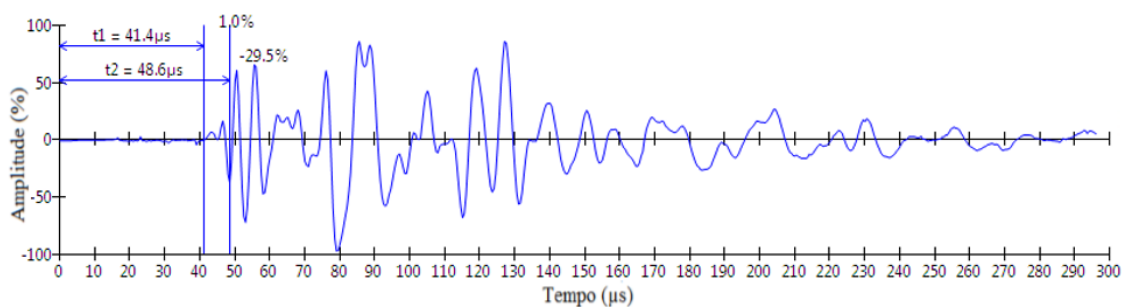


Figura 23 – Ensaio PUNDIT: software

3.2.3 Durabilidade

O ensaio de durabilidade tem a premissa de avaliar a deterioração do material através de ciclos de molhagem/secagem e escovação, sendo a soma destes processos responsáveis pela

perda de massa do espécime. Este ensaio consiste na moldagem de corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 10 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura. Para os ensaios de durabilidade foram utilizados os procedimentos descritos na norma ASTM D559 (ASTM, 2015), que rege a nível internacional os ensaios de durabilidade por molhagem/secagem e escovação. Após o período de cura os corpos de prova foram submetidos a doze ciclos de molhagem/secagem e escovação, obedecendo a seguinte ordem:

- I. deixa-se o CP em imersão em água durante 5 horas;
- II. coloca-se o CP em uma estufa a $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas;
- III. retira-se o corpo de prova da estufa e mede-se sua massa;
- IV. ocorre a escovação das faces e laterais do corpo de prova com uma escova de aço e com força aproximada de 13-15N por 28 vezes (20 nas laterais e 4 na base e topo);
- V. verifica-se novamente a massa do CP, comparando esta medida com a massa inicial do ciclo e assim é obtida a perda de massa que ocorreu durante o ciclo (PM).
- VI. repete-se o processo todo até que o décimo segundo ciclo complete-se.

O parâmetro que se obtém deste ensaio é a Perda de Massa Acumulada (PMA), isto é, após completados os doze ciclos por molhagem/secagem e escovação calculava-se o quanto de material se perdeu neste processo. Os espécimes mais duráveis são aqueles que proporcionam as menores perdas de massa, logo, apresentam uma menor deterioração, diminuição de suas dimensões, volume, etc., ao concluir-se o ensaio. A Figura 24 ilustra as condições dos corpos de prova após a realização dos ciclos. Na Figura 24a compara-se os espécimes onde ocorreram as maiores e menores perdas de massa, respectivamente. Comparando-os é notória a diferença de suas dimensões.



Figura 24 – Ensaio de durabilidade após 12 ciclos de molhagem/secagem e escovação: (a) CPs com maior e menor PMA e (b) CPs com $\gamma_d=17\text{kN/m}$

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido busca contribuir para o avanço do entendimento do comportamento físico-químico de uma gama de misturas, contendo como base a areia de Osório, adicionadas de pó de telha cerâmica, cal de carbureto e hidróxido de sódio (NaOH).

3.3.1 Definição de variáveis iniciais

Quanto a determinação das variáveis iniciais, adotou-se trabalhar com três teores de pozolana 10, 20 e 30% e três teores de cal de carbureto 4, 7, 10% para o mesmo tipo de solo (areia de Osório). Isto significa que as variáveis acima citadas são variáveis fixas e compostas por três níveis cada, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Definição de variáveis iniciais

Fator	Nível
Teor de pó de telha (pozolana)	10%
	20%
	30%
Teor de cal de carbureto (CC)	4%
	7%
	10%

As quantidades de pozolana foram definidas segundo pesquisas baseadas sobre utilização de distintas pozolanas na área de estabilização de solos em conjunto com algum ativador alcalino, casos de NCHRP (1976), Consoli *et al.*, (2018a), Winter (2018), Scheuermann Filho (2019). A quantidade de pozolana introduzida na mistura foi calculada em relação à massa seca do solo, neste caso a areia de Osório, chamado método de substituição.

As proporções de cal são estimadas com o intuito de proporcionar um ambiente favorável para o desenvolvimento das reações pozolânicas, e conseqüentemente, a obtenção de grandes resistências. A fim de determinar as quantidades de cal necessárias para modificar as características do solo e introduzir resistência e durabilidade adequadas ao uso, várias metodologias foram estabelecidas nos últimos 50 anos, Hilt e Davidson 1960; Eades e Grim 1966; Rogers *et al.* 1997 (CONSOLI *et al.*, 2009). A quantidade mínima de cal necessária para a estabilização total, com base no ICL modificado Rogers *et al.* (1997, apud CONSOLI *et al.* 2009, SALDANHA, 2014), é estabelecida com base na interpretação dos testes de pH realizados no solo com adição de diferentes teores de cal. As duas curvas mostrando a variação do pH devido à adição de cal, conforme estudos mencionados acima, são apresentadas na Figura 25. Analisando a Figura 25, pode-se observar que no trabalho de Consoli *et al.* (2009) 3% foi a quantidade mínima de cal para estabilização do solo, enquanto que no de Saldanha (2014) foi 4%. Também, segundo Thomé (1994) o teor ótimo de cal é aquele que eleva o pH a valores $\geq 12,4$. Com isto, neste trabalho definiu-se por trabalhar com os teores de 4%, 7% e 10% de cal de carbureto. Os percentuais de cal são estabelecidos em relação à massa seca da pozolana, isto é, a telha cerâmica neste contexto.

O método proposto por Eades e Grim (1966) é outro empregado para tal finalidade. Ele serviu de base à norma norte-americana ASTM D6276 (ASTM, 1999), procedimento igualmente usado na norma nacional DNIT 419.

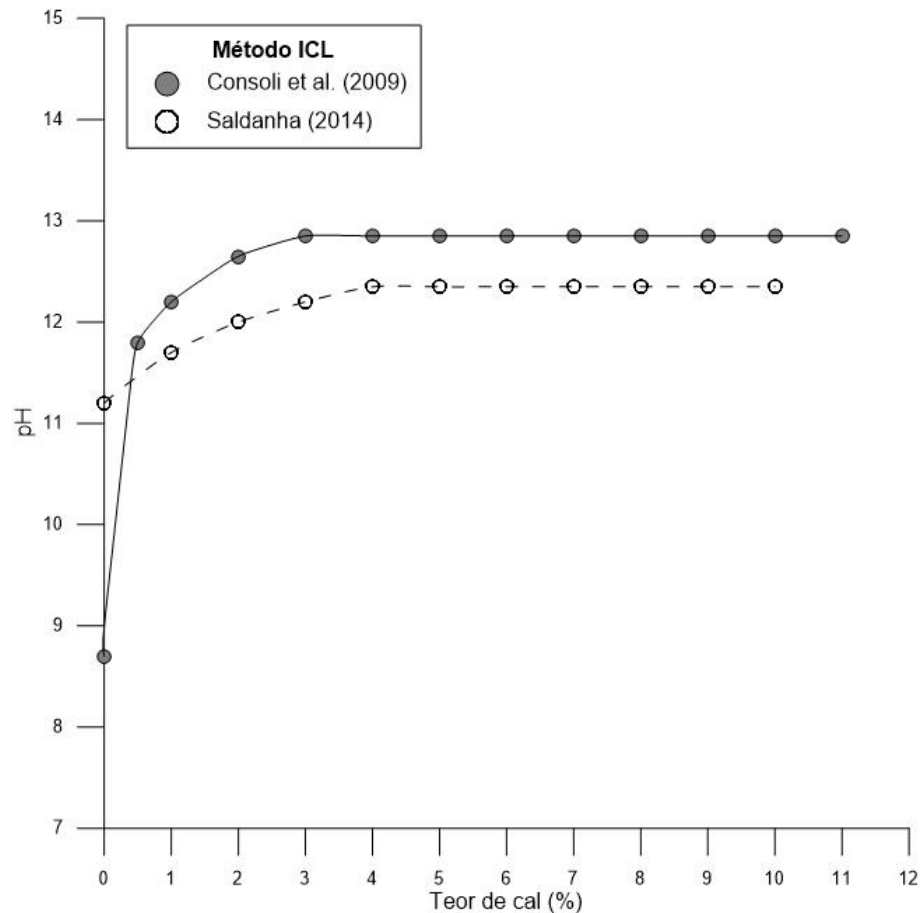


Figura 25 – Resultados do teste ICL (adaptado de: CONSOLI *et al.*, 2009; SALDANHA, 2014)

3.3.2 Ensaio de compactação

A fim de determinar o peso específico aparente seco (γ_d) e o teor de umidade das misturas (w), foram executados quatro ensaios de compactação Proctor Modificado (ensaio de compactação com energia modificada) somados de mais quatro ensaios Proctor Normal (ensaio de compactação com energia normal), seguindo os procedimentos recomendados pelas normas brasileiras NBR 6457 (ABNT, 2016a), NBR 7182 (ABNT, 2016c) e a NBR 9895 (ABNT, 2017). Optou-se por trabalhar com dois teores de pozolana (10 e 30% de pó de telha), dois teores de cal de carbureto (4 e 10%) e dois teores de concentração molal (0 e 3 mol/kg), detalhado na Tabela 12. Os teores de concentração molal escolhidos são pertinentes as misturas apenas com água ($\text{NaOH}=0$) e aquelas com adição de hidróxido de sódio na sua

concentração ótima (NaOH= 3 molal. Ver seção 3.3.3). O resultado do ensaio das oito curvas de compactação para as misturas estudadas é exibido na Figura 26.

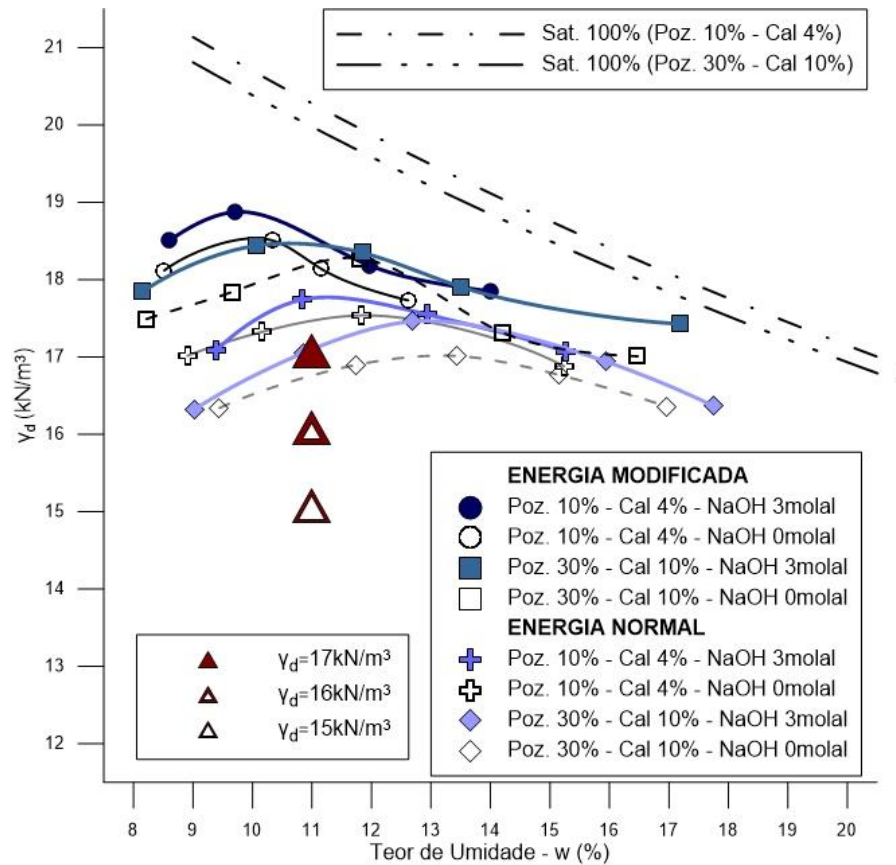


Figura 26 – Ensaio de compactação para areia de Osório, telha, CC e NaOH

A Tabela 12 mostra o resultado das umidades ótimas (w -ótima) e massa específica aparente seca máximas (γ_d -max) das quatro misturas para ambos ensaios Proctor.

Tabela 12 – Ensaio Proctor Modificado e Normal

#	ID	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Proctor Modif.		Proctor Normal	
					γ_d -max (kN/m ³)	w -ótima (%)	γ_d -max (kN/m ³)	w -ótima (%)
1	OS-10-4-3	10	4	3	18,87	9,71	17,74	10,83
2	OS-10-4-0	10	4	0	18,50	10,35	17,54	11,84
3	OS-30-10-3	30	10	3	18,44	10,06	17,46	12,70
4	OS-30-10-0	30	10	0	18,27	11,81	17,01	13,44

Após realização do ensaio, o valor médio do teor de umidade ótimo encontrado foi de aproximadamente 11%, logo, definiu-se como 11% o teor de umidade (w) constante de moldagem de todas as misturas. Fixou-se valores quanto ao peso específico aparente seco (γ_d), com o intuito de verificar a influência das densidade (compactação dos CPs) para os materiais trabalhados, variando entre 17,0 kN/m³, 16,0 kN/m³ e 15,0 kN/m³. Na Figura 26 percebe-se que a faixa de utilização do γ_d poderia ser mais elevada, sobretudo em relação as curvas Proctor modificado, contudo, devido às limitações do equipamento do laboratório LEGG, decidiu-se pelos teores citados. Ainda referente a Figura 26, nota-se que ao comparar uma mesma mistura, a curva que contém o hidróxido de sódio (NaOH) apresenta, em geral, valores de peso específico (γ_d) superiores ao seu par sem tal material. Por exemplo as misturas 3 e 4 que contam com 30% de pó de telha e 10% de cal de carbureto, em Proctor Normal, a primeira conta com um $\gamma_{dmax}=17,46$ kN/m³ frente aos 17,01 kN/m³ da mistura 4.

3.3.3 Definição dos teores de concentração molal

Havendo alinhado as variáveis (teores) de pozolana (pó de telha), cal de carbureto, peso específico aparente seco (γ_d) e teor de umidade (w), notou-se a necessidade de determinar a influência da concentração molal nas misturas. Entende-se por molalidade (ou concentração molal) a relação do número de moles do soluto (NaOH) por quilo do solvente, sendo este último a água.

Definiu-se por um conjunto de três misturas, onde todos os níveis das variáveis já definidas estão presentes. O artifício (ensaio) escolhido para realizar tais testes foi o ensaio de compressão simples, onde triplicatas de corpos de prova de tamanho 5 cm diâmetro x 10 cm altura foram moldados (Figura 27). O período de cura foi de sete dias para cada uma das concentrações molal a seguir: 0, 1, 2, 3, 4 e 6 molal. Esta etapa é compreendida como ensaios piloto no presente trabalho, onde 54 corpos de prova foram moldados (Figura 28). A disposição das informações destes ensaios piloto está presente na Tabela 13.



Figura 27 – Moldagem de CP

Tabela 13 – Teores de concentração molal de NaOH

#	ID	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	Tempo de cura (dias)	NaOH (molal)
1	OS-15-10-4	15	10	4	7	0, 1, 2, 3, 4, 6
2	OS-16-20-7	16	20	7	7	0, 1, 2, 3, 4, 6
3	OS-17-30-10	17	30	10	7	0, 1, 2, 3, 4, 6

Com os primeiros ensaios de compressão simples realizados, foi possível graficar três curvas cujos eixos de abcissas e ordenadas são respectivamente, molalidade e a RCS. Pretende-se a partir destes resultados estabelecer a concentração molal que melhor se adequa para o tipo de solo, no caso a areia de Osório, e os demais componentes da mistura desta pesquisa. Isto é, quer-se descobrir qual a influência desta variável e a resposta quanto à resistência à medida que a primeira vai se alternando. Os resultados dos ensaios descritos na Tabela 13 são exibidos na Figura 28.

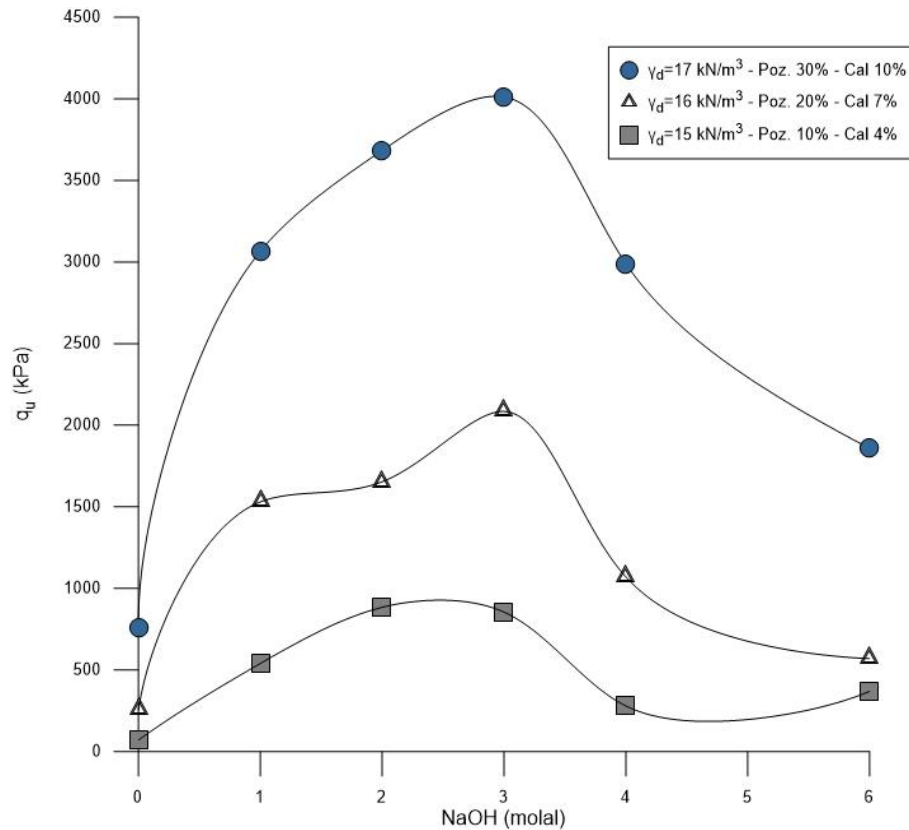


Figura 28 – RCS versus concentrações molar de NaOH para 7 dias de cura (ensaios piloto)

Observa-se a partir da imagem acima que conforme a molalidade sai do seu ponto nulo (sem presença do ativador alcalino e onde estão os piores resultados de q_u) as resistências aumentam até que chegam a um pico (três molal) e após este voltam a decrescer. Com isto, a ‘molalidade ótima’ e utilizada nesta pesquisa, onde ocorreram os melhores resultados quanto ao comportamento mecânico da mistura, foi de três molal.

3.3.4 Pesagem, mistura, moldagem e cura dos corpos de prova

Após a obtenção, preparação (secagem, peneiramento, etc.) e coletas e análises de amostras iniciais (ensaios de caracterização) de todos os materiais, o processo para se avaliar o comportamento e o melhor ajuste entre estes materiais passa pela execução de uma série de testes/ensaios em laboratório, alguns deles propostos neste trabalho: avaliação do comportamento em termos de resistência [RCS], rigidez e durabilidade. Desta forma, o primeiro passo para realização dos ensaios foi a pesagem. Pesou-se as quantidades, pré-

definidas, de todos os materiais que compõe determinada combinação. O segundo passo consistiu na mistura de todos estes materiais, até que a mistura ficasse homogênea.

O terceiro passo está relacionado à moldagem dos corpos de prova (CPs), como visto nas Figuras 16 e 21. Para tanto, a mistura era dividida em frações iguais que correspondiam ao número de camadas necessárias ao tipo de corpo de prova empregado. Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram moldados no LEGG com o auxílio de uma prensa hidráulica. Após a conclusão de todas as camadas que compõe a camada daquele corpo de prova, o mesmo era extrudado, pesado, medido, hermeticamente fechado com emprego de sacos plásticos e levado até o local de cura. Os períodos de cura foram de sete e vinte e oito dias, definidos com base do tempo necessário para que aconteçam as reações químicas dessas misturas. Após este quarto e último passo, realiza-se o ensaio propriamente dito.

A temperatura de cura dos corpos de prova é a última das variáveis desta pesquisa. Ela não se altera no presente trabalho, ou seja, é constante. A temperatura é uma variável fundamental para o desenvolvimento das reações pozolânicas e dos geopolímeros, como visto anteriormente. Os corpos de prova foram curados todos a uma temperatura única, chamada de ambiente ($\sim 23^{\circ}\text{C}$), armazenados numa câmara com pouca movimentação.

3.3.5 Definição das dosagens

Com o intuito de atender aos objetivos propostos neste trabalho, uma matriz de misturas envolvendo as 5 variáveis (peso específico aparente seco (γ_a), teor de pó de telha cerâmica, teor de cal de carbureto, concentração molal (nula e ótima) e tempo de cura) foi desenvolvida. A execução do projeto fatorial fracionado tem como premissa o cruzamento das variáveis entre si, desta forma, testou-se uma quantidade concebível de misturas aos quais chegou-se aos resultados que serão explanados posteriormente. Nesse sentido, a Tabela 14 apresenta os fatores e níveis relativos a estes experimentos, que estão divididos em (a) ensaios de compressão simples/ rigidez e (b) durabilidade.

Tabela 14 – Fatores e níveis utilizados nos ensaios de RCS, G0 e durabilidade

	Etapa	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	γ_a (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	Qtd de CPs	G ₀	
Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)	1	Ensaio piloto	0,1,2,3,4,6	7			18 (54)	-	
	2	Projeto experimental	0	7	15 16 17	10 20 30	4 7 10	120	120
			3						
			0	28					
			3						
	3	Complementar	2 e 4	7			111	-	
Total (q_u) -->							249	120	
Ensaio de Durabilidade de	A	Projeto experimental	0	7	15	10	7	20	20
	B		3		16	20			
					17	30			
Total (PMA) -->							20	20	

3.3.5.1 Fatores utilizados nos ensaios de RCS e Rigidez

Na Tabela 15 são exibidos todos os tratamentos referentes aos ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e rigidez (G₀), composto por um conjunto de dosagens dos seguintes materiais: areia de Osório, pó de telha cerâmica, cal de carbureto para as molalidades de 0 e 3 aos 7 e 28 dias de cura (matriz de ensaios). Para todos os traços mencionados foram executados corpos de prova em triplicata, totalizando 120 CPs, utilizados em ambos ensaios.

Conforme tratado no item 3.3.3 e apresentado na Figura 28 (ensaios piloto – etapa 1), os maiores ganhos no comportamento mecânico da mistura se deram ao empregar o ativador alcalino na proporção de 3 mol/kg. Com o intuito de aprofundar o entendimento do assunto quanto a influência da concentração molal nas misturas frente à RCS, outros dois teores de NaOH também foram analisados de uma maneira mais abrangente, sendo estes os teores de 2 e 4 molal, etapa esta compreendida como complementar no presente estudo.

Um somatório das quantidades de CPs realizados no ensaio de RCS, compreendidos nas etapas de ensaio piloto, projeto experimental e complementar leva-se a soma de 249 corpos de prova, sendo 120 destes provenientes da etapa 2 (projeto experimental) os quais tiveram

leituras quanto ao módulo cisalhante inicial (G_0), parâmetro obtido por meio do ensaio de rigidez. As dosagens referentes aos ensaios piloto e projeto complementar encontram-se no Anexo A do presente trabalho, não sendo destacadas neste tópico por não estarem contempladas no projeto experimental, mas sim servirem como parâmetros de comparação. Destaca-se ainda que: alguns CPs da etapa 1 (ensaios piloto) tiveram seus resultados contabilizados (reutilizados) nas demais etapas; as etapas 1 (ensaios piloto) e 3 (projeto complementar) não tiveram leituras de G_0 mensuradas por não fazer parte do escopo deste trabalho.

Tabela 15 – Tratamentos referentes aos ensaios de resistência e rigidez para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

Tratamento	γ_d (kN/m ³)	% de telha	% de cal	Concent. Molal	Cura (dias)
1	15,0	10	4	0-3	7-28
2	15,0	30	4	0-3	7-28
3	15,0	30	10	0-3	7-28
4	16,0	10	4	0-3	7-28
5	16,0	20	7	0-3	7-28
6	16,0	30	4	0-3	7-28
7	16,0	30	10	0-3	7-28
8	17,0	10	4	0-3	7-28
9	17,0	30	4	0-3	7-28
10	17,0	30	10	0-3	7-28

3.3.5.2 Fatores utilizados nos ensaios de durabilidade

Para os ensaios de durabilidade por molhagem/secagem e escovação foram utilizados os nove tratamentos expostos na Tabela 16, abordando alguns tratamentos diferentes do projeto fatorial delineado anteriormente (Tabela 15). Nestes ensaios, assim como nos ensaios de RCS, as mesmas concentrações molal foram adotadas: 0 e 3, sem presença de NaOH e molalidade ótima, respectivamente. Para ambas concentrações, a cura dos CPs (etapa prévia ao início do ensaio propriamente dito) se dá em 7 dias. Não foram executadas replicações neste ensaio, à exceção dos tratamentos 6 (0 molal) e 9 (3 molal), sendo estes escolhidos aleatoriamente para realização de duplicatas, com a finalidade de verificar a precisão quanto a realização do ensaio.

Tabela 16 – Tratamentos relativos aos ensaios de durabilidade para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

Tratamento	γ_d (kN/m ³)	% de telha	% de cal	Concent. Molal	Cura (dias)
1	15,0	10	7	0-3	7
2	15,0	20	7	0-3	7
3	15,0	30	7	0-3	7
4	16,0	10	7	0-3	7
5	16,0	20	7	0-3	7
6	16,0	30	7	0-3	7
7	17,0	10	7	0-3	7
8	17,0	20	7	0-3	7
9	17,0	30	7	0-3	7

4 RESULTADOS

Neste capítulo expõe-se os resultados obtidos a partir do programa experimental, em decorrência das misturas de areia de Osório, pó de telha moída, cal de carbureto e hidróxido de sódio (NaOH) para os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), Módulo Cisalhante Inicial (G_0) e Durabilidade por Molhagem/Secagem e Escovação.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Neste tópico serão discutidos os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para um conjunto de corpos de prova a base de areia de Osório adicionadas de pó de telha cerâmica e estabilizado com cal de carbureto e uma solução de hidróxido de sódio, curados a uma temperatura constante de 23°C, cujos períodos de cura variaram entre 7 e 28 dias. Os dados relativos ao ensaio de RCS estão compreendidos no Anexo A do presente trabalho.

Visando compreender a influência das variáveis controláveis na mistura em questão, inicialmente os resultados dos ensaios de compressão simples serão exibidos em função A) da presença de NaOH nas misturas (0 e 3 molal); do tempo de cura: 7 e 28 dias; B) do peso específico aparente seco (γ_d); dos teores dos precursores: pó de telha cerâmica e cal de carbureto. Na sequência, relaciona-se q_u com o parâmetro η/B_{IV} (razão entre a porosidade e teor de agentes cimentantes). Por fim, serão avaliados através de um software de análise estatística quais das variáveis tem maior influência sobre os resultados obtidos, combinando todos os fatores e níveis estudados para cada variável controlável.

4.1.1 Resistência em função da concentração molal e do tempo de cura

O gráfico representado pela Figura 29 apresenta a variação da resistência à compressão simples e a relaciona com os três níveis de γ_d , considerando as proporções 10-4%, 20-7% e 30-10% de pozolana e cal de carbureto para as molalidades 0 e 3 mol/kg aos 7 e 28 dias de cura. Desta forma, quatro faixas de valores são apresentadas, levando em consideração a união dos fatores concentração molal e tempo de cura. São elas I) 0 molal aos 7 dias de cura;

II) 0 molal aos 28 dias de cura; III) 3 molal aos 7 dias de cura; IV) 3 molal aos 28 dias de cura. Os resultados estão estruturados em termos de réplicas (triplicatas) para cada dosagem, tendo como critério de aceitação o valor de 10% sobre os resultados (respostas) dos ensaios de resistência à compressão.

Deste modo, a partir destas análises, pode-se chegar a uma quantidade de ressalvas quanto aos resultados da Figura 29. A partir destas, observa-se que a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente ao aumento do peso específico aparente seco da mistura. Do mesmo modo, o tempo de cura mostra-se outro fator relevante, onde CPs curados por 28 dias apresentam ganhos de resistência maiores frente aos de 7 dias de cura, esta condição pode ser vista com maior detalhamento nos gráficos (c) e (d) da presente imagem. Nota-se também que as resistências são mais elevadas conforme o hidróxido de sódio é incorporado à mistura ($q_{u-0\text{molal}} < q_{u-3\text{molal}}$). Daassi-Gli (2020) igualmente emprega o hidróxido de sódio em sua pesquisa. Ao fazer comparações entre seu trabalho e o de Winter (2018), o autor chega a conclusões semelhantes sobre o uso do hidróxido de sódio como ativador alcalino. Os gráficos (a) e (b) da Figura 29 ilustram esta afirmação. Percebem-se resistências superiores àqueles onde o hidróxido de sódio está presente (b) frente aos seus pares (a) ativados apenas com H₂O.

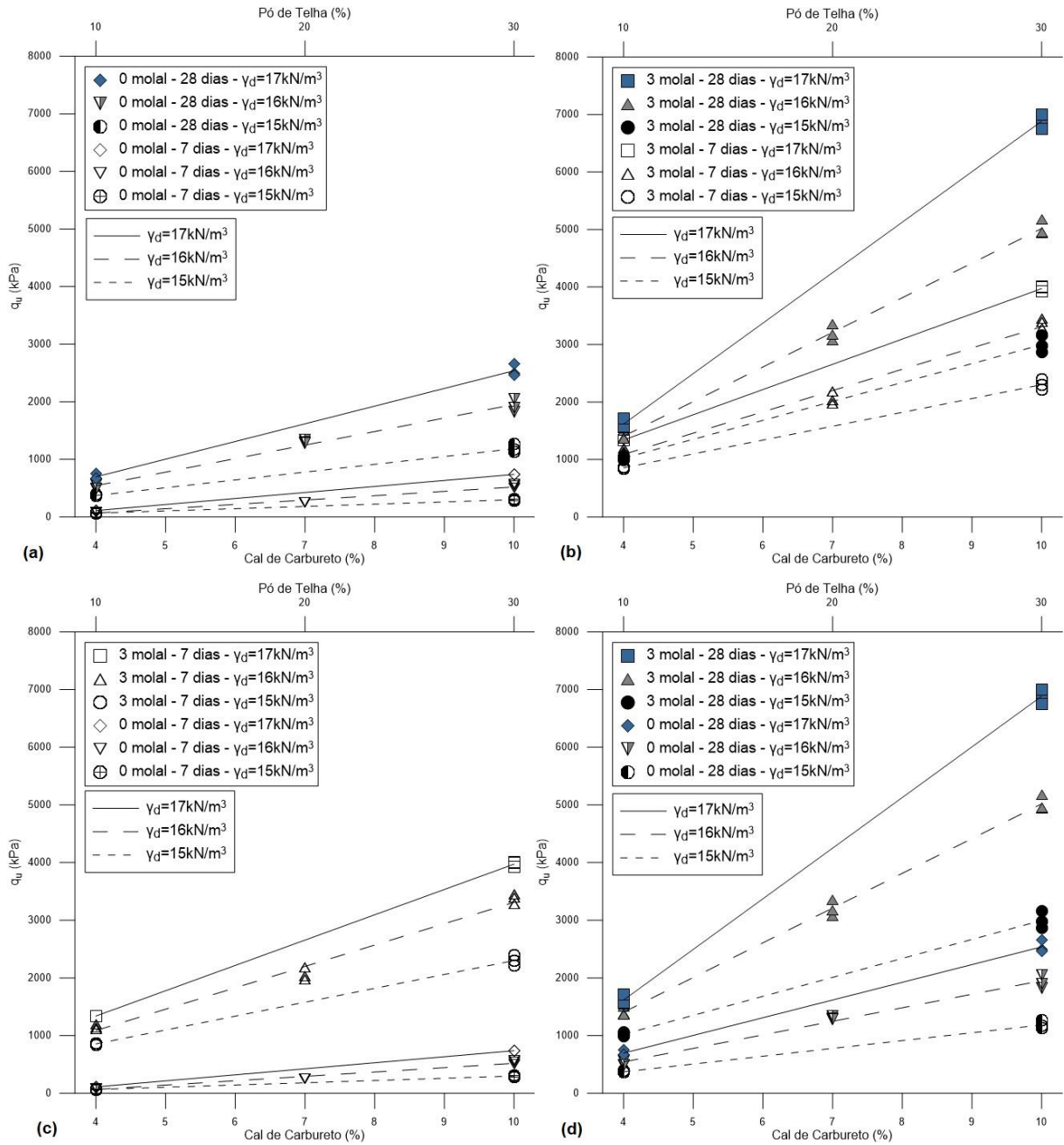


Figura 29 – Respostas a q_u para (a) 0 molal, (b) 3 molal, (c) 7 dias de cura e (d) 28 dias de cura

4.1.2 Resistência em função do peso específico seco (γ_d) e dos teores de pozolana e cal de carbureto

De forma a complementar o entendimento sobre o assunto, optou-se pelo uso do gráfico de barras representados pela Figuras 30 e 31, relacionando os resultados do ensaio de RCS com os três níveis de compactação (γ_d) considerando novamente as proporções 10-4%, 20-7% e 30-10% de pozolana e cal de carbureto para as molalidades 0 e 3 mol/kg aos 7 e 28 dias de cura. Agrupando estas combinações, tem-se: I) 0 molal aos 7 dias de cura; II) 0 molal aos 28 dias de cura; III) 3 molal aos 7 dias de cura; IV) 3 molal aos 28 dias de cura. Os resultados são indicados em termos da média da triplicata de cada dosagem.

Na Figura 30 abaixo, verifica-se que a resistência à compressão simples aumenta conforme o grau de compactação cresce (15-17 Kn/m³). Nota-se que ao elevar os valores do peso específico aparente seco ocorre, por consequência, uma maior aproximação das partículas, e consequente redução do índice de vazios. Com isto, como a areia de Osório é uniforme, e com pouca presença de finos, os ligantes, neste caso a cal e o pó de telha, contribuem para o preenchimento dos vazios da areia, e consequentemente, aumentar o número de contatos entre as partículas (maior contato entre grãos). Do mesmo modo, observa-se que as resistências são mais elevadas conforme o hidróxido de sódio é adicionado à mistura ($q_{u-0\text{molal}} < q_{u-3\text{molal}}$). O tempo de cura mostra-se outro fator relevante, onde CPs curados aos 28 dias apresentam ganhos de resistência maiores frente aos 7 dias de cura.

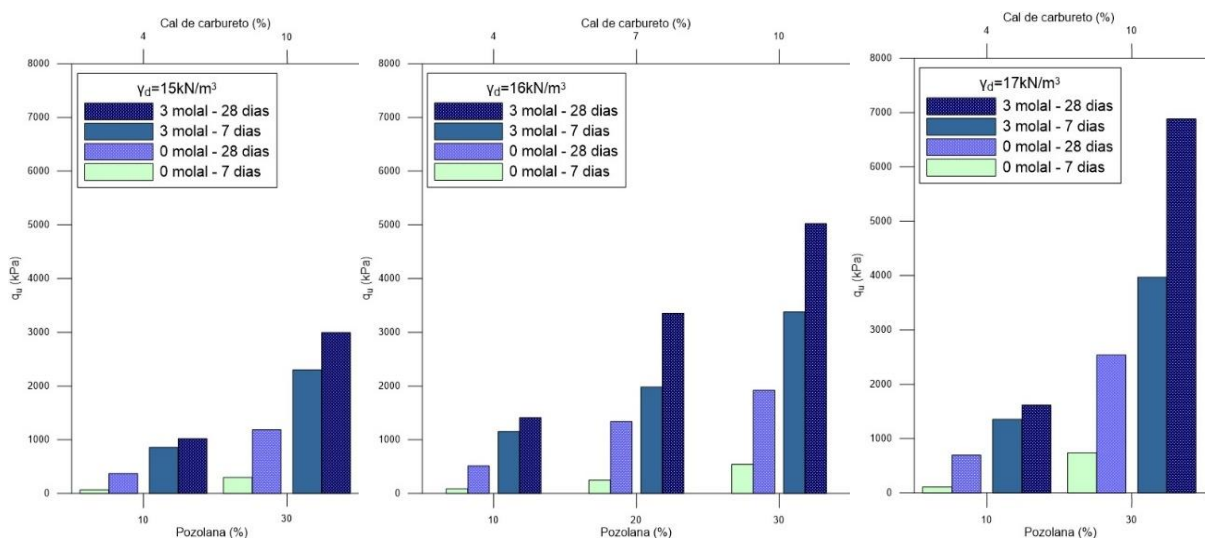


Figura 30 – Relação entre q_u e poz.;CC para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) $\gamma_d=15\text{kN/m}^3$, (b) $\gamma_d=16\text{kN/m}$ e (c) $\gamma_d=17\text{kN/m}$

Outra leitura é feita colocando as proporções 10-4%, 20-7% e 30-10% de pozolana e cal de carbureto em evidência. Os resultados da Figura 31 são apresentados em relação ao peso específico aparente seco das misturas. Deste modo, observa-se que quanto maior o percentual de finos dentro da mistura, mais elevados serão os ganhos de resistências. Observando ainda a parcela fina (cal + pó de telha passantes na peneira #200), repara-se na Figura 31a que os ganhos de resistência não foram muito expressivos ainda que o peso específico variasse. Isto mostra a importância e a influência dos teores de cal de carbureto e do pó de telha cerâmica na mistura. Já na Figura 31c, a resistência à compressão simples aumenta consideravelmente à medida que grau de compactação, tempo de cura e NaOH crescem.

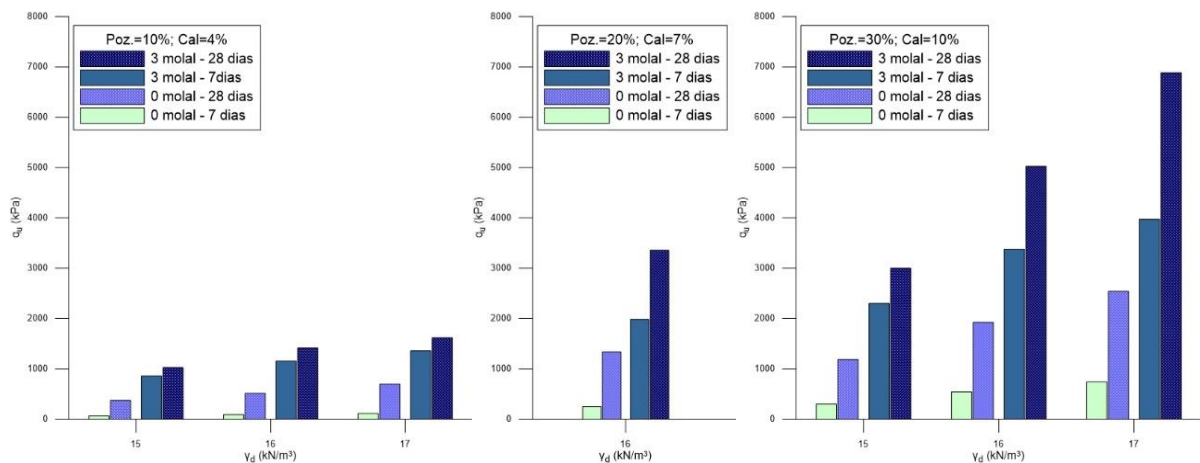


Figura 31 – Relação entre q_u e γ_d para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) poz.=10%; cal=4%, (b) poz.=20%; cal=7% e (c) poz.=30%; cal=10%

4.1.3 Resistência em função do parâmetro η/B_{IV}

Assim como demonstrado anteriormente, os resultados do programa experimental serão representados em 4 faixas, onde pretende-se avaliar as implicações das variáveis concentração molal (0 e 3) e tempo de cura (7 e 28 dias). Com isto, os resultados de resistência à compressão simples são correlacionados com o parâmetro ajustado $\eta/B_{IV}^{0,28}$.

O uso do índice de porosidade/ligante para normalizar a resistência de solos tratados inicialmente com cimento Portland (denominado ligante ou C_{IV} – teor volumétrico de cimento) foi demonstrado por Consoli *et al.* (2007 e 2016). Num segundo momento, a fim de

analisar o efeito de outros materiais que também conferissem esta característica cimentante às misturas, diferentes tipos de pozolanas e cal foram incorporadas nas misturas em substituição ao cimento Portland. Deste modo, Consoli *et al.* (2018a e 2018b) estabeleceram um novo parâmetro que relaciona a razão entre porosidade (η) e o índice B_{IV} , sendo este definido como a soma do teor volumétrico de agentes cimentos (B de Binder, em inglês). No caso do presente estudo, a composição do teor volumétrico dos agentes cimentantes (B_{IV}) se dá pela soma dos teores de cal de carbureto e do pó de telha cerâmica.

Ainda, o índice B_{IV} , teor volumétrico dos agentes cimentantes, é elevado ao expoente de 0,28 como valor de ajuste da correlação, conforme demonstrado por Consoli *et al.* (2007, 2016, 2018a e 2018b) já que as taxas de variação da resistência com porosidade (η) e o inverso do conteúdo volumétrico do ligante ($1/B_{IV}$) geralmente não são as mesmas. Portanto, a aplicação de uma potência a B_{IV} é necessária, para que as taxas de η e $1/B_{IV}$ sejam compatíveis.

Logo, a Figura 32 indica as quatro curvas que expõem a relação entre a RCS e o parâmetro ajustado $\eta/B_{IV}^{0,28}$. Nota-se que quanto menor o valor obtido com o parâmetro, maior é a resistência à compressão simples, o que já era de se esperar. Dado que, conforme os teores de finos (pó de telha e cal) são adicionados à mistura, os espaços, ou poros, entre os grãos de areia são preenchidos com estes materiais, resultando em um maior número de sólidos, e por consequência menores índices de vazios, variável esta que está relacionada à porosidade do material.

Os expoentes externos para ambas curvas foram normalizados no valor de -4,40, sendo este o melhor ajuste para tais curvas, o que permite assim uma relação mais direta em relação ao ganho de resistência. Comparando os resultados das quatro curvas $q_u \times \eta/B_{IV}^{0,28}$ da Figura 32, constata-se que: I) o tempo de cura mostrou-se uma variável primordial neste estudo. Aos 28 dias de cura as reações químicas tiveram mais tempo para ocorrer, adquirindo assim resistências superiores em comparação aos sete dias de cura; II) ao incorporar o hidróxido de sódio na mistura, aos 7 dias de cura, o ganho de resistência foi na ordem de 5,6 vezes frente a mistura sem tal material (1,06 a 5,93); III) aos 28 dias de cura observa-se a mesma tendência das amostras com ativação alcalina, já que seus valores são mais relevantes do que a curva onde a presença de NaOH é inexistente (3,9 a 9,27), todavia, a proporção de aumento foi na ordem de 2,4 vezes (menor, se comparado com o aumento verificado aos 7 dias de cura).

Desta maneira, pode-se deduzir que o NaOH atua como catalisador, fato já ilustrado nas pesquisas de Purdon na década de 40, permitindo uma aceleração das reações químicas entre as partículas de pozolana, neste caso a telha cerâmica, e da cal de carbureto, o que favoreceu sua cimentação e é expresso em termos de ganho de resistência. Este efeito de catalização (aceleração das reações) foi maior na menor idade (7 dias), onde a aplicação de NaOH mostra-se, então, mais eficiente.

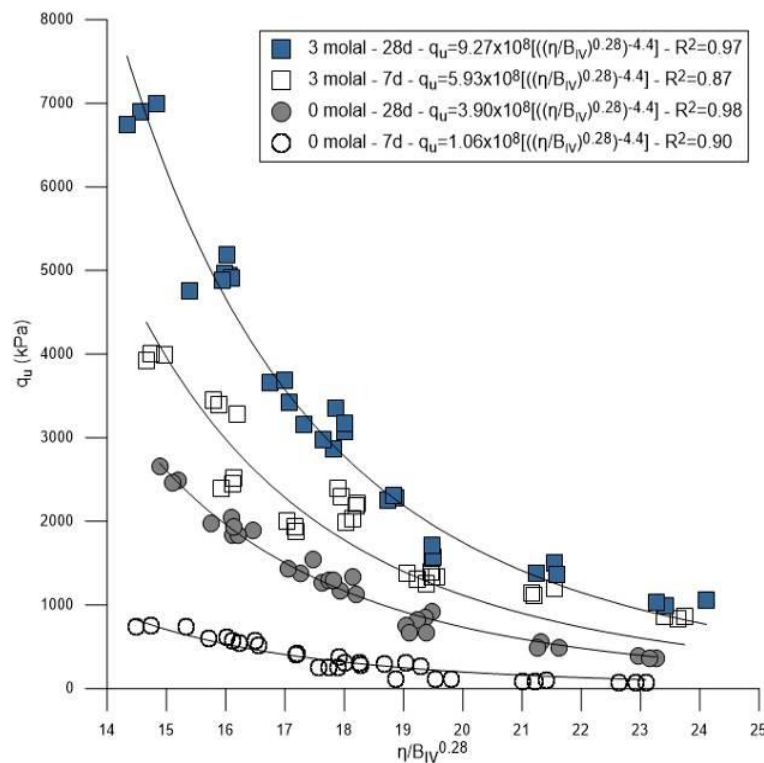


Figura 32 – Relação entre q_u e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

4.1.3.1 Resistência em função do parâmetro η/B_{IV} – outras molalidades

O projeto experimental desta dissertação tem o propósito de avaliar o comportamento de uma série de corpos de prova compreendidos da mistura areia de Osório, pó de telha cerâmica e cal de carbureto, onde um ativador alcalino será utilizado para acelerar as reações químicas do composto, ou seja, maximizar os ganhos de resistência em um curto espaço de tempo. Como já fora visto, o projeto experimental utiliza-se do hidróxido de sódio, ativador alcalino, numa proporção de 3 mol/kg, sendo o mesmo definido como a concentração molal

ótima (ver Figura 28). Entretanto, além do projeto de experimentos, alguns CPs complementares foram moldados nas concentrações de 2 e 4 molal, sendo estas escolhidas por estarem um nível acima e um abaixo da molalidade ótima. A Figura 33 mostra o resultado obtido deste estudo.

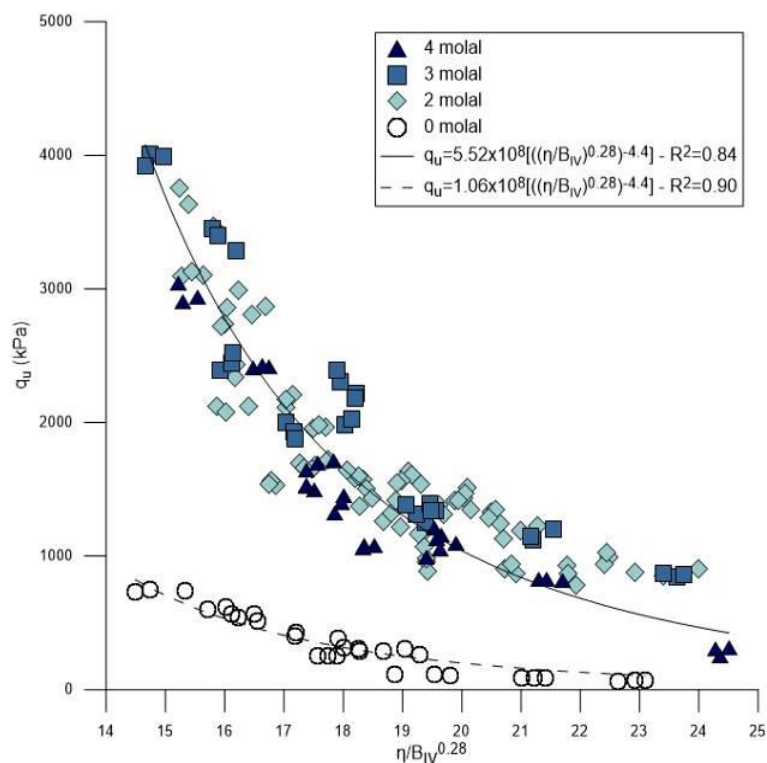


Figura 33 – Relação entre q_u e η/B_{IV} para 0, 2, 3 e 4 molal aos 7 dias de cura

Ao unir os dados deste estudo complementar com os do projeto experimental, sendo ambas curas realizadas aos sete dias e com temperatura constante ($\sim 23^\circ\text{C}$), observa-se que há uma tendência de agrupamento quanto aos dados onde alguma molalidade foi aplicada (2, 3 e 4 kg/mol), possibilitando ilustrar uma única curva de tendência a todos estes dados, cujo coeficiente de determinação (R^2) desta curva é de 84%. Com isto, pode-se afirmar que ocorreram grande ganhos de resistência ao introduzir uma solução álcali-ativadora num composto formado de areia de Osório-pó de telha cerâmica-cal de carbureto frente as misturas convencionais sem ativação alcalina, numa proporção de cinco vezes de aumento ($q_{u-0\text{molal}} 1,06 < 5,52 q_{u-2,3,4\text{molal}}$).

4.1.4 Análise estatística dos resultados do ensaio de RCS

Por meio de um software de análise estatística foram realizadas análises de variância (ANOVA), que visa avaliar o efeito das variáveis controláveis, com base nos resultados obtidos de cada etapa do ensaio de RCS. As análises de variâncias avaliam a importância de um ou mais fatores, comparando as médias de variáveis resposta nos diferentes níveis de determinado fator.

Os projetos fatoriais são amplamente utilizados em experimentos envolvendo vários fatores, onde é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores frente a uma ou mais variável resposta. Um dos mais importantes desses casos especiais é o de fatores k , cada um com apenas dois níveis, conhecido por design fatorial 2^k . Segundo Montgomery (2017) o projeto fatorial 2^k é particularmente útil nos estágios iniciais do trabalho experimental, quando é provável que muitos fatores sejam investigados. Ele fornece o menor número de execuções com os quais os fatores possam ser estudados em um projeto fatorial completo.

O experimento fatorial aplicado nesta pesquisa poderá abranger até cinco variáveis controláveis, sendo elas γ_d , teor de telha, teor de cal, NaOH e tempo de cura (Tabela 17), em dois níveis cada, sendo um inferior (-1) e um superior (+1). A análise dos resultados é dada através da construção de gráficos de Pareto e de efeitos principais, que são originados deste software a partir dos tratamentos selecionados em cada etapa (Figuras 34 a 40). Deste modo, é possível determinar quais variáveis tem maior efeito em resposta a variável q_u . O intervalo de confiança adotado foi na ordem de 95% (MONTGOMERY, 2017). Com isto, o valor do teste t (valor-P) deve ser menor que 0,05 para uma determinada variável estar enquadrada dentro do intervalo de 95% de confiança.

Tabela 17 – Parâmetros, variáveis e níveis

Parâmetro		Tipo de variável	Níveis
Resistência à compressão simples (RCS)	q_u (kPa)	Resposta	-
Rigidez	G_0 (MPa)	Resposta	-
Durabilidade (perda de massa)	PMA (%)	Resposta	-
Teor porosidade/ligante	η/B_{IV}	Resposta	-
Umidade de moldagem	w (%)	Constante	-
Temperatura de cura	T (°C)	Constante	-
Pó de telha cerâmica	Poz. (%)	Controlável	10 – 20 – 30
Cal de carbureto	CC (%)	Controlável	4 – 7 – 10
Peso esp. aparente seco	γ_d (kN/m ³)	Controlável	15 – 16 – 17
Tempos de cura	TC (dias)	Controlável	7 – 28
Concentração molal	NaOH (molal)	Controlável	0 – 3

Para os ensaios de resistência à compressão simples foram elaborados alguns gráficos de Pareto e de efeitos principais, com o objetivo de analisar o efeito de uma ou mais variáveis controláveis frente a sua variável resposta, neste contexto RCS. A primeira verificação está representada na Figura 34. Ela apresenta a variação da resistência à compressão simples para CPs moldados com NaOH em sua composição, 3 molal, aos 7 dias de cura, em função de cada variável estudada. A variável que apresentou a maior influência foi o teor de cal de carbureto, seguido pelo peso específico aparente seco e teor de pozolana. As interações de segunda ordem também exibiram influência nas misturas, sendo elas os segmentos AB ($\gamma_d +$ pozolana) e AC ($\gamma_d +$ cal). Entretanto, o segmento BC não foi possível de ser avaliado pois como a matriz de ensaios não foi completa (nem todas as combinações possíveis foram moldadas) o software não pode analisá-la. Esta premissa estará presente em toda esta dissertação. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 95,75%.

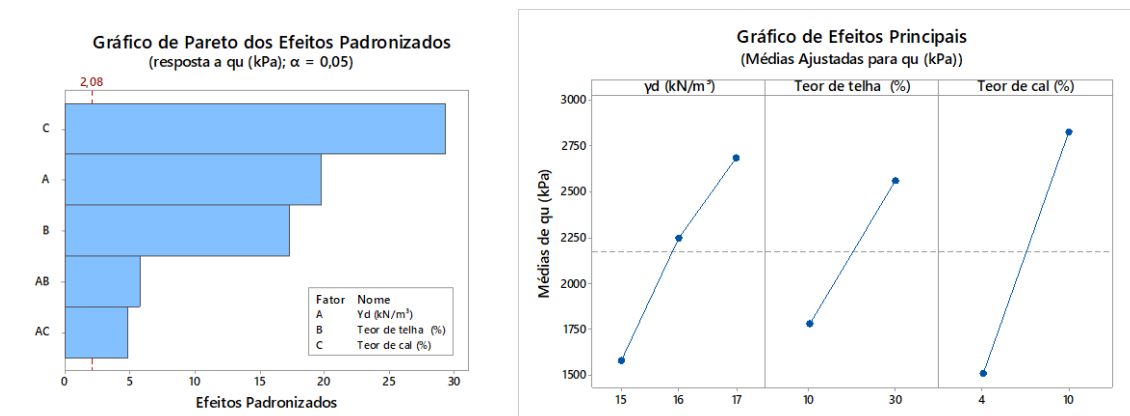


Figura 34 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 3 molal aos 7 dias de cura

Decorridos 28 dias de cura, em conformidade com a Figura 35, o teor de telha (pozolana) apresentou ser a variável de maior significância para as misturas, sucedidos por γ_d e cal. R^2 para este conjunto de ensaio foi de 99,75%.

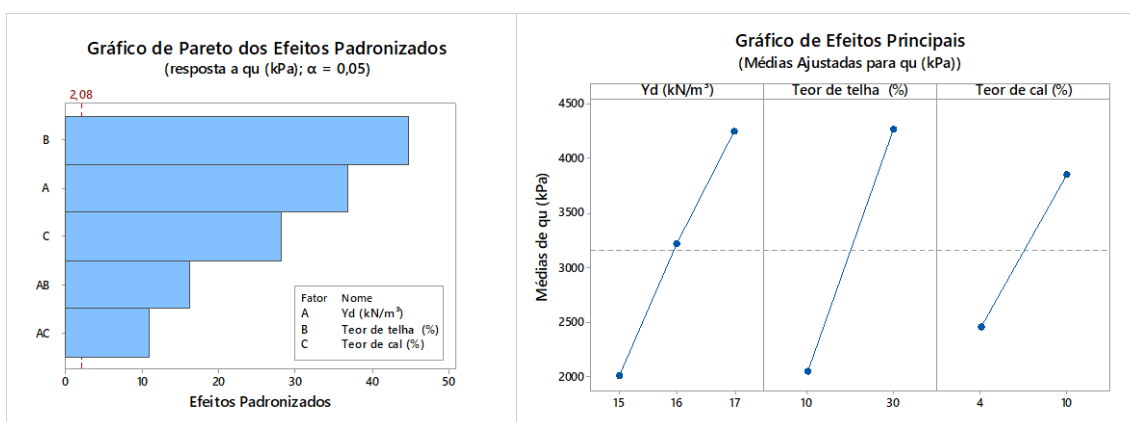


Figura 35 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 3 molal aos 28 dias de cura

As Figuras 34 e 35 exibem a influência de três variáveis controláveis nas misturas, aos 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Já a Figura 36 leva em consideração o tempo de cura como uma variável independente, tornando-se a quarta variável controlável. Para estas amostras, hidróxido de sódio permanece constante, sempre no valor de 3kg/mol. O teor de pó de telha adicionado foi a variável com maior influência para o aumento de resistência. Seguem cal de carbureto, γ_d e o tempo de cura. Isso exemplifica que, ao adicionar uma maior quantidade da parte fina na mistura, neste caso representados pela cal e pó de telha passantes na peneira #200, surtirá mais efeito. Isso porque quanto mais fina a granulometria da mistura, maior será

o contato (intertravamento) entre os grãos da mistura e mais material estará disponível para que ocorram as reações cimentantes (como as reações pozolânicas). Ainda, conforme pode ser observado no gráfico de efeitos principais, à medida que as quatro variáveis são ampliadas (mais teor de telha e cal, por exemplo) ocasiona no aumento da RCS. Os efeitos de segunda e terceira ordem também se mostram relevantes neste cenário (valor do teste-P inferior a 0,05), com exceção de CD, combinação de cal + tempo de cura. R^2 desta análise equivale a 99,81%.

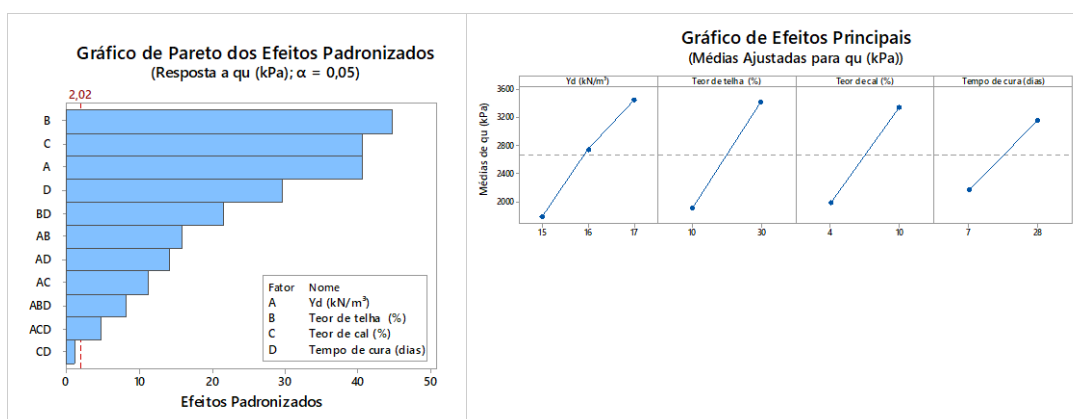


Figura 36 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

Anteriormente, todas as análises de efeitos das variáveis eram feitas para a concentração molal ótima de 3kg/mol. Nas Figuras 37, 38 e 39 além da molalidade ótima, resultados experimentais dos corpos de prova sem adição alcalina (0 molal) são agregados, para 7, 28 e 7/28 dias, respectivamente. Para ambas três figuras, a inserção do hidróxido de sódio representa ser o fator que mais contribuiu para o ganho de resistência, atuando o NaOH na dissolução dos aluminossilicatos do argilomineral (sendo a telha cerâmica um fator de grande significância estatística nestas figuras), promovendo a formação de géis tipo C-S-H, N/C-A-S-H, fomentando a cimentação das partículas do solo, sendo ele o responsável no aumento da resistência. O coeficiente de determinação para a Figura 35 é 99,9% enquanto que para a Figura 36 é 84,11%.

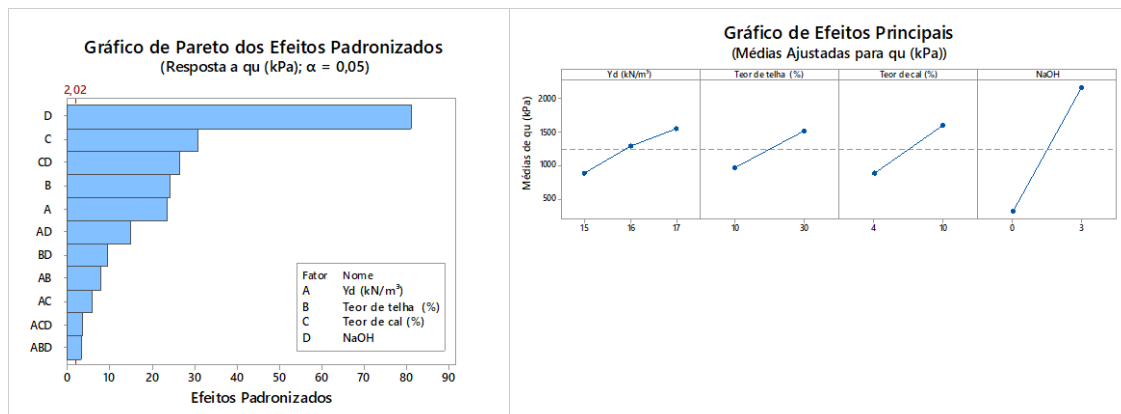


Figura 37 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

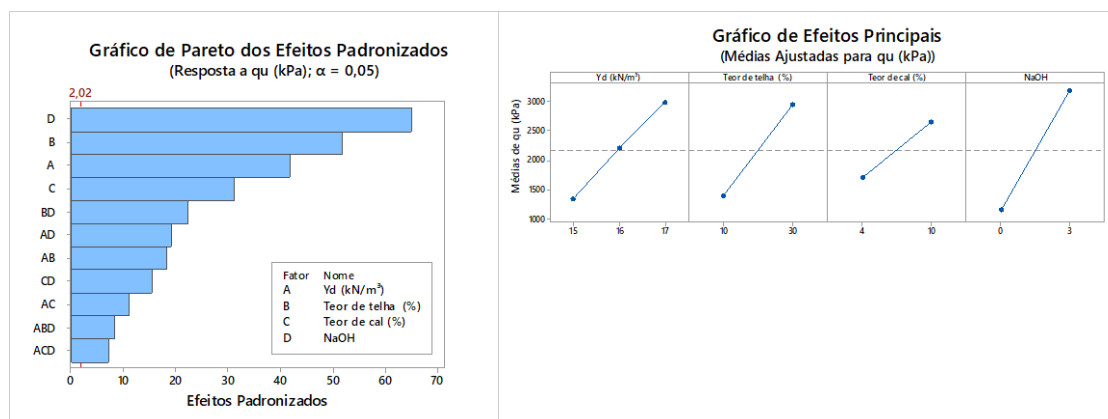


Figura 38 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 0 e 3 molal aos 28 dias de cura

A Figura 39 representa a análise estatística completa do projeto experimental desenvolvido nesta pesquisa, para o ensaio de resistência à compressão simples. Todas as cinco variáveis controláveis (γ_d , pozolana, cal, NaOH e tempo de cura) se fazem presentes, onde a umidade de moldagem e temperatura de cura são constantes. O hidróxido de sódio foi a variável que apresentou a maior influência dentre as cinco variáveis controláveis. A importância desta forte base alcalina se dá à sua capacidade de elevar o pH da mistura, auxiliando na formação das reações químicas que ocorrem entre as partículas do solo e os ligantes adicionados.

A combinação de todas estas variáveis resulta em um R^2 de 81,88%. Pode-se observar que as cinco variáveis apresentam valores acima da linha de referência (2,0), o que representa significância de 95%, conforme estabelecido previamente. Todas as combinações destas variáveis também apresentaram significância acima de 95%, permitindo assim chegar à

conclusão que todas as variáveis separadamente ou em combinação uma com as outras contribuem para o aumento da resistência. Alguns efeitos (segunda, terceira e quarta ordem) não puderam ser analisados devido a delimitação da matriz de ensaio.

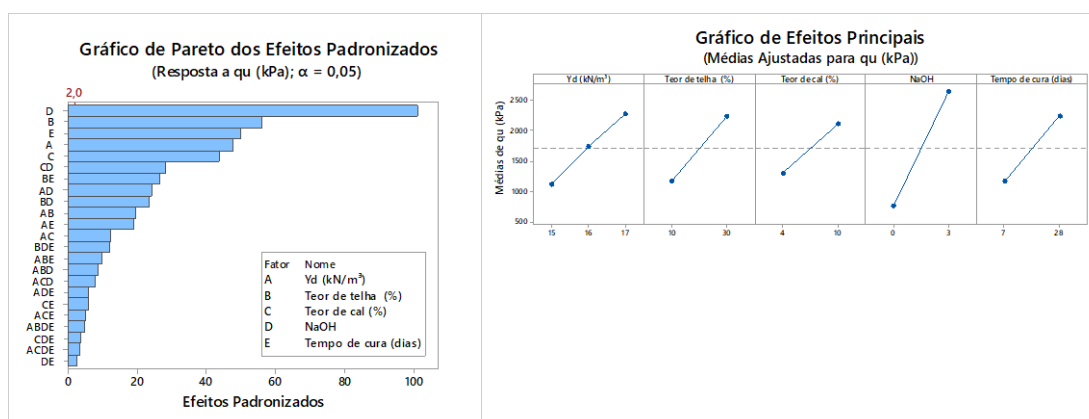


Figura 39 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

Ensaio adicionais foram elaborados variando a concentração molal das misturas. Escolheu-se por trabalhar com um nível acima e um abaixo da concentração molal ótima, resultando em NaOH = 2, 3 e 4 kg/mol. Estes ensaios foram realizados em conformidade com os executados anteriormente, com o tempo de cura de 7 dias. Com um R^2 de 97,35%, os valores do teste-P inferior a 0,05 revelam que todas as quatro variáveis isoladamente contribuem significativamente para RCS, com destaque para o pó de telha cerâmica, a mais relevante neste contexto. O gráfico de Pareto da Figura 40 também apresenta que alguns efeitos de segunda e terceira ordem apresentam ser relevantes, entre eles ABC, BD e AC. Já o gráfico de efeitos principais corrobora com duas informações, a primeira é que notoriamente a molalidade de 4 kg/mol decresce a resistência das misturas; maiores teores de pozolana e cal e γ_d refletem nos ganhos de resistência.

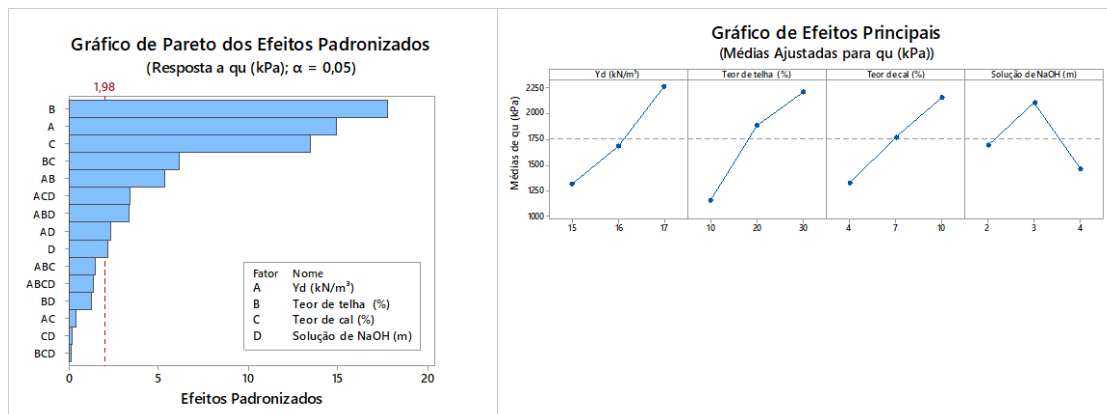


Figura 40 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de q_u para 2, 3 e 4 molal aos 7 dias de cura

4.2 MÓDULO CISALHANTE INICIAL (G_0)

Avalia-se neste capítulo o módulo cisalhante a pequenas deformações (G_0), também chamado de ensaio de rigidez. Por ser o ensaio de rigidez considerado um ensaio não destrutivo, as medições das velocidades de propagação da onda ocorreram nos mesmíssimos corpos de prova utilizados no ensaio de RCS, sempre realizadas antes da ruptura dos espécimes. Os mesmos períodos de cura dão base a este ensaio, 7 e 28 dias. Demais informações referentes ao ensaio de rigidez estão presentes no Anexo A.

Conforme adotado anteriormente, os resultados dos ensaios de rigidez são exibidos em função A) da presença de NaOH nas misturas (0 e 3 molal); do tempo de cura: 7 e 28 dias; B) do peso específico aparente seco (γ_d); dos teores dos precursores: pó de telha cerâmica e cal de carbureto. Na continuação, relaciona-se G_0 com o parâmetro η/B_{IV} (razão entre a porosidade e teor de agentes cimentantes). Por fim, serão avaliados através de um software de análise estatística quais das variáveis dispõe de maior influência referentes a variável resposta deste ensaio (G_0).

4.2.1 Rigidez em função da concentração molal e do tempo de cura

Tem-se ilustrado na Figura 41 a variação da rigidez (verificada através do módulo cisalhante a pequenas deformações [G_0]) dos corpos de prova, e a relação desta variável resposta com o

peso específico aparente seco (γ_d , em seus três níveis) considerando as proporções 10-4%, 20-7% e 30-10% de pó de telha cerâmica e cal de carbureto para as concentrações de moles de 0 e 3 mol/kg decorridos 7 e 28 dias de cura. Deste modo, quatro faixas de valores são apresentadas, levando em consideração a união dos fatores concentração molal e tempo de cura. São elas I) 0 molal aos 7 dias de cura; II) 0 molal aos 28 dias de cura; III) 3 molal aos 7 dias de cura; IV) 3 molal aos 28 dias de cura. Os resultados das rigidezes estão fundamentados em termos de réplicas (triplicatas) para cada dosagem. A partir da análise das ilustrações da Figura 41, observa-se que as rigidezes são mais elevadas conforme o hidróxido de sódio é incorporado à mistura [$G_{0-0\text{molal}} < G_{0-3\text{molal}}$; Figura 41 (a) e (b)]. Do mesmo modo, o tempo de cura apresentou ser uma variável relevante, onde os espécimes com maior idade (28 dias) apresentam valores de rigidez maiores em comparação com os reservados por uma semana (7 dias de cura), havendo mais tempo para que ocorressem as reações entre os precursores e o NaOH, o que se traduziu em ganhos de rigidez, o que se observa a partir das ilustrações (c) e (d) da Figura 41.

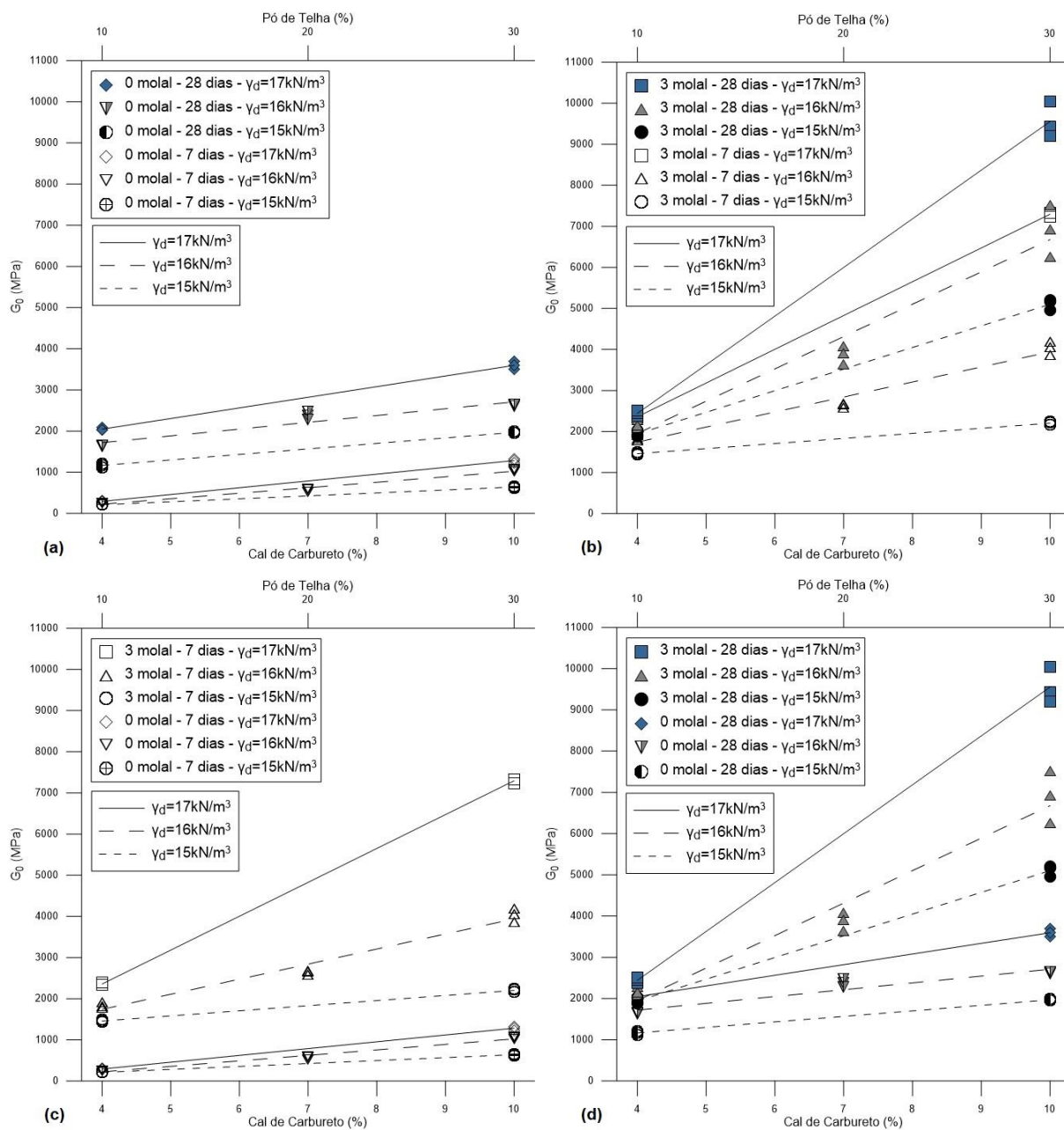


Figura 41 – Respostas a G_0 para (a) 0 molal, (b) 3 molal, (c) 7 dias de cura e (d) 28 dias de cura

4.2.2 Rigidez em função do peso específico seco (γ_d) e dos teores de pozolana e cal de carbureto

Três gráficos de barras dão formato as Figuras 42 e 43, apresentando estas os resultados do ensaio de rigidez inicial. Optou-se pelo uso alternativo deste modelo de gráfico afim de ilustrar o conteúdo a ser explanado. Lidou-se com três níveis de peso específico, pó de telha e cal de carbureto para as molalidades 0 e 3 mol/kg aos 7 e 28 dias de cura. Os resultados são representados considerando a média da triplicata de cada dosagem. Num contexto geral, as considerações obtidas através da Figura 42 para o ensaio de rigidez não se distinguem muito do observado no ensaio de resistência à compressão simples (Figuras 30 e 31), mantidas algumas ressalvas quanto a amplitude dos valores, obteve-se valores de rigidez mais elevados. Repara-se que o grau de compactação da amostra, a inclusão do hidróxido de sódio e o tempo de cura são proporcionais ao ganho de rigidez do material.

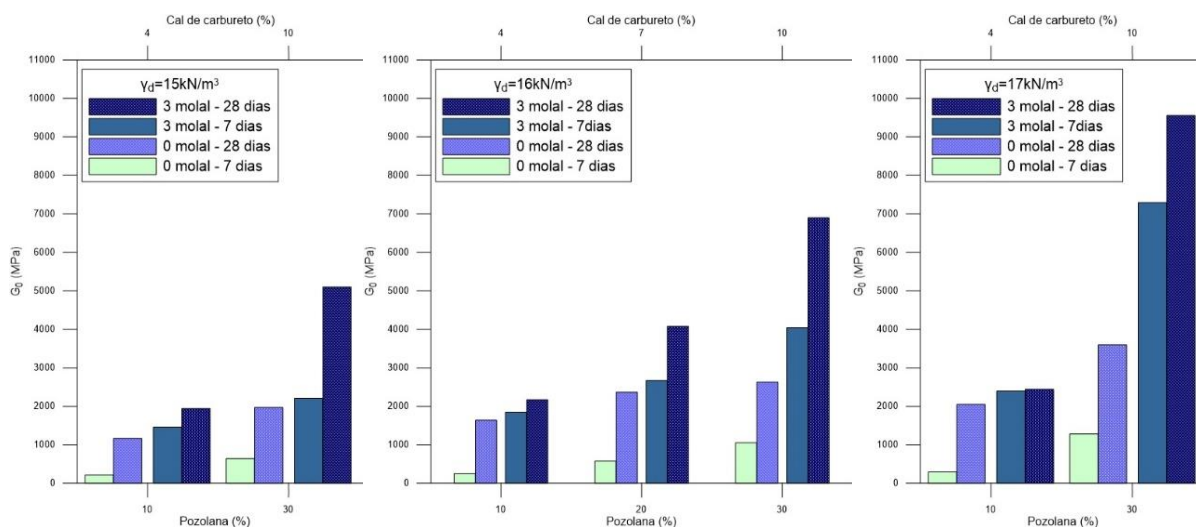


Figura 42 – Relação entre G_0 e poz.;CC para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) $\gamma_d=15\text{kN/m}^3$, (b) $\gamma_d=16\text{kN/m}$ e (c) $\gamma_d=17\text{kN/m}$

Ao se colocar em evidência as variáveis % de cal de carbureto e % de pó de telha cerâmica das misturas é possível conceber o quanto estas variáveis influenciam na rigidez dos espécimes. Nota-se a partir da Figura 43a que os ganhos de rigidez não foram muito expressivos ainda que o peso específico variasse. Em contrapartida, representados pela Figura 43c, o módulo cisalhante (G_0) aumenta consideravelmente à medida que crescem o grau de compactação, o tempo de cura e o ativador alcalino. Assim, é possível analisar a importância

e a influência dos teores das partículas finas na mistura. Conforme a quantidade de finos introduzida aumenta, os espaços (vazios) diminuem, resultando em um solo mais compacto e com maiores travamentos entre as partículas, o que neste caso representou ganhos de rigidez.

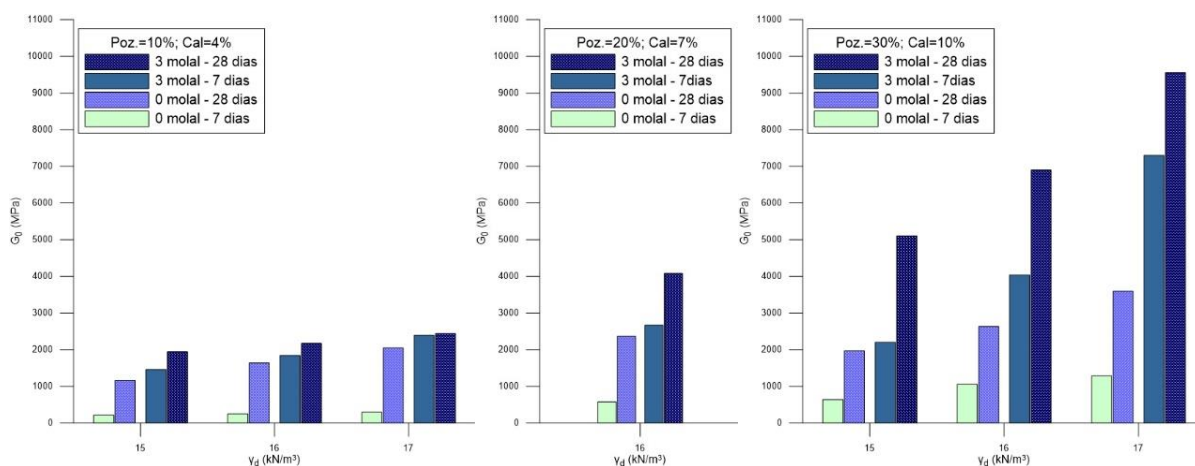


Figura 43 – Relação entre G_0 e γ_d para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura para (a) poz.=10%; cal=4%, (b) poz.=20%; cal=7% e (c) poz.=30%; cal=10%

4.2.3 Rigidez em função do parâmetro η/B_{IV}

Curados nos períodos de 7 e 28 dias a uma temperatura ambiente constante, adicionados de hidróxido de sódio a uma concentração molal de 3kg/mol e nula, a Figura 44 exhibe os resultados relativos as leituras de G_0 , estando os corpos de prova distribuídos em quatro curvas, onde é possível apresentar uma relação entre os parâmetros G_0 e $\eta/B_{IV}^{0,28}$. Observa-se a partir dos resultados que o módulo cisalhante a pequenas deformações é inversamente proporcional ao parâmetro η/B_{IV} , isto quer dizer que conforme o segundo vai diminuindo as rigidezes vão aumentando. Ao comparar ambas curvas, nota-se que as amostras ativadas por NaOH apresentaram valores de G_0 superiores às amostras cuja umidade se deu exclusivamente por meio de água destilada. Novamente o tempo de cura apresenta ser uma variável primordial para que ocorram as reações ($G_0\text{-7dias} < G_0\text{-28dias}$). Os expoentes externos para ambas curvas foram ajustados no valor de -3,45, sendo este o melhor ajuste, proporcionando uma relação mais direta em função da grandeza dos valores.

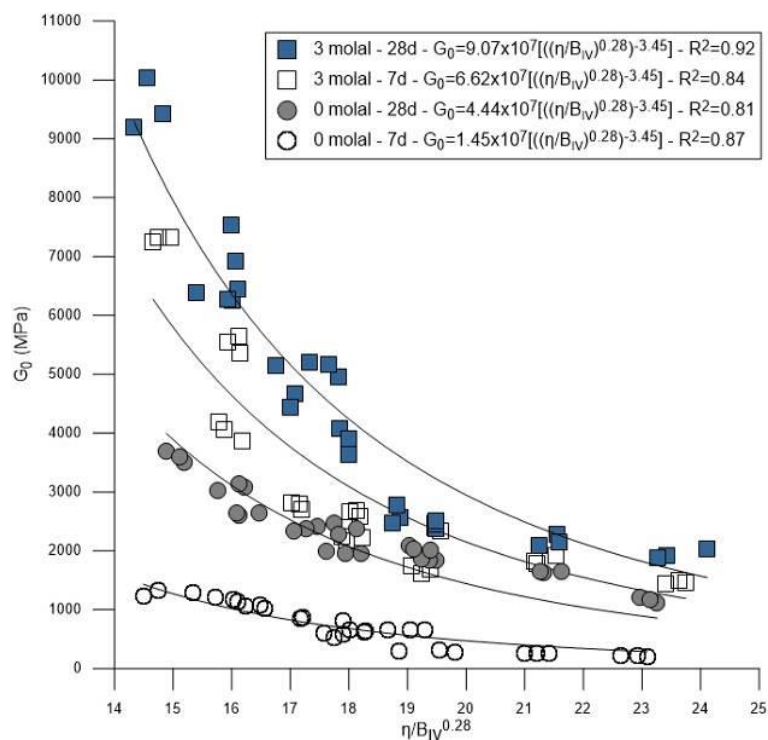


Figura 44 – Relação entre G_0 e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

4.2.4 Análise estatística dos resultados do ensaio de rigidez

A mesma premissa utilizada para os ensaios de resistência à compressão simples foi adotada nesta seção para os resultados do ensaio de rigidez, com o intuito de avaliar o efeito de uma ou mais variáveis controláveis frente a esta variável resposta. Neste sentido, as Figuras 45-50 são constituídas de gráficos de Pareto e de efeitos principais em relação ao módulo cisalhante (G_0). A Figura 45 [$R^2 = 84,93\%$] apresenta a influência de três variáveis (γ_d , teor de telha e teor de cal) e sua respectiva relevância para as misturas, curadas numa idade de sete dias e com presença do ativador alcalino (3 molal). Ambas três variáveis apresentam pertinência, sobretudo o peso específico seco (γ_d) das amostras, elucidando que um aumento da densidade do CP proporcionará um maior grau de compactação e, conseqüentemente, também haverá maior contato dos grãos, menor índice de vazios, menor permeabilidade do material, e, deste modo, maiores ganhos mecânicos.

Para a Figura 46, aumenta-se o tempo de cura dos corpos de prova, de sete para vinte e oito dias. A cal de carbureto passa a ser o item de maior relevância, e a combinação γ_d -teor de cal deixa de ser representativa. O coeficiente de determinação para este conjunto é equivalente a 99,04%. Une-se na Figura 47 os resultados de sete e vinte e oito dias, com isto, inclui-se a variável tempo no projeto experimental. Novamente, todas as quatro variáveis são significativas e ao incrementa-las o resultado esperado é de aumento de rigidez dos CPs, afirmação condizente com o gráfico dos efeitos principais (Figura 47b). R^2 para este conjunto foi de 99,40%.

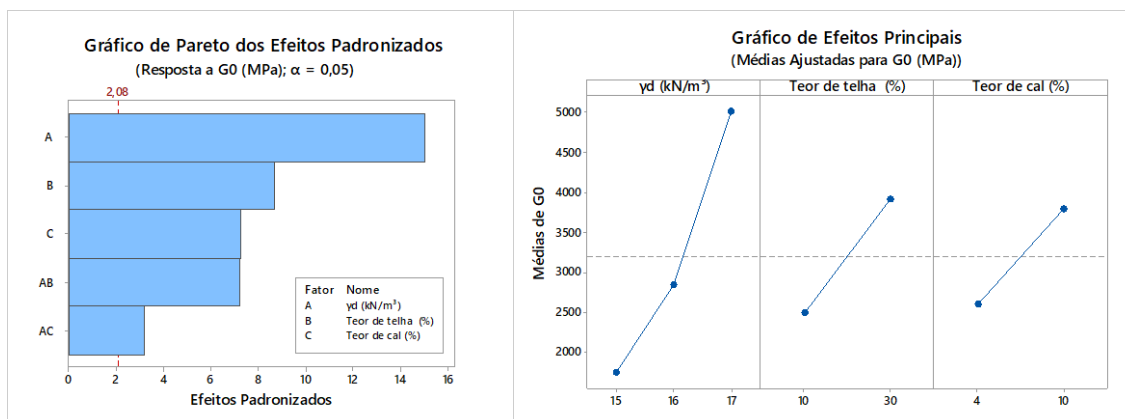


Figura 45 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 7 dias de cura

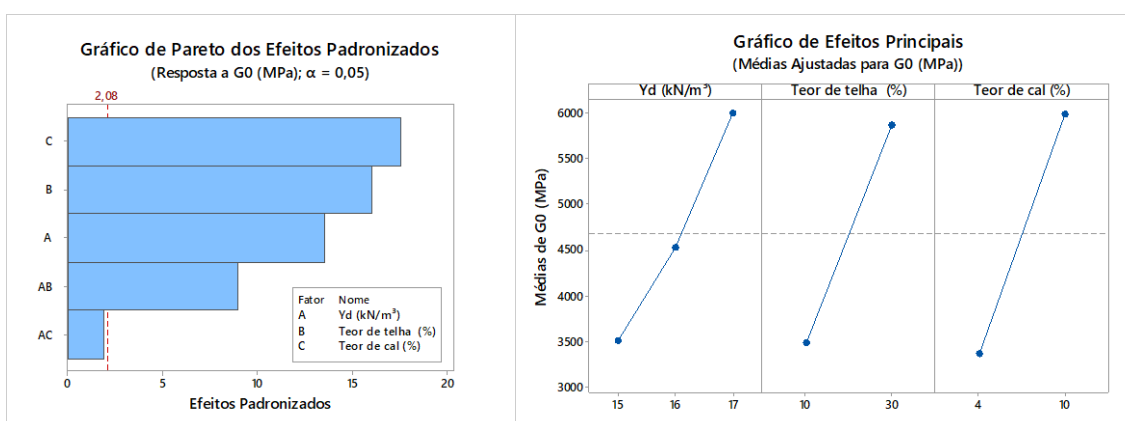


Figura 46 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 28 dias de cura

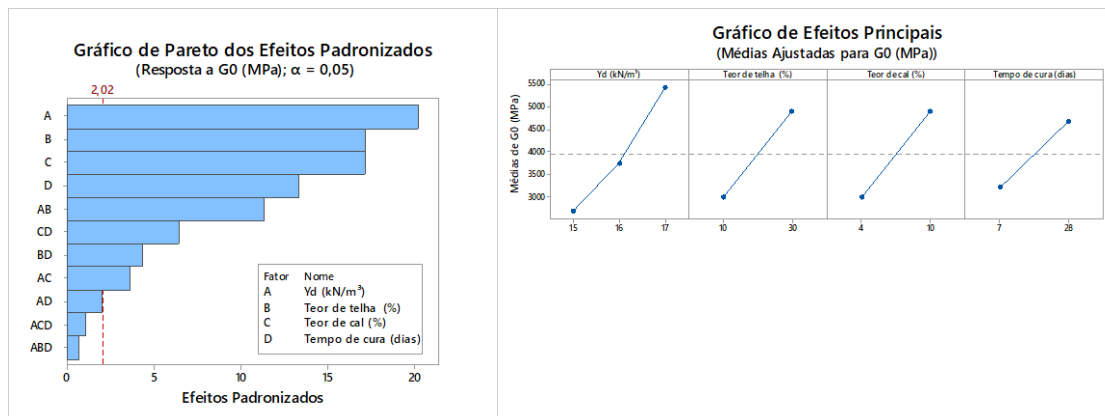


Figura 47 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

As próximas três figuras estão relacionadas à adição (ou não) do hidróxido de sódio nos espécimes. Tanto na Figura 48 quanto na 49 esta variável mostra ser a de maior importância para o aumento de rigidez dos corpos de prova curadas nas idades de sete e vinte e oito dias, respectivamente. A maioria dos efeitos de segunda e terceira ordem também demonstram ser de grande valia (teste- $P < 0,05$). Os coeficientes de determinação são de 99,92% (7 dias) e 77,96% (28 dias).

Por fim, reúne-se na Figura 50 as cinco variáveis controláveis (γ_d , pozolana, cal, NaOH e tempo de cura) da análise estatística dos resultados dos ensaios de rigidez (G_0), cujo R^2 vale 78,47%. Nota-se que as cinco variáveis apresentam valores acima da linha de referência (1,99), comprovando de fato serem relevantes aos valores de G_0 , em especial se destaca a importância da presença do ativador alcalino (fundamental na dissolução das partículas de aluminossilicatos e subsequente formação dos géis), seguido por uma maior idade de cura, tempo necessário para ocorrência das reações químicas, entre elas as reações pozolânicas.

A maioria dos efeitos de segunda e terceira ordem, ou seja, a combinação das variáveis, também contribuem significativamente para o aumento de rigidez dos corpos de prova. Entretanto, apesar das variáveis hidróxido de sódio e tempo serem, individualmente, as mais significativas para o experimento, a combinação delas não representa tal importância (segmento DE da Figura 48). Os efeitos de segunda ordem de NaOH ou tempo mostram-se muito mais relevantes em combinação com a variável cal de carbureto, por exemplo.

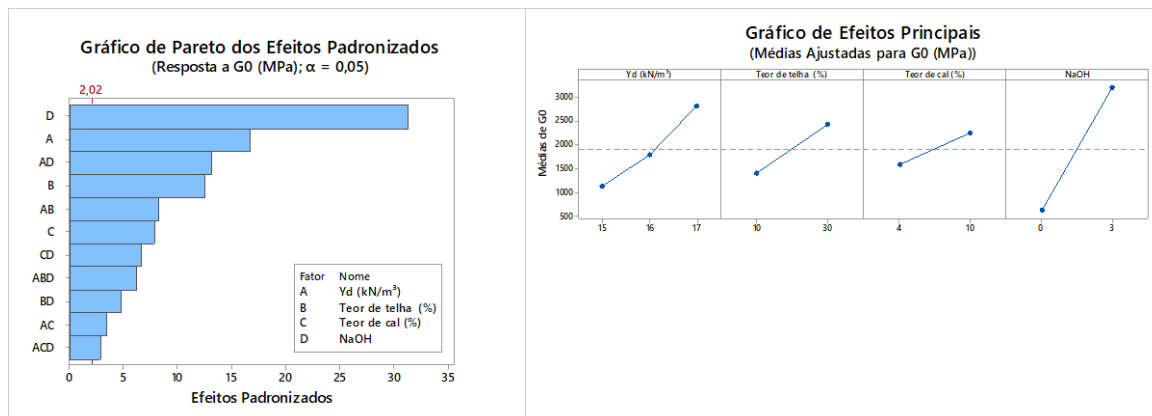


Figura 48 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

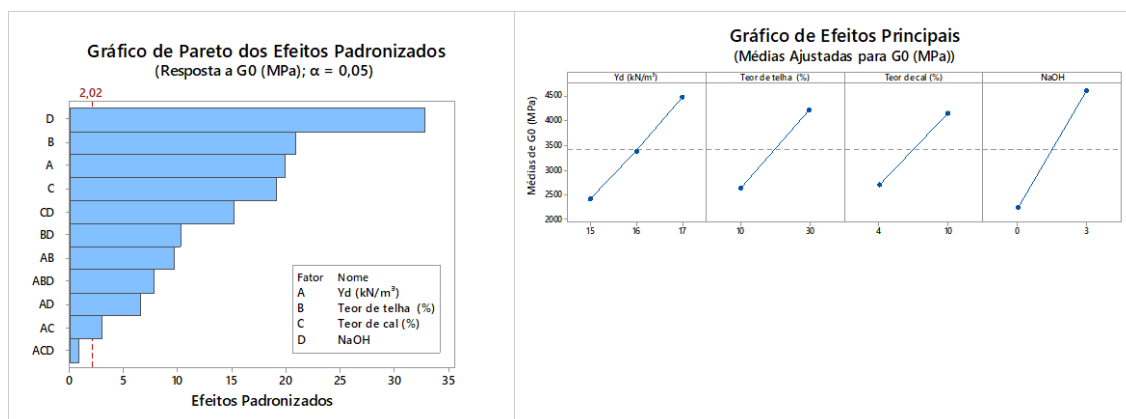


Figura 49 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 28 dias de cura

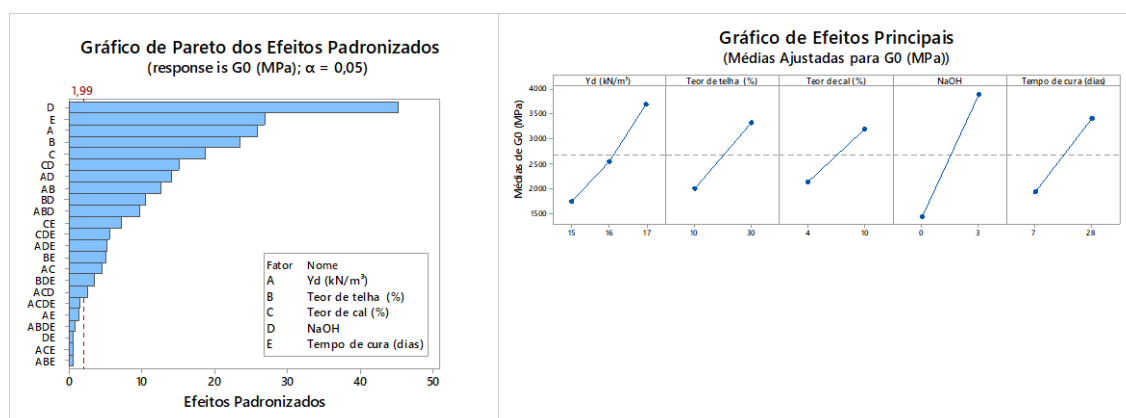


Figura 50 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

4.3 RESISTÊNCIA EM FUNÇÃO DA RIGIDEZ

As quatro combinações oriundas de um conjunto de materiais que dá origem a este trabalho representados pela areia de Osório, cal de carbureto e pó de resíduo cerâmico moldados em conjunto com água ou água + hidróxido de sódio e curados aos 7 e 28 dias apresentam uma relação linear entre a resistência à compressão simples (q_u) e o módulo cisalhante (G_0). Na Figura 51 é possível visualizar a relação entre estas duas variáveis resposta bem como a equação de comportamento, cujo coeficiente de determinação (R^2) fica na ordem de 91%. Compete as misturas de 28 dias contendo hidróxido de sódio os melhores resultados, seja na compressão simples seja na rigidez. A relação entre a resistência à compressão e o módulo cisalhante para pequenas deformações se mostrou linear, explicando assim a similaridade entre os coeficientes nas correlações obtidas para ambos os fatores (WINTER, 2018).

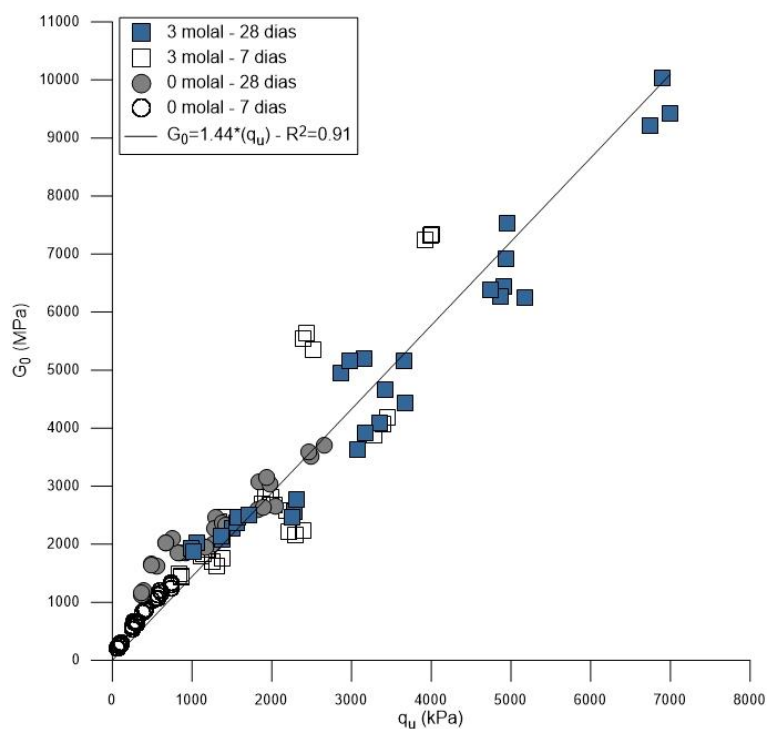


Figura 51 – Relação entre q_u e G_0 para 0 e 3 molal aos 7 e 28 dias de cura

4.4 DURABILIDADE

A durabilidade das misturas foi avaliada através de doze ciclos de molhagem/secagem e escovação conforme procedimentos descritos na norma ASTM D559 (ASTM, 2015). O parâmetro obtido deste ensaio é relacionado a perda de massa (PM), que é mensurado após cada ciclo completo do ensaio. Ao final dos doze ciclos, obtém-se a perda de massa acumulada (PMA). Com isto, os resultados explanados neste capítulo estarão sempre relacionados com PM ou PMA. Espécimes foram moldados levando em consideração o conjunto de materiais areia de Osório, cal de carbureto e pó de telha cerâmica dosados a partir de uma matriz de ensaios. Com intuito de avaliar o efeito da concentração molal nos ensaios de durabilidade, foram adotadas as concentrações de 0 molal (sem presença de NaOH), e 3 molal, concentração ótima, definida na etapa de ensaio piloto. O teor de cal de carbureto adicionado foi constante em todas amostras, na ordem de 7%. O tempo de cura destes CPs foi de 7 dias. Os dados referentes ao ensaio de durabilidade estão compreendidos no Anexo A do presente trabalho.

4.4.1 Durabilidade em função do peso específico seco (γ_d) e dos teores de pozolana

Os resultados do ensaio de durabilidade são apresentados em função do peso específico aparente seco (Figuras 52-57) e dos teores de pó de telha cerâmica (Figuras 58-63) das amostras para as concentrações molal nula e ótima, 0 e 3 mol/kg respectivamente. As análises estão enquadradas em referência a perda de massa (PM) e perda de massa acumulada (PMA) para os doze ciclos de molhagem/secagem e escovação, conforme Figuras 52-63 e Tabela 18. De um modo geral, pode-se estabelecer algumas considerações quanto aos resultados:

- a incorporação do ativador alcalino (NaOH) apresentou, em geral, resultados melhores quanto as perdas de massa;
- o grau de compactação da amostra, peso específico aparente seco, demonstra ser uma variável importante para este ensaio. O acréscimo do γ_d , trouxe melhorias do ponto de vista de durabilidade;

- o teor de finos também impacta no ensaio de durabilidade. As misturas que contém as maiores proporções de pozolana, isto é, 30% de pó de telha, foram as que obtiveram as menores taxas de perdas de massa;
- os primeiros três ciclos, em média, apresentam maiores perdas de massa se comparado aos demais ciclos (Figuras 52, 54, 56, 58, 60 e 62). Os demais ciclos, em geral apresentaram perdas constantes;
- o CP com $\gamma_d=15\text{kN/m}^3$, PTC=10% foi o que apresentou a maior perda de massa no primeiro ciclo de escovação e também a maior perda de massa acumulada após a realização do 12º ciclo do ensaio (Figuras 53 e 59). Seu valor foi na ordem de 19,57% para 3mol/kg de NaOH e de 31,62% sem NaOH. Uma significativa diferença. O que mostra a influência da presença do NaOH nesta mistura; o espécime com $\gamma_d=17\text{kN/m}^3$, PTC=30% (Figuras 57 e 63) foi o que apresentou a menor perda de massa acumulada após a sucessão dos 12 ciclos do ensaio. Seu valor foi na ordem de 5,07% para 3mol/kg de NaOH e de 6,33% sem NaOH, resultados similares. Em síntese, foram estas as observações deste ensaio. À medida que os valores de γ_d e pozolana são menores, introduzir o hidróxido de sódio mostra-se vantajoso. Em contrapartida, ao passo que o grau de compactação e o teor de finos aumentam, percebe-se que as perdas de massa nestes CPs são da mesma ordem, ou seja, valores aproximados. A Tabela 18 indica a relação da perda de massa acumulada para as misturas do ensaio de durabilidade após sucessão de 12 ciclos de molhagem/secagem e escovação.

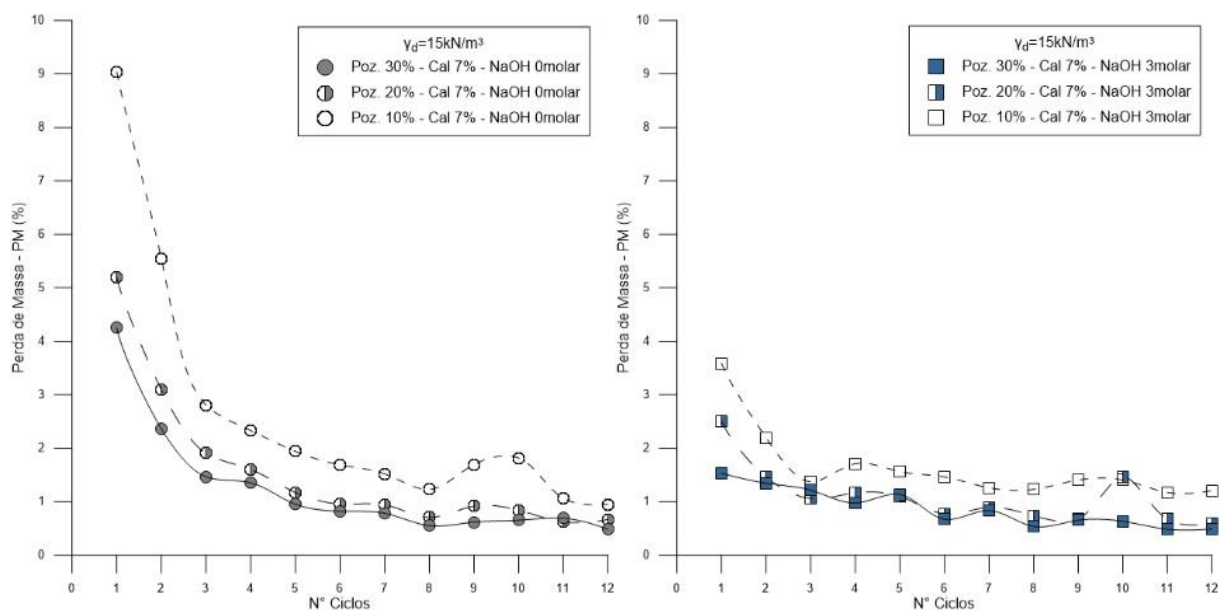


Figura 52 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura

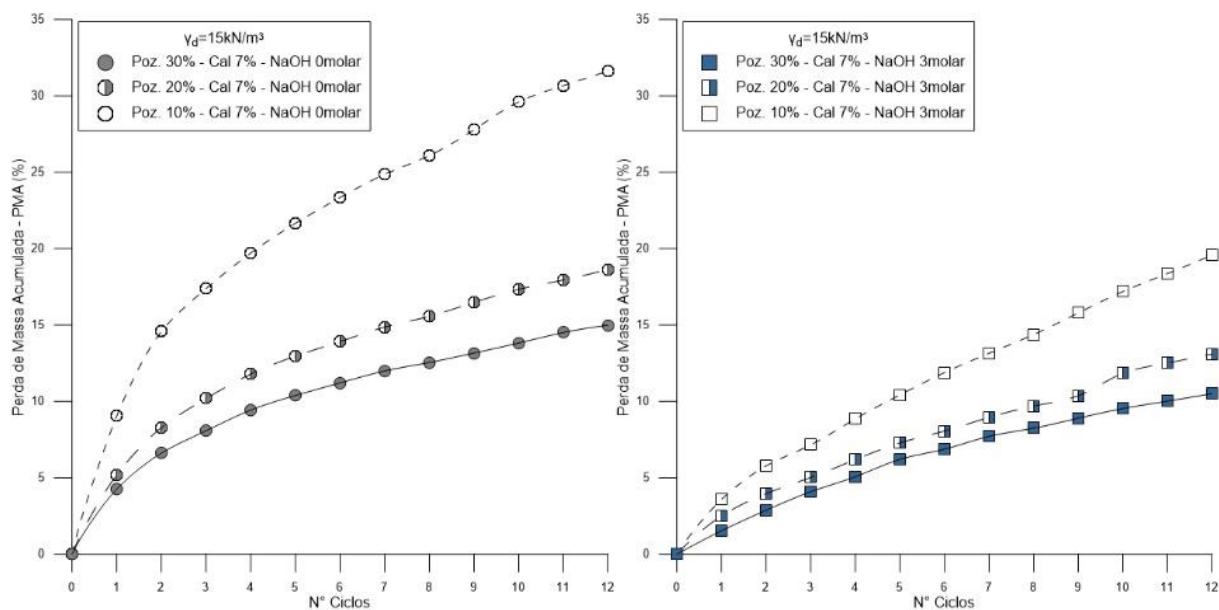


Figura 53 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura

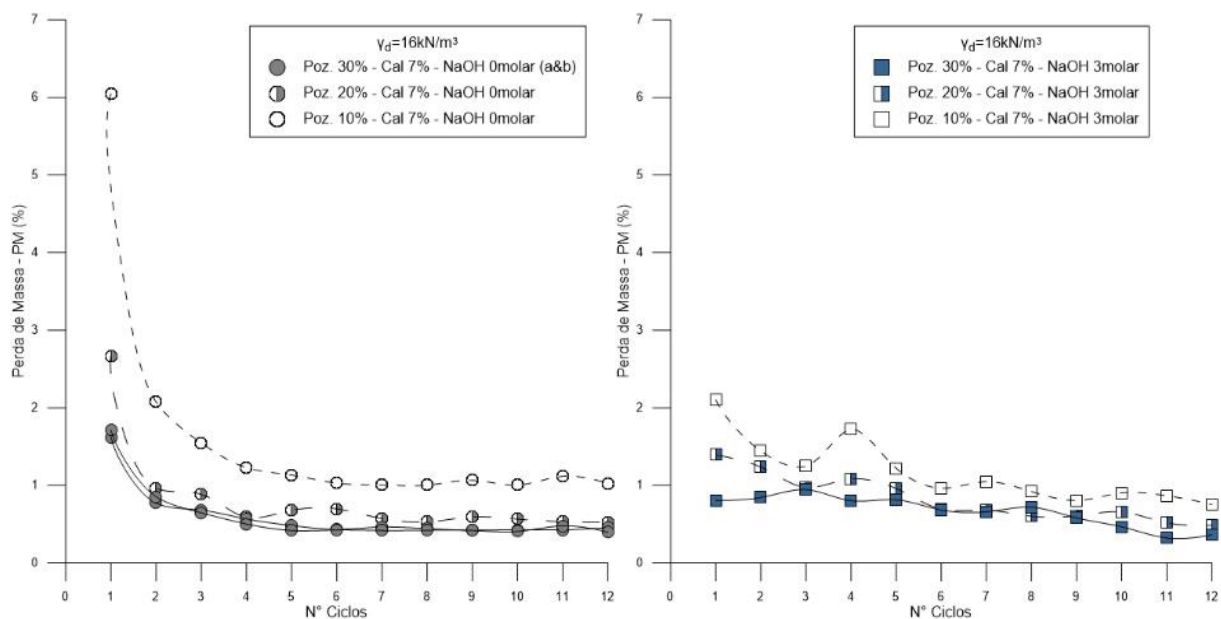


Figura 54 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molar e (b) 3 molar, com $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura

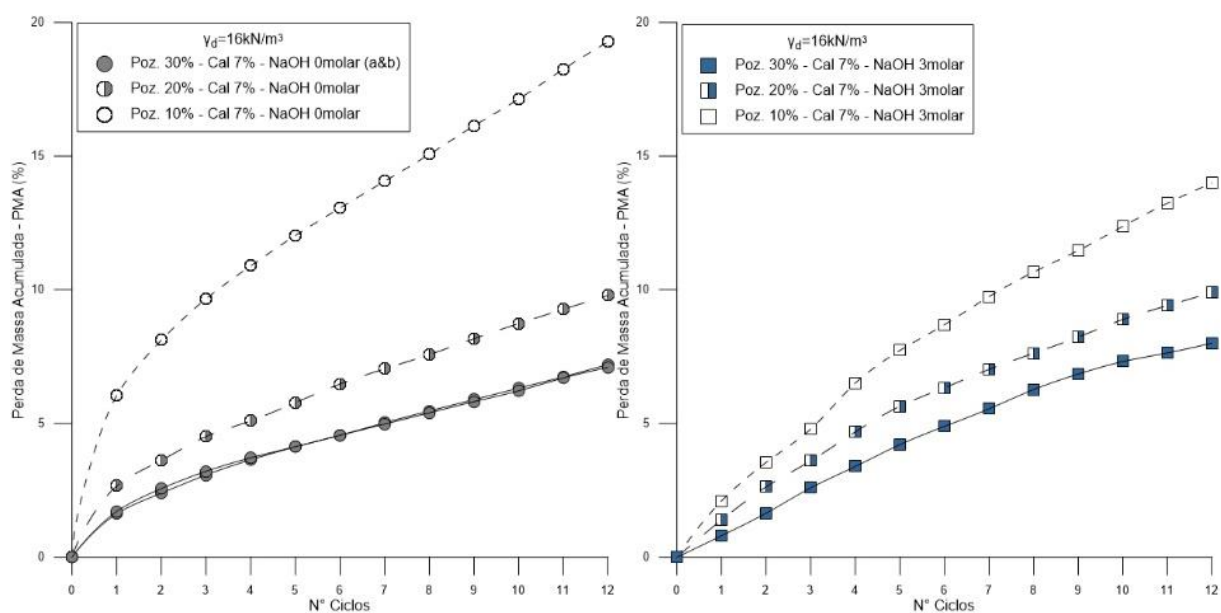


Figura 55 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molar e (b) 3 molar, com $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ para sete dias de cura

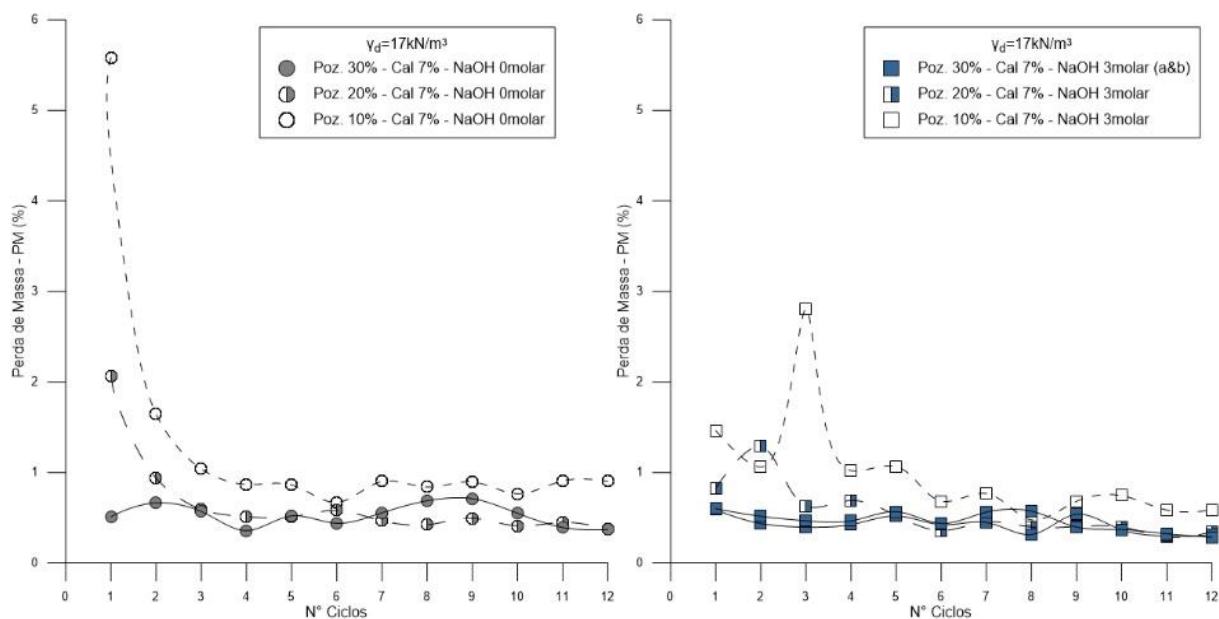


Figura 56 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 17\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura

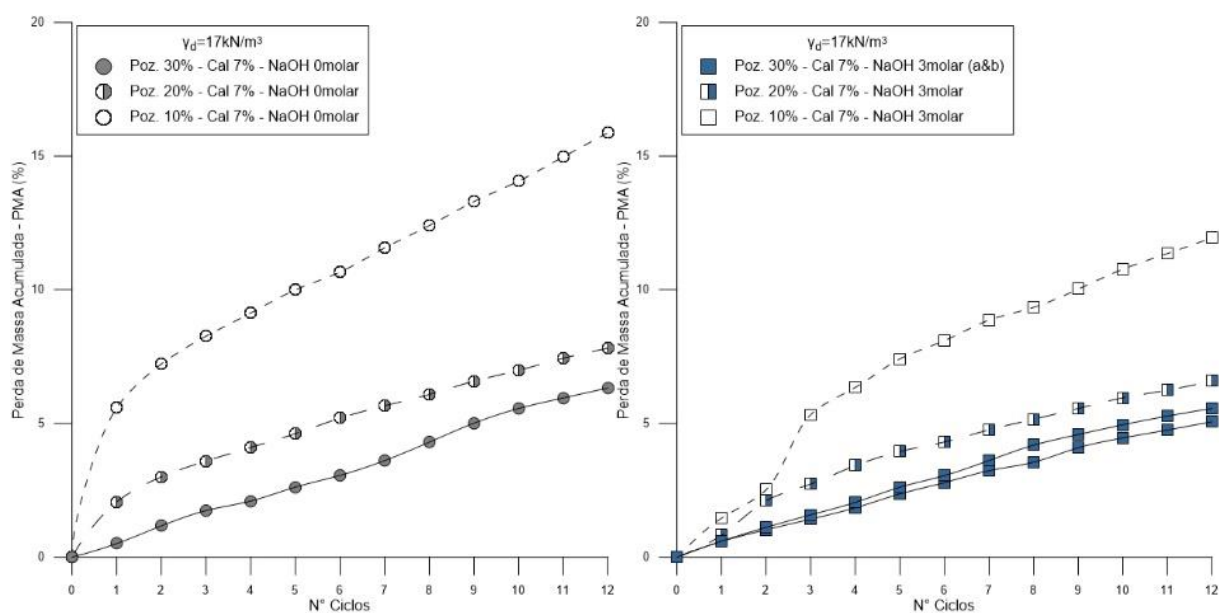


Figura 57 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com $\gamma_d = 17\text{kN/m}^3$ para sete dias de cura

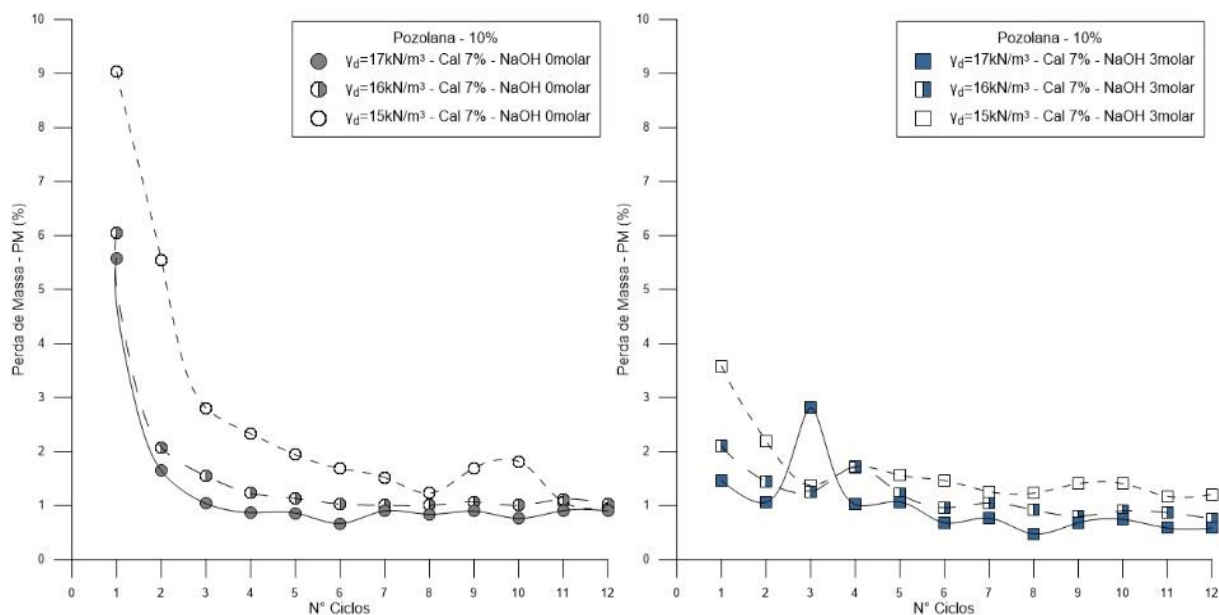


Figura 58 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=10% para sete dias de cura

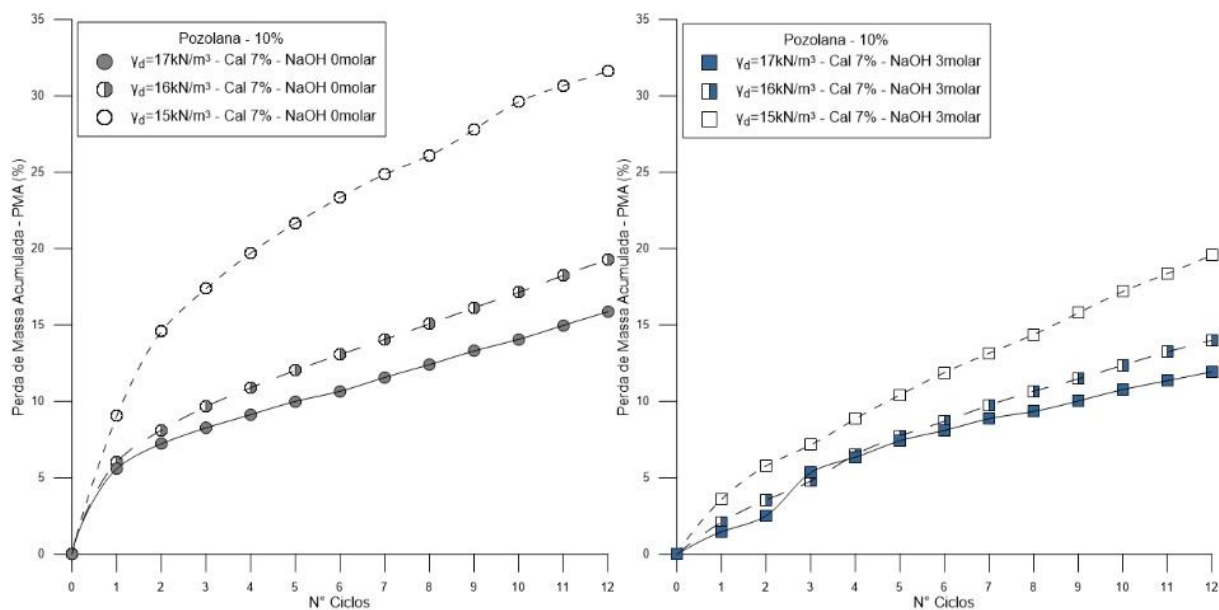


Figura 59 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molal e (b) 3 molal, com poz.=10% para sete dias de cura

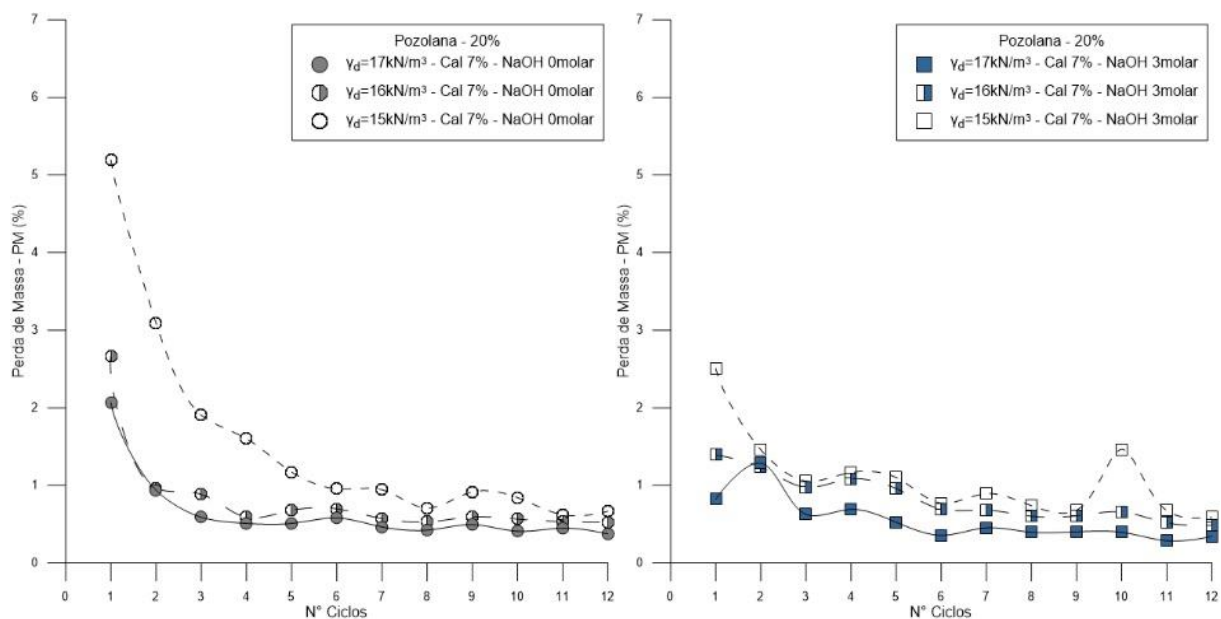


Figura 60 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molar e (b) 3 molar, com poz.=20% para sete dias de cura

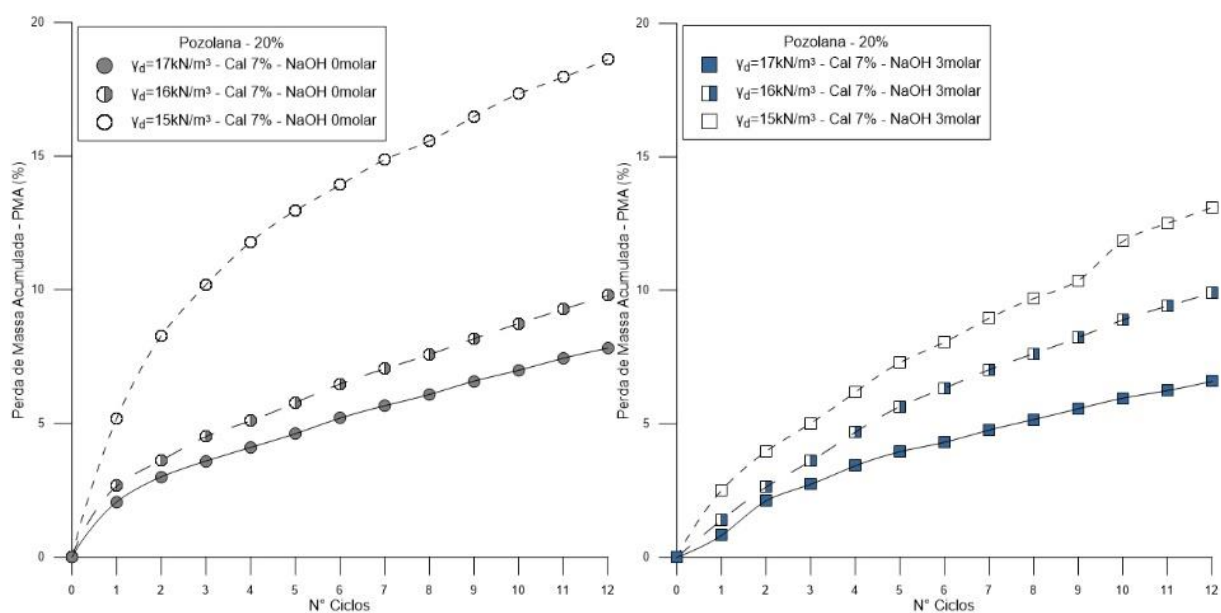


Figura 61 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molar e (b) 3 molar, com poz.=20% para sete dias de cura

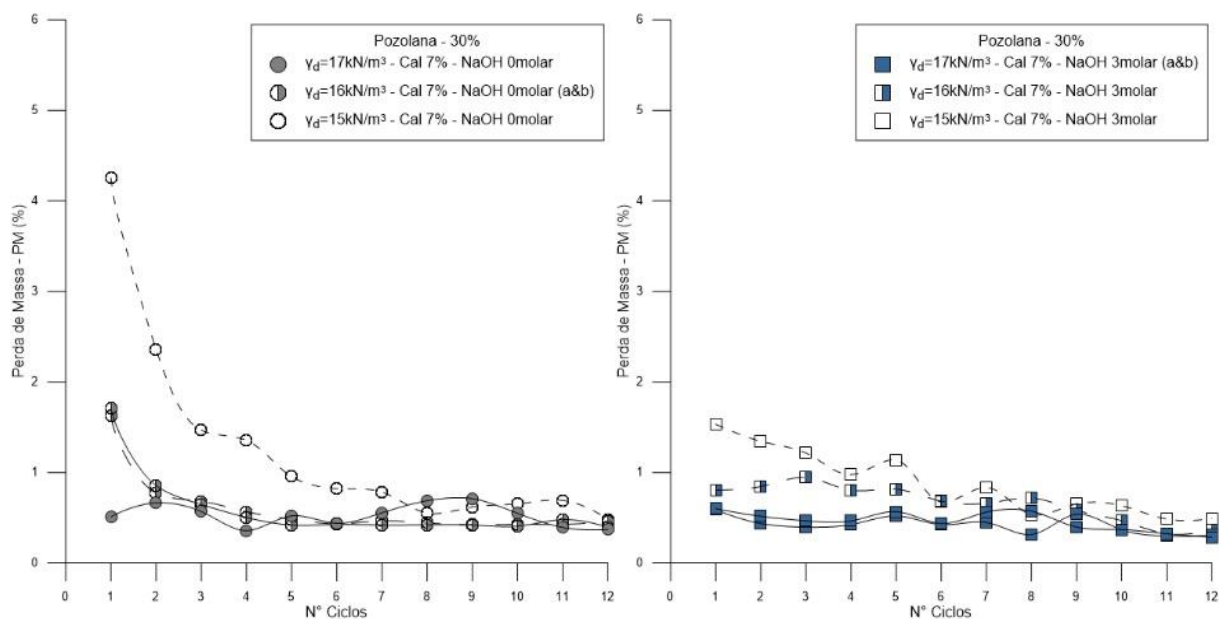


Figura 62 –Perda de massa por ciclo para (a) 0 molar e (b) 3 molar, com poz.=30% para sete dias de cura

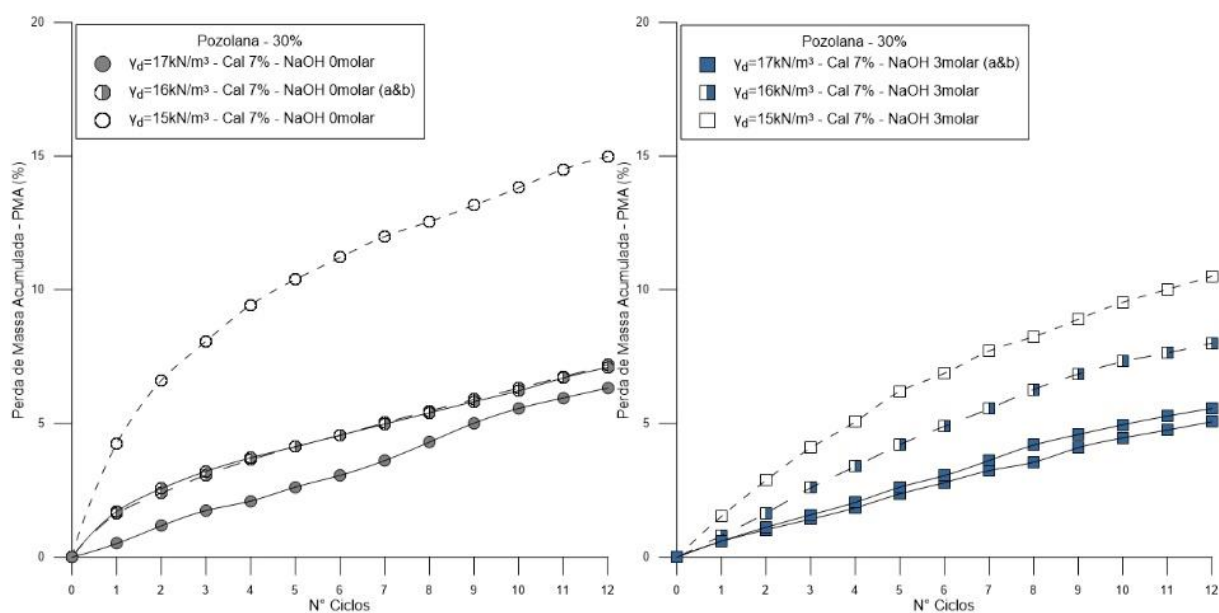


Figura 63 –Perda de massa acumulada por ciclo para (a) 0 molar e (b) 3 molar, com poz.=30% para sete dias de cura

Tabela 18 – Resultados para PMA após 12 ciclos

$\gamma_d=15\text{kN/m}^3$		$\gamma_d=16\text{kN/m}^3$		$\gamma_d=17\text{kN/m}^3$	
Poz / NaOH	PMA(%)	Poz / NaOH	PMA(%)	Poz / NaOH	PMA(%)
10% - 0	31,62	10% - 0	19,28	10% - 0	15,87
10% - 3	19,57	10% - 3	13,99	10% - 3	11,94
20% - 0	18,62	20% - 0	9,79	20% - 0	7,82
20% - 3	13,10	20% - 3	9,99	20% - 3	6,59
30% - 0	14,99	30% - 0	7,21	30% - 0	6,33
30% - 3	10,51	30% - 3	8,01	30% - 3	5,07

4.4.2 Durabilidade em função do parâmetro η/B_{IV}

Conforme proposto por Consoli *et al.* (2018a) a relação entre o índice porosidade e o teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{IV}) também pode ser relacionada com o parâmetro obtido do ensaio de durabilidade, neste caso, a PMA após decorridos os 12 ciclos. A Figura 64 apresenta esta relação, onde suas curvas estão esboçadas. Sendo estas relativas a constante hidróxido de sódio, nas molalidades que vem sendo adotadas nesta dissertação, 0 e 3 molal. A partir deste gráfico, nota-se que à medida que o parâmetro η/B_{IV} diminui a recíproca ocorre na perda de massa. Como já mencionado anteriormente, tanto η/B_{IV} quanto PMA mostraram ser dependentes do grau de compactação da amostra e do teor de finos da mesma, neste contexto cal de carbureto e pozolana. Ou seja, onde telha e γ_d possuem valores mais baixos, η/B_{IV} e PMA apresentam valores mais elevados. Comparando ambas as curvas, há uma certa aproximação de valores quando η/B_{IV} e PMA são inferiores, indicando que o emprego de hidróxido de sódio não apresenta, neste caso, grande relevância. Contudo, no geral, o emprego do ativador alcalino mostrou-se significativo, uma vez que $PMA_{-3\text{molal}} < PMA_{-0\text{molal}}$ ($1,01 < 1,43$), frente ao parâmetro η/B_{IV} .

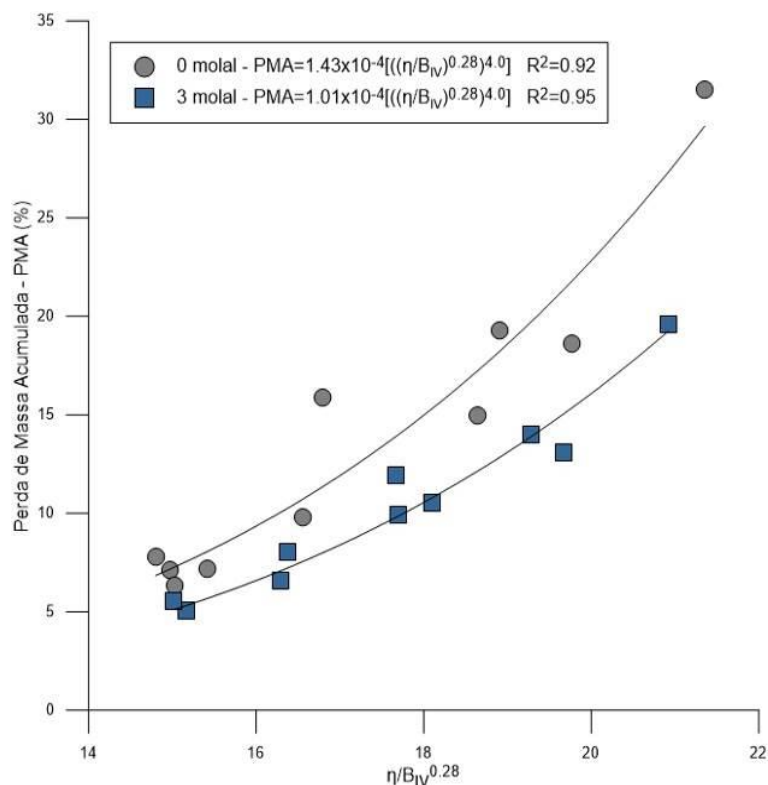


Figura 64 – Relação entre PMA e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

4.4.3 Durabilidade em função da rigidez

Decidiu-se mensurar as velocidades de propagação da onda também nos CPs de durabilidade, com o intuito de descobrir o módulo cisalhante inicial (G_0) para estes espécimes. Após concluídos os 12 ciclos do ensaio de durabilidade, aplicou-se os géis e se determinou as ondas P e S. A Figura 65 apresenta a relação entre a perda de massa acumulada (PMA) após os 12 ciclos de ensaio e o módulo cisalhante (G_0), medido no 12º ciclo. O expoente externo foi ajustado no valor de -2,1. Comparando ambas curvas representadas na Figura 65, a perda de massa acumulada da mistura se mostrou função do módulo cisalhante do material. Quanto mais rígido o CP, melhor a durabilidade. A PMA, em relação à rigidez, foi cerca de três vezes menor ao se adotar o hidróxido de sódio nas misturas do que naquelas moldadas sem sua presença $PMA_{-3molal} < PMA_{-0molal}$ ($4,57 < 12,1$).

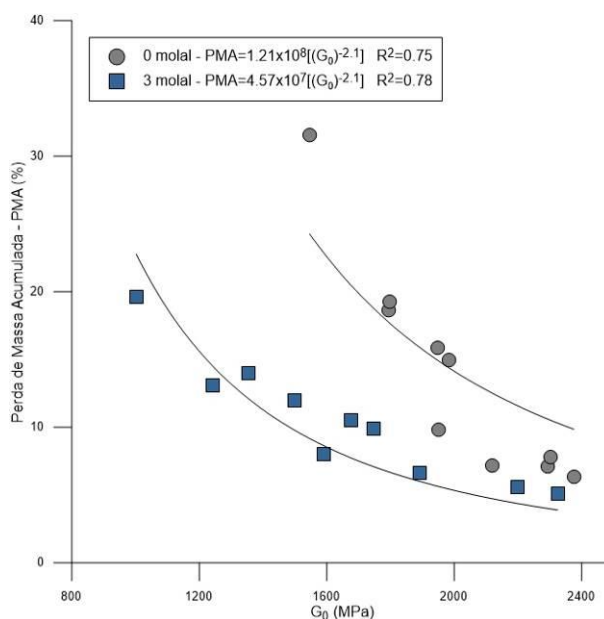


Figura 65 – Relação entre PMA e G_0 para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

4.4.4 Rigidez em função do parâmetro η/B_{IV}

Do mesmo modo que nos ensaio de RCS, percebe-se a partir do exposto na Figura 66 que o módulo cisalhante a pequenas deformações, medido no último ciclo do ensaio de durabilidade, é inversamente proporcional ao parâmetro η/B_{IV} , isto quer dizer que conforme o segundo vai diminuindo as rigidezes vão aumentando. Entretanto, de uma forma geral, o módulo cisalhante apresenta valores mais elevados nos corpos de prova onde a presença de hidróxido de sódio é inexistente. Isto é, os corpos de prova moldados apenas com água apresentaram maior rigidez ($G_{0-0\text{molar}} 10,5 > 9,11 G_{0-3\text{molar}}$). Esta afirmação é ainda mais notória nos CPs cujos grau de compactação (γ_d ; menor intertravamento entre partículas) e teor de pozolana (PTC) são menores ($\eta/B_{IV} \sim 20$).

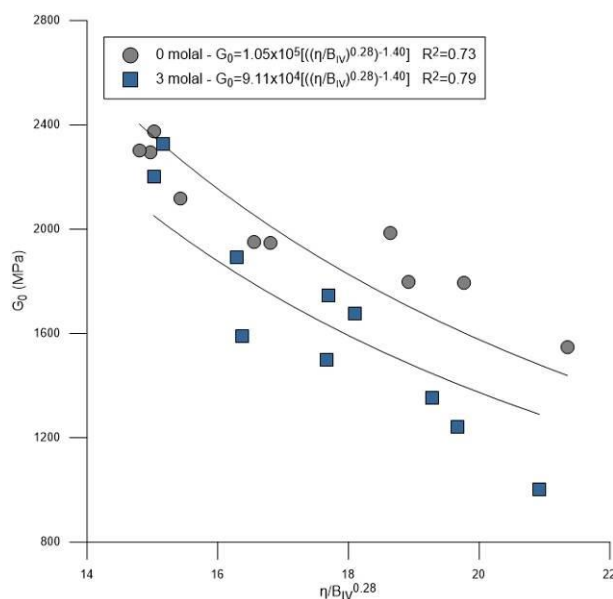


Figura 66 – Relação entre G_0 e η/B_{IV} para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

4.4.5 Análise estatística dos resultados do ensaio de durabilidade

Como já fora mencionado, o ensaio de durabilidade consiste na moldagem de corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 10 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura. Após um período de cura pré-determinado, iniciam-se os ciclos (doze) de molhagem-secagem-escovação. Decorridos os ciclos, a variável que se obtém deste procedimento é a perda de massa acumulada (PMA). Também se mensurou o módulo cisalhante inicial (G_0) destes espécimes após concluído o 12º ciclo. Deste modo, para avaliar a influência das variáveis controláveis estudadas neste trabalho em relação a estas duas variáveis respostas, elaborou-se os seguintes gráficos de Pareto e de efeitos principais (Figuras 67-70) a partir da análise dos resultados frente a um modelo estatístico. Neste capítulo, o teor de cal de carbureto é sempre constante, 7%, logo, ela deixa de ser uma variável controlável.

As Figuras 67 e 68 referem-se a variável PMA. Para ambas figuras, o peso específico aparente seco e o teor de pó cerâmico são significativos. Isto é, conforme ambos aumentam, menores são as perdas de massa dos CPs, o que já era de se esperar. Conforme um material possua um maior grau de compactação e maior intertravamento entre partículas (verificado com um melhor preenchimento de finos, também chamado de efeito filler), mais denso ele será e

melhores serão suas propriedades mecânicas. Segundo a Figura 69, o mesmo efeito foi observado ao se introduzir o ativador alcalino. Os coeficientes de determinação são 99,93% e 89,81%, respectivamente.

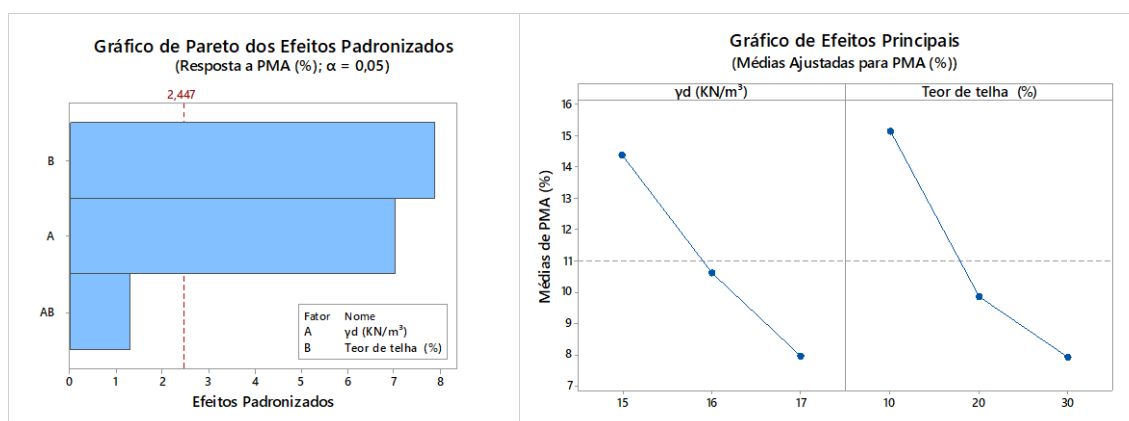


Figura 67 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de PMA para 3 molal aos 7 dias de cura

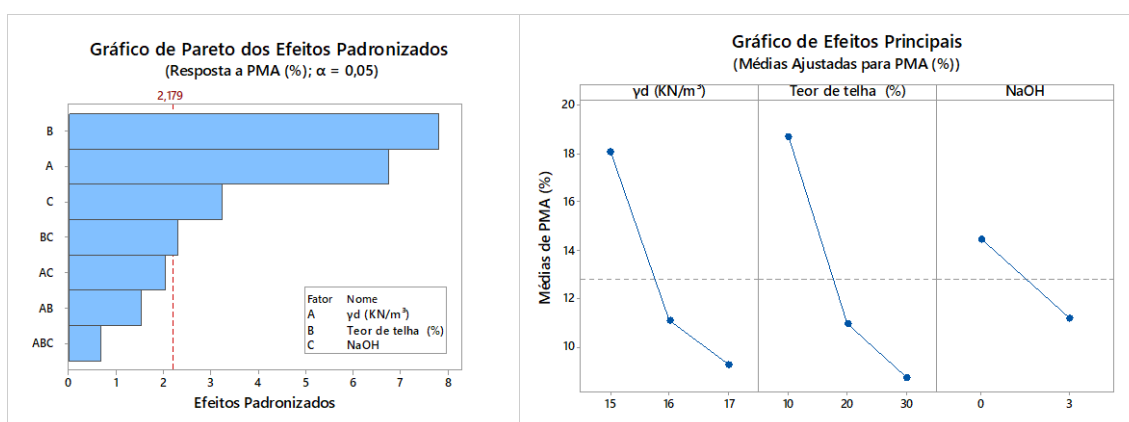


Figura 68 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de PMA para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

Referente as rigidezes dos espécimes, estão as Figuras 69 e 70. Nos dois casos, nota-se que tanto o peso específico quanto o teor de pozolana têm relevância nos aumentos de rigidez. Na segunda figura (Figura 70), observa-se o mesmo efeito ao se comparar os CPs ativados com o hidróxido de sódio frente aqueles que contém apenas H₂O, contudo, esta variável (NaOH) é apenas a terceira na ordem de relevância (Figuras 68 e 70), isto pode ser dado pela interferência da temperatura de secagem (ao se colocar na estufa, na realização dos ciclos), fazendo com que esta variável atuasse como catalizador e deste modo ocorresse aceleração das reações nos corpos de prova. Outra ponderação a ser feita, é que em ambas as misturas, as

variáveis independentes apresentam níveis de significância similares e nenhum dos efeitos de segunda ordem aparenta ser relevante. R^2 são respectivamente de 99,49% e 92,11% em tais casos.

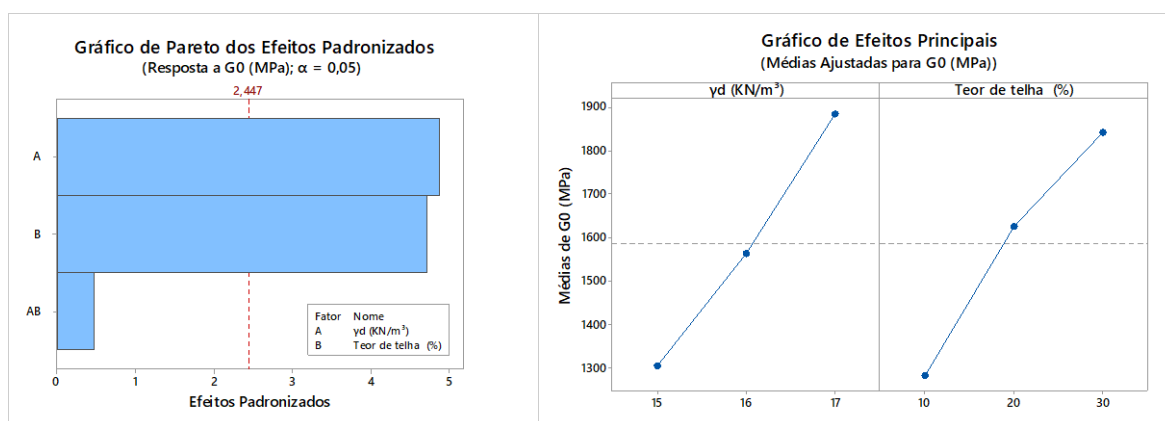


Figura 69 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 3 molal aos 7 dias de cura

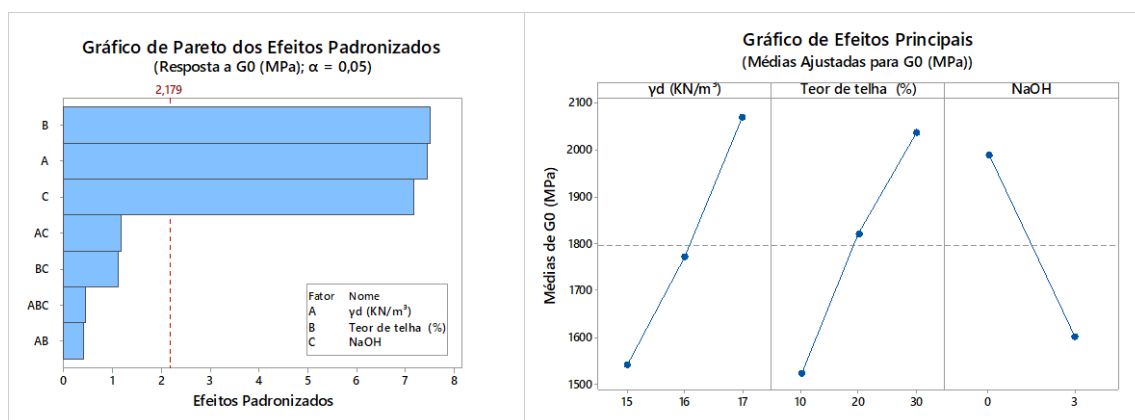


Figura 70 – Gráficos de (a) Pareto e (b) Efeitos Principais de G_0 para 0 e 3 molal aos 7 dias de cura

4.5 ENSAIOS DE MICROESTRUTURA

O mecanismo de estabilização alcalina dos solos pode ser analisado sob dois aspectos (CASTRO, 1995): o macroscópico e o microscópico. O segundo engloba as etapas que são perceptíveis a olho nu; o segundo, aquelas que se processam a um nível mais fundamental, inter-particular, molecular e atômico. Interessa-se particularmente o que ocorre a este nível, já que se objetiva estudar a reatividade química dos solos frente a aditivos estabilizantes.

Com o intuito de avaliar e caracterizar a microestrutura da mistura solo-cal-pozolana e o efeito do incremento do hidróxido de sódio nas misturas, um par de ensaios de difratometria de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplados com espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) foram realizados. Os ensaios de cunho mecânico realizados nesta pesquisa, durabilidade, rigidez e resistência à compressão simples, mostraram-se função das variáveis controláveis peso específico, teor de telha e teor de cal de carbureto. Por isto, a mistura de areia de Osório, $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$, CC – 10% e PTC – 30% foi a combinação que apresentou os melhores resultados. Os ensaios de microestrutura são provenientes destes CPs, sendo um com NaOH e outro sem. As amostras analisadas (na forma de pó ou fragmento, dependendo da técnica utilizada) foram previamente tratadas (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 1996) com acetona de pureza analítica e etanol para paralisar as reações em uma idade de cura predeterminada (28 dias).

4.5.1 Difração de raios-X

A difração de raios-X (DRX) é o método mais amplamente empregado para a identificação de minerais do solo de granulometria fina e o estudo de sua estrutura cristalina (MITCHELL; SOGA, 2005). Este ensaio permite identificar e quantificar diferentes fases presentes em uma amostra. Segundo Scheuermann Filho (2019) a ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal emitido e difratado é da mesma magnitude do espaçamento atômico entre os planos cristalinos dos argilominerais. Sua interpretação se dá a partir da comparação entre o difratograma obtido em um ensaio com padrões pré-catalogados (banco de dados). Assim, é possível identificar as fases minerais presentes em uma amostra.

A identificação dos argilominerais presentes em um solo se torna bastante complexa em virtude da presença de partículas minerais maiores (não argilominerais), como quartzo, feldspato e carbonatos, que podem mascarar o sinal difratado dos argilominerais. Portanto, para a correta identificação e interpretação das fases minerais em um material, o mesmo deve ser precedido por um processo prévio de separação da fração de interesse, seguida pela correta preparação da porção de material escolhido para o ensaio (SCHEUERMANN FILHO, 2019).

Com isto, os fragmentos seleccionados dos CPs passam por um processo de destorroamento e peneiramento (*mesh* #325) para separar a fração grosseira de quartzo (areia de Osório) da fração de interesse. Desse modo, a Figura 71 ilustra, os difratogramas correspondentes às misturas solo- γ_d -17-CC-10-PTC-30-NaOH-0 e solo- γ_d -17-CC-10-PTC-30-NaOH-3, ambos aos 28 dias de cura, e do pó de telha cerâmica e cal de carbureto para fins de comparação.

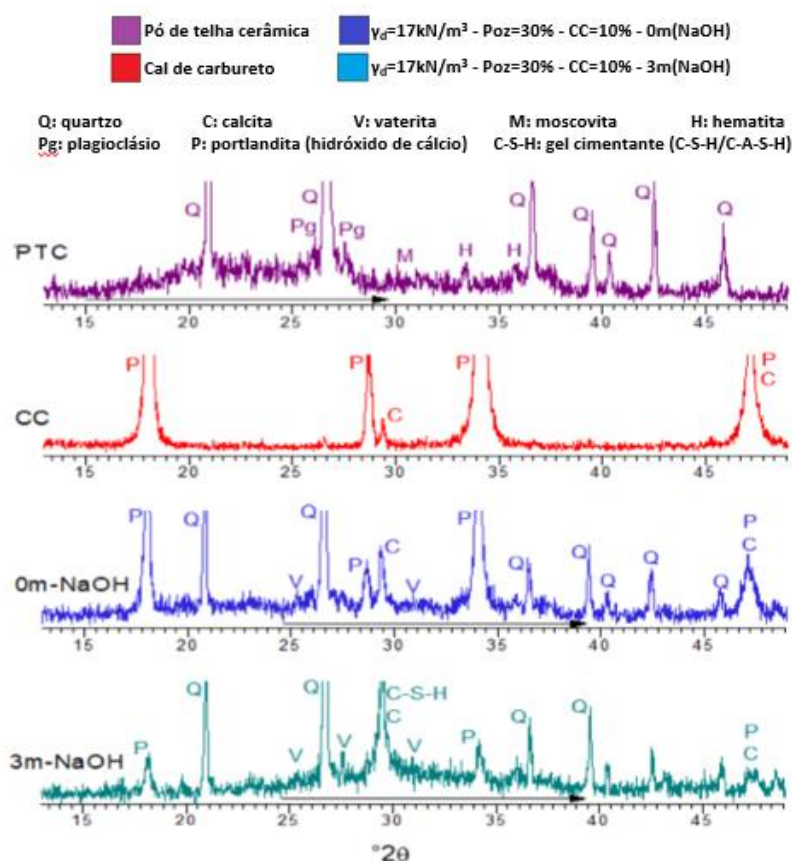


Figura 71 – DRX: identificação dos (argilo)minerais

Conforme pode ser observado na Figura 71, mineralogicamente, a cal de carbureto é constituída sobretudo por portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) com pequenas quantidades de calcita (CaCO_3), devido à carbonatação. Referente ao resíduo cerâmico, nota-se a presença de uma curvatura principalmente entre 15° - 30° 2θ , indicando a presença de conteúdo amorfo. Os difratogramas das misturas CC+PTC à base de água ou hidróxido de sódio apresentados na Figura 71 revelam a presença das principais fases cristalinas, como o quartzo (Q) e a portlandita (P), já identificadas nos materiais que dão base a estas misturas, neste contexto a cal de carbureto e o pó de telha cerâmica. A detecção dessas fases significa que a sua

formação original, ou seja, a sua natureza cristalina, tornou-as praticamente indiferentes ao estágio de dissolução do processo de ativação alcalina e não traduz a formação de novas fases mineralógicas, no que concerne a esta parte já cristalizada do material. Isto é, as reações que ocorrem neste material são devidas as reações pozolânicas, e estas ocorrem gradativamente (lentamente). É esperado que conforme o passar do tempo, estes picos de portlandita (P) possam ser dissolvidos.

Na mistura contendo o hidróxido de sódio, o difratograma mostra uma menor intensidade dos picos característicos da portlandita, em comparação com as pastas de 0m-NaOH, revelando uma maior eficácia desse ativador na dissolução dos íons de cálcio disponíveis no precursor. Além disso, um aumento considerável na intensidade da curvatura (fase amorfa, 25° - 40° 2θ) pode ser visto nas misturas ativadas alcalinamente. Este gel amorfo que com o tempo tende a cristalizar e buscar sua estabilidade termodinâmica (gel tipo [N/C-A-S-H] - difícil de se detectar no DRX). Também, novos picos de difração, associados à formação de novas fases mineralógicas, são detectados. Na pasta 3m-NaOH surgiram picos de difração característicos do gel C-(A)-S-H (principalmente a $2\theta=29,15^{\circ}$), evidenciando sua alta ordem estrutural (correspondendo a uma estrutura semicristalina) como resultado da inclusão da solução alcalina. A soma de diferentes tipos de géis cimentantes alcalinos (aluminossilicato de cálcio-sódio hidratado [N/C-A-S-H] e aluminossilicato de cálcio hidratado/ silicato de cálcio hidratado [C-(A)-S-H]) fazem com que o cimento elaborado nesta dissertação seja do tipo híbrido. Cimentação está que é responsável pelo aumento das propriedades mecânicas dos corpos de prova. Cabe ressaltar que a obtenção desta cimento alcalino (híbrido, com a presença de NaOH) se dá pelas características dos materiais empregues em sua composição, dito isso a telha cerâmica, a cal de carbureto e o ativador alcalino, hidróxido de sódio.

Por fim, observou-se a formação de produtos secundários como calcita (C) e vaterita (V), basicamente por processos de carbonatação, tanto na pasta à base de água quanto aquela contendo NaOH.

4.5.2 Microscopia eletrônica de varredura com EDS

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem como objetivo principal a caracterização química de amostras. Seu emprego está difundido em diversas áreas do conhecimento, incluindo a geotecnia. O uso desta técnica se torna cada vez mais frequente por auxiliar na obtenção de detalhadas informações pertinentes ao objeto de estudo. A técnica consiste na incidência de um feixe de elétrons com intuito de gerar uma variedade de sinais à superfície de uma amostra. Os sinais obtidos das interações entre as partículas e amostra revelam informações acerca desta última, tais como: morfologia externa (textura), composição química e estrutura cristalina a nível macroscópico. Os dados são coletados ao longo de uma área da superfície da amostra e é gerada uma imagem dimensional que mostra as variações espaciais nestas propriedades. A imagem eletrônica de varredura é gerada pela emissão de elétrons retroespalhados (representado pela sigla BSEM, back-scattering electron microscopy, em inglês) e demonstra as diferenças composicionais na região ionizada do mineral. O volume da região ionizada depende do número atômico (Z) médio da zona de interação do mineral com o feixe de elétrons. As imagens BSEM são representadas em tons de cinza (Figuras 72a e 73a), onde os tons claros correspondem às porções constituídas por elementos com Z médio relativamente maior do que aquelas com tons mais escuros (DUARTE *et al.*, 2003; COXITO, 2016).

Ao MEV pode ser acoplado o sistema de espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS - energy dispersive spectroscopy, em inglês), o qual possibilita efetuar análises ponto-a-ponto, tornando-se uma abordagem útil na determinação qualitativa e quantitativa da composição química da amostra (COXITO, 2016). Dentre as vantagens do sistema EDS, segundo Duarte *et al.* (2003) destacam-se os perfis e mapas químicos que possibilitam o estudo da zonação das “gemas”. O perfil químico determina a variação da composição da gema ao longo de uma linha preestabelecida, como por exemplo, borda-núcleo-borda. O mapa químico quantifica a composição de uma área do mineral exposta ao feixe de elétrons. Desta forma, este mapa pode representar a distribuição dos elementos *chromóforos* (elemento que possui muitos elétrons e que possui a capacidade de absorver energia ou luz visível) em determinadas gemas (zonas). Ainda segundo os mesmos autores, outra das vantagens da utilização do MEV-EDS é a simplicidade na preparação das amostras. Para fins gemológicos, as amostras de minerais podem ser brutas, polidas ou até mesmo lapidadas, desde que as

características morfológicas ou inclusões a serem estudadas (clivagem, fraturas, zonação, inclusões sólidas, etc.) estejam expostas na superfície analisada, possibilitando sua interação com o feixe de elétrons.

Com o objetivo de avaliar a adição do hidróxido de sódio nas misturas, os resultados das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS) estão representados nas Figuras 72 (sem NaOH) e 73 (NaOH presente). As amostras analisadas foram previamente tratadas com acetona de pureza analítica e etanol para paralisar as reações decorridos 28 dias de cura. Posteriormente, os fragmentos das amostras utilizado neste ensaio foram polidos. Estas amostras são provenientes dos mesmos espécimes utilizados no ensaio DRX.

As imagens de MEV-EDS apresentam algumas diferenças morfológicas entre a mistura do solo + cal + pó de telha cerâmica ativada com água (Figura 72) e ativador alcalino (Figura 73). Aparentemente, essas imagens revelam um maior grau de ligação entre as partículas de areia (regiões predominantemente vermelhas) e os produtos de reação (gel de cimentação) na amostra onde o hidróxido de sódio faz-se presente (Figura 73). Ademais, é possível observar que esse cimento também apresenta uma heterogeneidade aparentemente menor nas áreas circundantes às partículas do solo, em comparação com os cimentos ativados apenas com água destilada.

Para verificar a composição química de algumas zonas de interesse, 2 pontos são selecionados em cada ensaio, com auxílio da técnica EDS. As análises de composição elementar da região do gel de material à base de água, representadas pelos pontos A e B na Figura 72, mostram a formação de um gel do tipo silicato/aluminossilicato de cálcio hidratado (C-(A)-S-H), caracterizado por seu alto teor de cálcio, que se originou da reação pozolânica entre o pó de telha cerâmica e o cálcio presente na cal de carbureto. Cabe ressaltar que estes pontos identificam os componentes elementares que formam o composto, e quanto mais intenso o pico, maior a presença de tal elemento químico.

Os pontos C e D da Figura 73, provenientes do produto cimentício da unidade contendo hidróxido de sódio (3 molal), por outro lado, evidenciam um maior teor de aluminossilicatos no gel formado, que pode ser classificado como tipo N/C-A-S-H (aluminossilicatos de sódio-cálcio hidratado), transformando este gel em um cimento alcalino – híbrido. A redução no

teor de cálcio do gel de 3m-NaOH, em relação ao cimento à base de água, produz uma maior polimerização dos silicatos, o que justifica a cristalinidade relativamente mais alta previamente identificada nas análises de DRX.

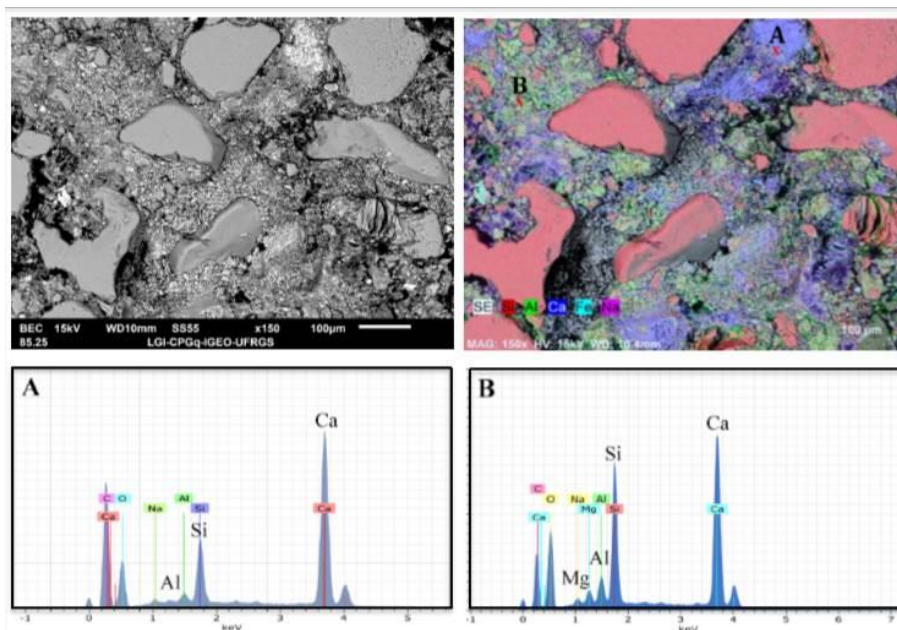


Figura 72 –MEV-EDS para mistura sem NaOH

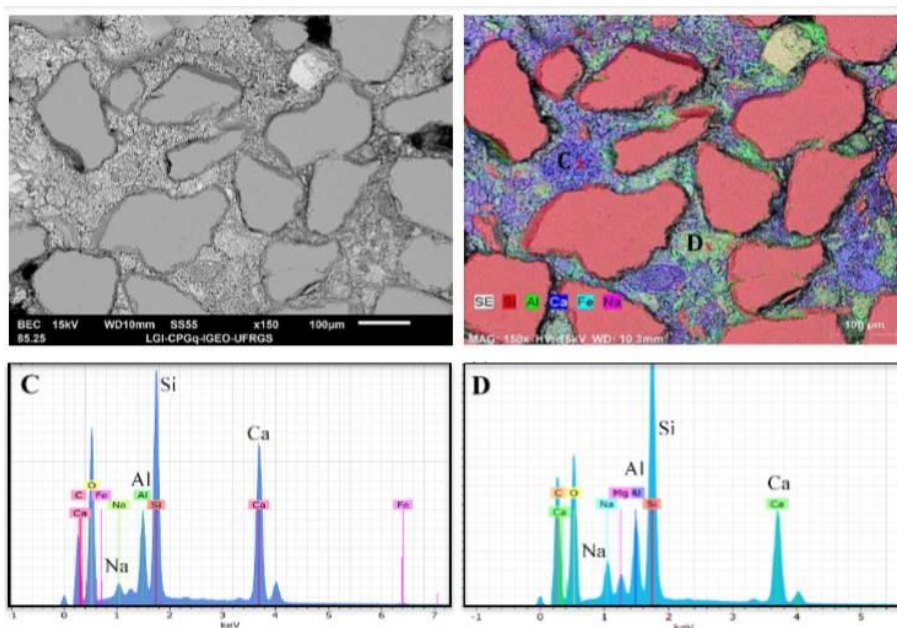


Figura 73 – MEV-EDS para mistura com 3 molal de NaOH

5 CONSIDERAÇÃO FINAIS

Apresenta-se neste último capítulo as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. As conclusões obtidas na presente pesquisa são descritas nos próximos parágrafos.

5.1 CONCLUSÕES

Assim, o objetivo principal do presente trabalho foi investigar o desempenho mecânico de um solo arenoso adicionado de pó de telha cerâmica e cal de carbureto, ambos considerados resíduos, com e sem adição de uma solução de hidróxido de sódio. A redução no consumo do cimento e a adequada destinação de resíduos (industriais, entre outros) também justificam a crescente utilização destes minerais (resíduos) no ramo da construção civil, diminuindo assim, a quantidade de passivos ambientais oriunda de sua atividade.

A combinação da cal de carbureto e pó de telha cerâmica, quando finamente diminuídos, mostrou-se funcional para ser utilizado como agente cimentante, o que foi verificado nos ganhos de resistência, rigidez e durabilidade nas misturas avaliadas.

O resíduo cerâmico (material pozolânico) em análise atendeu aos requisitos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), no qual, a soma dos compostos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é igual a 93,68%, valor superior ao mínimo estabelecido por essa norma, que é de 70% (classe N). A composição química da cal de carbureto foi determinada através do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), evidenciando que o material é constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO – 97,86%).

Referente a adição da base alcalina (NaOH) nas misturas, verificou-se que existe um valor de pico (ótimo), sendo obtidos valores crescentes de resistência com o aumento da molalidade até este pico (3 molal). Após, a resistência tende a decrescer com o aumento da concentração molal. A incorporação da solução de hidróxido de sódio em 3 molal implicou em melhora substancial considerando a resistência, a rigidez e a durabilidade dos corpos de prova ensaiados quando comparados aos moldados e testados sem esta solução alcalina, após 7 dias, onde a proporção de aumento foi mais significativa, ou 28 dias de cura.

O tempo de cura e o peso específico aparente seco (γ_d), assim como os teores de cal de carbureto, pó de telha cerâmica e o hidróxido de sódio, apresentaram ser fundamentais nas misturas artificialmente cimentadas. Conforme eles foram aumentados, melhor foi a resposta frente ao comportamento mecânico.

O ganho de resistência, verificado através do ensaio de resistência à compressão simples, com a estabilização alcalina de misturas de areia, pó de telha cerâmica e cal de carbureto, apresentaram os seguintes resultados, considerando: aos sete dias de cura – a mistura OS-15-10-4-3-7, (leia-se Areia de Osório (OS), γ_d , teor de pó de telha, teor de cal de carbureto, concentração molal e tempo de cura), que contém todas variáveis em menor nível, resultou em 839,2 kPa, já a mistura OS-17-30-10-3-7, que contém as variáveis nos seus níveis máximos, dos teores adotados, obteve 4003,6 kPa, sendo a segunda um reflexo de um composto mais resistente; aos vinte e oito dias de cura – a mistura OS-15-10-4-3-28, resultou em 1056,2 kPa, e a mistura OS-17-30-10-3-28 resultou em 7001,6 kPa (mistura que apresentou as melhores taxas de RCS), concluindo-se que quanto maior os teores das variáveis consideradas, mais resistente se tornou a mistura.

Para o módulo cisalhante a pequenas deformações (G_o), verificou-se a mesma tendência que no ensaio descrito anteriormente, ou seja, quanto maiores foram os teores dos ligantes (CC + PTC), o peso específico aparente seco e o acréscimo no tempo de cura, mais rígida se tornou a mistura. A relação entre a resistência à compressão e o módulo cisalhante se mostrou linear, explicando assim a similaridade nas correlações obtidas para ambos os fatores.

No ensaio de durabilidade, avaliado através de ciclos de molhagem/secagem e escovação, após 7 dias de cura, observou-se que, de modo geral, o emprego do ativador alcalino, do γ_d e do pó de telha se mostraram significativos, uma vez que a PMA nos espécimes com NaOH (3 molal) foram menores que nas misturas ativadas apenas por água, o mesmo se aplicou ao se elevar os teores de γ_d e do resíduo cerâmico, aumentando o grau de compactação e diminuindo o índice de vazios dos CPs. Não foi avaliada nesta dissertação a influência da temperatura de secagem durante a realização dos ciclos de molhagem-secagem, entretanto, deduz-se que ela tenha atuado como catalizadora para aceleração das reações.

Consoli et al. (2018a) estabeleceram o parâmetro η/BIV visando expressar em apenas uma relação à combinação dos efeitos da porosidade e o teor volumétrico de ligante, sendo este a

soma dos teores de pozolana e cal no comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados. Os resultados mecânicos (representados pelos parâmetros q_u , G_0 e PMA) puderam ser correlacionados, com eficácia, entre si e ao índice de porosidade/ligante ajustado ($\eta/B_{IV}^{0.28}$), resultando em relações capazes de prever a resposta dos corpos de prova testados. Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com os de Daassi-Gli (2020), já que este autor emprega em sua pesquisa uma metodologia e materiais semelhantes a esta, sendo a exceção a pozolana que no caso de Daassi-Gli foi o pó de vidro e neste resíduo cerâmico, o resultado obtido demonstra que houve ganhos de resistência mais elevados quando às misturas adicionou-se o material cerâmico,

Pode-se avaliar através de um software de análise estatística a significância das variáveis, como quais das variáveis tiveram maior influência sobre os resultados obtidos, dada uma determinada variável resposta, combinando todos os fatores e níveis estudados para cada variável controlável. De um modo geral, as cinco variáveis controláveis se mostraram significativas, alternando sua ordem de significância dado o tipo de ensaio e as condições (fatores) que foram analisadas.

Por fim, as caracterizações mineralógicas consistiam em avaliar a transformação na mineralogia do solo decorrente das adições empregadas, bem como verificar a formação de algum composto ligante de natureza cristalina. Assim, os resultados de DRX e MEV-EDS revelaram a formação de um gel cimentício do tipo C-(A)-S-H (pozolânico) nos espécimes ativadas por hidróxido de cálcio (gel sem a presença de NaOH). E do tipo [N/C-A-S-H] nas pastas ativadas por álcalis após 28 dias de cura. Este gel foi caracterizado por um alto teor de aluminossilicatos em sua composição e um arranjo estrutural mais alto (facilmente detectável na DRX) em comparação com os produtos da reação pozolânica das pastas compactadas apenas com água.

As análises de composição, obtidas a partir de ensaios DRX e BSEM-EDS, estabelecem a possível coexistência de géis de aluminossilicato de cálcio hidratado [C-(A)-S-H] e de aluminossilicato alcalino hidratado [(N,C)-A-S-H] nas pastas álcali-ativadas, em comparação àquelas que ocorrem ‘apenas’ as reações pozolânicas, dando origem a um cimento alcalino (híbrido).

Os ligantes álcali-ativados empregados nesta pesquisa apresentaram comportamento compatível com o de um cimento híbrido (com a presença de hidróxido de sódio, base alcalina) e pozolânico (sem NaOH), onde ocorreu cimentação entre as partículas, quando adicionados à areia de Osório, o solo em questão, aprimorando suas propriedades, o que culminou em ganhos mecânicos. A telha cerâmica, material rico em aluminossilicatos, somado de uma fonte de cal (CC), mais o hidróxido de sódio (NaOH), que é utilizado como catalisador e acelerador das reações, demonstraram grande potencial para serem empregados como cimentos (alcalinos/pozolânicos) alternativos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- a) Realizar ensaios promovendo a cura dos CPs em outros meios, como água do mar, em temperaturas mais elevadas, etc.;
- b) Realizar novas testagens com os mesmos compostos, a partir de ensaios de fadiga, triaxial, lixiviação, dentre outros;
- c) Fazer o uso de pozolanas alternativas ao posto da telha cerâmica;
- d) Verificar o desempenho das misturas estudadas para tempos de cura mais longos, como 90 e 365 dias;
- e) Idealizar um projeto fatorial completo, com a possibilidade de inclusão de mais níveis em cada um dos fatores controláveis;
- f) Produzir novos compostos a partir de outros tipos de ativadores alcalinos, como o hidróxido de potássio;
- g) Avaliar a influência da utilização de diferentes fontes de cal;
- h) Realizar análise de ciclo de vida;

- i) Analisar a influência da temperatura nas reações dos corpos de prova, inclusive nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem;
- j) Aplicar metodologias de ensaios mineralógicos para ensaios outros tipos de ensaios, como o ensaio de durabilidade durante e após o término dos ciclos.

REFERÊNCIAS

AMANKWAH, E. O.; BEDIAKO, K.; KANKAM, C. K. Influence of Calcined Clay Pozzolana on Strength Characteristics of Portland Cement Concrete, *International Journal of Materials Science and Applications*. v. 3, n. 6, p. 410-419, 2014.

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.

ARAÚJO, R. A.; de MENEZES, A. L. R.; CABRAL, K. C.; NÓBREGA, A. K. C.; MARTINELLI, A.; E. DANTAS, K. G. M. Avaliação da atividade pozolânica do resíduo de cerâmica vermelha por meio de métodos mecânicos e físico-químicos. *Cerâmica*, v. 65, p. 461-469, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2013**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 08 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004e.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012b.

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 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Dados do setor**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: < <http://www.anicer.com.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

AY, N.; ÜNAL, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concrete Research**, v. 30(3), p. 497–499, 2000.

AZEVEDO, A. R. G., VIEIRA, C. M. F., FERREIRA, W. M., FARIA, K. C. P., PEDROTI, L. G., MENDES, B. C. Potential use of ceramic waste as precursor in the geopolymerization reaction for the production of ceramic roof tiles. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. 10, 2020.

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.

BERNAL, S. A.; de GUTIÉRREZ, R. M.; PROVIS, J. L. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 99–108, 2012.

BERNAL, S. A.; VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS J. L. What Happens to 5-Year-Old Metakaolin Geopolymers' the Effect of Alkali Cation. In: Scrivener, K.; Favier, A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, v. 10. Springer, Dordrecht, 2015.

BLEZARD, R. G. The History of Calcareous Cements. In: HEWLETT, Peter C. (Ed.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed., Burlington: Elsevier, p. 1-24, 1998.

BRASIL. **Lei nº 9605** de 1998: Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de lei de crimes ambientais, condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (Lei de Crimes Ambientais). Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília/DF. 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n.º 307**, de 17 de julho de 2002. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 348**, de 17 de agosto de 2004. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 420**, de 28 de dezembro de 2009. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.305** de 2010. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília/DF, 2010.

BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa. Brasil. 2. ed. Brasília/DF, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

BRASILEIRO, L. L. e MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**. v.61, São Paulo, 2015.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, p. 448-460, 2009.

CARNEIRO, A. P., BRUM, I. A. S., CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA. 312 p., 2001.

CASTRO, F. J. C. O. **Um estudo físico-químico – matemático de estabilização alcalina de solos argilosos**. Dissertação de mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.

CASTRO, F. J. C. O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)**. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

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

CONSOLI, N. C.; CARRETTA, M. S.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; TOMASI, L. F. Strength and Stiffness of Ground Waste Glass-Carbide Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, 2019.

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

CONSOLI, N. C.; LOPES JR., L. S.; HEINECK, K. S. Key parameters for the strength control of lime stabilized soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 5, p. 210-216, 2009.

CONSOLI, N. C.; DALLA-ROSA, A.; SALDANHA, R. B. Variables Governing Strength of Compacted Soil-Fly Ash-Lime Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.23, n.4, p. 432- 440, 2011.

CONSOLI, N. C.; FERREIRA, P. M. V.; TANG, C.-S.; MARQUES, S.F.V.; FESTUGATO, L.; CORTE, M. B. 2016. "A unique relationship determining strength of silty/clayey soils: Portland cement mixes." **Soils and Foundations**, v. 56, n. 6, p. 1082-1088, 2016.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. N.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Durability, strength and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144, n. 9, 2018a.

CONSOLI, N. C.; MARIN, E. J. B.; SAMANIEGO, R. A. Q.; HEINECK, K. S.; JOHANN, A. D. R. Use of sustainable binders in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, 2018b.

CORRÊA-SILVA, M.; ARAÚJO, N.; CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; GOMES, A. T.; COELHO, J. Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications. **Road Materials and Pavement Design**, 2018.

COXITO, A. M. T. **Estudo de ligas de ouro por XRF e SEM-EDS**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2016.

CRISTELO, N. M. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2001.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; PINTO, A. T. Deep soft soil improvement by alkaline activation. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement**, v. 164, n. 2, p. 73-82, 2011.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; FERNANDES, L.; PINTO, A. T. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 167–174, 2012a.

CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D.; SILVA, R. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 727–735, 2012b.

CRISTELO, N.; SOARES, E.; ROSA, I.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D. V.; SILVA, R. A.; CHAVES, A. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 925–933, 2013.

CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D. V.; ROSA, I.; SOARES, E.; COELHO, P.; FERNANDES, L. Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO₂ (eq) emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 447-460, 2015.

CRISTELO, N.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; VIEIRA, C.; MIRANDA, T.; PALOMO, A. Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 26–39, 2018.

DAASSI-GLI, C. A. P. **Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro, Cal de Carbureto e Hidróxido de Sódio (NaOH)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

DALLA ROSA, F. **Comportamento mecânico de um solo cimentado curado sob tensão em ensaios triaxiais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2009.

DANNER, T.; JUSTNES, H.; NORDEN, G.; ØSTNOR, T. Feasibility of Calcined Marl as an Alternative Pozzolanic Material. In: Scrivener, K.; Favier, A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, v. 10. Springer, Dordrecht, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **Norma DNIT ME 419: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio**. 8 p., Rio de Janeiro, 2019.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; PECCIN, A.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.143, n. 5, 2017.

DUARTE, L. C.; *et al.* Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, v. 30, n. 2, p. 3-15, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

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.

FADALY, E.; MOSTAFA, M.; SARAYA, M. E. I.; NASSAR, F. A.; SOKKARY, T.; DIDAMONY, H. Ecofriendly Cement from Ceramic Waste Geopolymerization. **Impact Journals**, v. 2, n. 5, 195-210, 2014.

FARIAS FILHO, J.; de ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaulinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v.4, n.3, p. 437-444, 2000.

FERNÁNDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 113-122, 2011.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L. Procesos de activación alcalino - sulfáticos de una escoria española de alto horno. **Materiales de Construcción**, v. 46, n. 241, 1996.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: Influence of the type of alkaline activator. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 86, n. 8, p.1389-1394, 2003.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; LÓPEZ-HOMBRADOS, C. Engineering Properties of alkali-activated Fly Ash Concrete. **ACI Materials Journal**, n. 103, 2006.

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.

GARCIA, E.; *et al.* Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico. **Cerâmica Industrial**, 2014.

GUIA DO CONSTRUTOR. **Tipos de telhas de cerâmica.** Disponível em: <<https://www.guiadoconstrutor.com.br/blog/6-principais-tipos-de-telhas-de-ceramica-para-nao-errar-no-telhado>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

HANJITSUWAN, S.; PHOO-NGERNKHAM, T.; LI, L.Y.; DAMRONGWIRIYANUPAP, N.; CHINDAPRASIRT, P. Strength development and durability of alkali-activated fly ash mortar with calcium carbide residue as additive. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 714-723, 2018.

HEAH, C.Y.; KAMARUDIN, H.; MUSTAFA Al BAKRI, A.M.; et al. Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 20, p. 313-322, 2013.

HEINECK, K. S. **Estudo da influência de cimentações introduzidas sob tensão.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JOSEPH, B.; MATHEW, G. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. **Scientia Iranica**, Transactions A: Civil Engineering, v. 19, p. 1188-1194, 2012.

JUSTNES, H.; ØSTNOR, T. A. Alternative Binders Based on Lime and Calcined Clay. In: Scrivener, K.; Favier, A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete.** RILEM Bookseries, v. 10. Springer, Dordrecht, 2015.

KIM, T. OLEK, J. Chemical Sequence and Kinetics of Alkali-Silica Reaction Part I. Experiments. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 7, p. 2195-2203, 2014.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 14, p. 1261-1277, 2007.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D.; A. VLACHOU, A.; BARTZAS, G.; GALETAKIS, M. Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers, **Advanced Powder Technology**, v. 26, p. 368–376, 2014.

KRIVENKO, P. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. **Journal of Ceramic Science and Technology**. v. 8, n. 3, p. 323-334, 2017.

LECOMTE I.; HENRIST, C.; LIÉGEOIS, M.; MASERI, F.; RULMONT, A.; CLOOTS, R. (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. **Journal of the European Ceramic Society**, 2006.

LEITÃO, D.; BARBOSA, J.; SOARES, E.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N.; BRIGA-SÁ, A. Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated fly ash. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 44-52, 2017.

LEON, H. B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento como um parâmetro de estado para areias cimentadas**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious: Advances in concrete technology**. 1. Ed. Taylor & Francis, 1996.

MANTUANO NETTO, R. **Materiais pozolânicos**. Monografia. Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma areia artificialmente cimentada até altas tensões de confinamento**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MASI, F.; STEFANOU, I.; VANNUCCI, P. A study on the effects of an explosion in the Pantheon of Rome. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 164, p. 259-273, 2018.

MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. (Org.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, p. 471 – 602, 2004.

MIRANDA, T.; SILVA, R. A.; OLIVEIRA, D. V.; LEITÃO, D.; CRISTELO, N.; OLIVEIRA, J.; SOARES, E. ICEBs stabilised with alkali-activated fly ash as a renewed approach for green building: Exploitation of the masonry mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 65-78, 2017.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3 ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9^a ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.

MOORE, R. K.; KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. Factors Affecting the Tensile Strength of Cement-Treated Materials. **Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects**, Washington, D. C: HRB, n.315, p.64-80, 1970.

MURILLO, L. M., DELVASTO, S., GORDILLO, M. A study of a hybrid binder based on alkali-activated ceramic tile wastes and Portland cement. **In Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. Elsevier Inc., p. 291–311, 2017.

MWITI, M. J.; KARANJA, T. J.; MUTHENGIA, W. J. Properties of activated blended cement containing high content of calcined clay. **Heliyon**, Elsevier, v.4, 2018.

NATH, P.; SARKER, P. K. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 22–31, 2017.

NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Lime-fly ash stabilized bases and subbases. **Synthesis of Highway Practice**, n. 37. Washington, DC: Transportation Research Board, 1976.

OLIVEIRA, M. P. de, NÓBREGA, A. F. da, DI CAMPOS, M. S., BARBOSA, N. P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. **Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social**. Pirassununga, SP: NOCMAT, 2004.

PALOMO, A. *et al.* Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, 29, 1323-1329, 1999.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de construção**. 8^a ed. Rio de Janeiro: Globo, 435 p., 1987.

POSSA, S. A.; ANTUNES, E. G. P. Proposta de reutilização do resíduo de cerâmica vermelha proveniente da construção civil e demolições no município de Criciúma, SC. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 22, Criciúma, Santa Catarina, 2016.

PUERTAS, F.; BARBA, A.; GAZULLA, M. F.; GÓMEZ, M. P.; PALACIOS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Ceramics wastes as raw material in Portland cement clinker fabrication: characterization and alkaline activation. **Materiales de Construcción**, v. 56, n. 281, p. 73-84, 2006.

PUERTAS, F., GARCÍA-DÍAZ, I., BARBA, A., GAZULLA, M. F., PALACIOS, M., GÓMEZ, M. P., *et al.* Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, n. 9, p. 798–805, 2008.

RAHHAL, V.; *et al.* Red Ceramic Wastes: A Calcined Clay Pozzolan. In: Scrivener, K.; Favier, A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, v. 10. Springer, Dordrecht, 2015.

REIG, L.; TASHIMA, M. M.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; CHEESEMAN, C. R.; PAYÁ, J. Properties and Microstructure of Alkali-activated Red Clay Brick Waste. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 98-106, 2013.

REIG, L.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Influence of the Activator Concentration and Calcium Hydroxide Addition on the Properties of Alkali-activated Porcelain Stoneware. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 214-222, 2014.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement. **Materials Research**, v. 14, n. 1, p. 60-66, 2011.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; ARAÚJO, N.; OLIVEIRA, J.; LUCAS, E. Increasing the reaction kinetics of alkali-activated fly ash binders for stabilisation of a silty sand pavement sub-base. **Road Materials and Pavement**, 2016.

RODRIGUES, A. L. Aproveitamento do RCD (resíduos de tijolo cerâmico) para fabricação de artefatos de concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 04, ed. 05, v. 01, p. 137-156, 2019.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Proc. Inst. Civil Eng. - Geotech. Eng.**, v. 1253, p. 242–249, 1997.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING S. Lime requirement for stabilization. **Transportation Research Board Annual Meeting**, v. 79, 2000.

RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; SKIBSTED, J.; PALOMO, A. Clay reactivity: Production of alkali activated cements. **Applied Clay Science**, v. 73, p. 11-16, 2013.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, 23, 2001.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MALLMANN, J. E. C.; CONSOLI, N. C.; REDDY, K. R. Physical-mineralogical-chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 6, 2018.

SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MARÍN, F.; RIVERA, J.; FRÍAS, M. Morphology and Properties in Blended Cements with Ceramic Wastes as a Pozzolanic Material. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, n. 12, 3701-3705, 2006.

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

SEVERO, C. G. S., *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8.2, p. 55-67, 2013.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p.750-763, 2011.

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

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S. K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 78–90, 2015.

SINGHI, B.; LASKAR, A. I.; AHMED, M. A. Investigation on Soil–Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2015.

SJÖSTRÖM, C. **Durability and sustainable use of building materials**. In: LLEWELLYN, J. W.; DAVIES, H. (Ed.). Sustainable use of materials. London: BRE/RILEM, 1992.

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.

SONG, M.; QIAN, J.; ZHONG, L. J.; LIANG, S. From a View of Alkali Solution: Alkali Concentration to Determine Hydration Process of Alkali Activating Metakaolin. In: Scrivener, K.; Favier, A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, v. 10. Springer, Dordrecht, 2015.

SUN, Z.; CUI, H.; AN, H.; TAO, D.; XU, Y.; ZHAI, J., et al. Synthesis and Thermal Behavior of Geopolymer-type Material from Waste Ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 281-287, 2013.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil, CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1994.

TOLEDO FILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIRN, E. M. R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1357-1365, 2007.

TORRES-CARRASCO, M. **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. Activación, comportamiento y durabilidad**. Tese (Doutorado). Madrid: Universidad Autónoma De 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.

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade para solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis**. 166 p. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

XU, X; SONG, J; LI, Y; WU, J; LUI, X; ZHANG, C. The microstructure and properties of ceramic tiles from solid wastes of Bayer red muds. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 266-274, 2019.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZHANG, M.; GUO, H.; EL-KORCHI, T.; ZHANG, G.; TAO, M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1468-1478, 2013.

ZULUAGA, R.A.G. **Relação entre características microestruturais e o comportamento macroscópico de solos granulares**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

ANEXO A

Tabelas contendo os dados gerais dos de corpos de prova referentes à Resistência à Compressão Simples, Módulo Cisalhante (G_0) e durabilidade por molhagem/secagem e escovação para 7 e 28 dias de cura

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B _{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q _u (kPa)	G ₀ (MPa)
OS-15-10-4-0-7	15	10	4	0	7	11	332,59	196,67	0	262,13	26,21	11,53	0	100,43	10,14	5,27	115,85	80,82	41,10	7,84	23,09	70,33	205,57
							333,60	195,04	0	262,93	26,29	11,57	0	100,74	10,18	5,28	116,20	78,84	40,42	7,93	22,64	63,35	211,54
							333,21	196,20	0	262,62	26,26	11,56	0	100,62	10,16	5,28	116,06	80,14	40,85	7,87	22,92	66,40	213,30
OS-15-30-4-0-7	15	30	4	0	7	11	332,67	196,47	0	220,96	66,29	11,49	0	84,66	25,65	5,25	115,56	80,91	41,18	15,73	19,04	302,83	646,66
							333,17	194,56	0	221,29	66,39	11,51	0	84,78	25,69	5,25	115,73	78,83	40,52	15,91	18,67	288,73	660,33
							332,75	198,05	0	221,01	66,30	11,49	0	84,68	25,66	5,25	115,58	82,47	41,64	15,61	19,29	261,50	659,84
OS-15-30-10-0-7	15	30	10	0	7	11	333,05	198,08	0	209,79	62,94	27,27	0	80,38	24,36	12,45	117,19	80,89	40,84	18,58	18,02	311,27	659,41
							332,66	199,37	0	209,54	62,86	27,24	0	80,28	24,33	12,44	117,05	82,32	41,29	18,44	18,26	302,59	619,06
							332,56	199,50	0	209,48	62,84	27,23	0	80,26	24,32	12,43	117,01	82,49	41,35	18,42	18,29	285,60	641,38
OS-16-10-4-0-7	16	10	4	0	7	11	354,21	198,44	0	278,70	27,87	12,26	0	106,78	10,79	5,60	123,17	75,27	37,93	8,26	21,00	91,14	255,61
							353,88	200,30	0	278,44	27,84	12,25	0	106,68	10,78	5,59	123,05	77,25	38,57	8,17	21,42	91,85	247,32
							354,26	199,51	0	278,74	27,87	12,26	0	106,80	10,79	5,60	123,19	76,32	38,25	8,21	21,21	83,00	252,39
OS-16-20-7-0-7	16	20	7	0	7	11	354,25	200,36	0	249,78	49,96	20,98	0	95,70	19,33	9,58	124,61	75,75	37,81	14,43	17,90	251,06	576,17
							353,83	198,18	0	249,48	49,90	20,96	0	95,59	19,31	9,57	124,47	73,71	37,20	14,57	17,57	254,27	597,29
							354,20	199,43	0	249,74	49,95	20,98	0	95,69	19,33	9,58	124,60	74,84	37,53	14,50	17,75	252,71	521,98
OS-16-30-4-0-7	16	30	4	0	7	11	352,42	201,30	0	234,36	70,31	12,19	0	89,79	27,21	5,56	122,57	78,73	39,11	16,28	17,91	379,64	812,77
							354,22	198,09	0	235,56	70,67	12,25	0	90,25	27,35	5,59	123,19	74,90	37,81	16,63	17,21	422,36	871,08
							353,01	197,26	0	234,75	70,43	12,21	0	89,94	27,25	5,57	122,77	74,49	37,76	16,64	17,18	400,16	847,90
OS-16-30-10-0-7	16	30	10	0	7	11	354,01	200,96	0	223,44	67,03	29,05	0	85,61	25,94	13,26	124,81	76,15	37,89	19,51	16,49	569,40	1069,44
							349,46	198,84	0	220,57	66,17	28,67	0	84,51	25,61	13,09	123,21	75,63	38,04	19,46	16,57	509,88	1022,40
							353,41	198,98	0	223,06	66,92	29,00	0	85,46	25,90	13,24	124,60	74,38	37,38	19,67	16,23	543,47	1063,92
OS-17-10-4-0-7	17	10	4	0	7	11	376,10	203,91	0	296,90	29,69	13,06	0	113,75	11,49	5,97	131,21	72,70	35,65	8,56	19,54	113,78	305,25
							375,70	205,05	0	296,58	29,66	13,05	0	113,63	11,48	5,96	131,07	73,98	36,08	8,50	19,81	105,63	280,64
							375,40	200,17	0	296,35	29,63	13,04	0	113,54	11,47	5,95	130,97	69,20	34,57	8,70	18,86	116,69	290,94
OS-17-30-4-0-7	17	30	4	0	7	11	375,91	203,37	0	249,96	74,99	13,00	0	95,77	29,02	5,94	130,73	72,64	35,72	17,19	16,11	567,53	1130,81
							376,27	201,23	0	250,20	75,06	13,01	0	95,86	29,05	5,94	130,85	70,38	34,97	17,39	15,72	596,75	1198,29
							375,49	202,63	0	249,68	74,91	12,98	0	95,66	28,99	5,93	130,58	72,05	35,56	17,23	16,02	615,37	1168,49
OS-17-30-10-0-7	17	30	10	0	7	11	375,82	199,83	0	236,53	70,96	30,75	0	90,63	27,46	14,04	132,13	67,71	33,88	20,77	14,49	733,14	1233,86
							375,51	201,22	0	236,34	70,90	30,72	0	90,55	27,44	14,03	132,02	69,21	34,39	20,61	14,74	745,39	1330,71
							374,09	204,17	0	235,44	70,63	30,61	0	90,21	27,33	13,98	131,52	72,66	35,58	20,23	15,33	739,52	1286,71

Tabela A.1 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 7 dias de cura e molalidade=0

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B_{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q_u (kPa)	G_0 (MPa)
OS-15-10-4-3-7	15	10	4	3	7	11	335,75	199,70	3,22	262,51	26,25	11,55	1,52	100,58	10,16	5,27	116,01	83,69	41,91	7,73	23,64	839,16	1489,69
							336,20	198,78	3,23	262,86	26,29	11,57	1,52	100,71	10,17	5,28	116,17	82,62	41,56	7,77	23,40	869,71	1434,73
							331,90	197,92	3,19	259,50	25,95	11,42	1,50	99,42	10,04	5,21	114,68	83,24	42,06	7,71	23,74	862,55	1449,74
OS-15-30-4-3-7	15	30	4	3	7	11	336,15	200,30	3,17	222,85	66,86	11,59	1,49	85,38	25,87	5,29	116,55	83,75	41,81	15,56	19,39	1249,34	1692,87
							335,68	199,04	3,16	222,54	66,76	11,57	1,49	85,27	25,84	5,28	116,39	82,66	41,53	15,64	19,23	1311,94	1612,57
							335,46	197,86	3,16	222,40	66,72	11,56	1,49	85,21	25,82	5,28	116,31	81,55	41,22	15,72	19,06	1381,88	1750,98
OS-15-30-10-3-7	15	30	10	3	7	11	335,20	197,60	3,21	209,69	62,91	27,26	1,52	80,34	24,35	12,45	117,14	80,46	40,72	18,62	17,96	2300,01	2155,60
							335,70	197,45	3,22	210,01	63,00	27,30	1,52	80,46	24,38	12,47	117,31	80,14	40,59	18,66	17,89	2389,90	2237,56
							335,69	199,57	3,22	210,00	63,00	27,30	1,52	80,46	24,38	12,47	117,31	82,27	41,22	18,46	18,22	2215,11	2214,31
OS-16-10-4-3-7	16	10	4	3	7	11	357,50	200,04	3,43	279,53	27,95	12,30	1,62	107,10	10,82	5,62	123,53	76,50	38,24	8,22	21,21	1119,34	1787,17
							356,00	199,04	3,41	278,36	27,84	12,25	1,61	106,65	10,77	5,59	123,02	76,02	38,19	8,22	21,17	1146,81	1824,46
							356,56	201,17	3,42	278,80	27,88	12,27	1,61	106,82	10,79	5,60	123,21	77,96	38,75	8,15	21,54	1201,81	1914,21
OS-16-20-7-3-7	16	20	7	3	7	11	358,79	201,50	3,40	250,34	50,07	21,03	1,60	95,92	19,38	9,60	124,90	76,60	38,02	14,38	18,02	1983,27	2666,99
							357,95	201,70	3,39	249,76	49,95	20,98	1,60	95,69	19,33	9,58	124,60	77,09	38,22	14,33	18,14	2026,89	2675,40
							358,17	202,17	3,39	249,91	49,98	20,99	1,60	95,75	19,34	9,59	124,68	77,49	38,33	14,31	18,19	2184,28	2578,76
OS-16-30-4-3-7	16	30	4	3	7	11	358,44	198,37	3,43	237,17	71,15	12,33	1,62	90,87	27,54	5,63	124,04	74,33	37,47	16,72	17,03	1996,85	2804,94
							358,12	199,00	3,43	236,96	71,09	12,32	1,62	90,79	27,51	5,63	123,93	75,08	37,73	16,65	17,16	1926,47	2797,76
							358,90	199,56	3,44	237,48	71,24	12,35	1,62	90,99	27,57	5,64	124,20	75,36	37,76	16,64	17,18	1879,46	2700,47
OS-16-30-10-3-7	16	30	10	3	7	11	358,92	197,97	3,37	225,07	67,52	29,26	1,59	86,23	26,13	13,36	125,72	72,25	36,50	19,95	15,79	3454,34	4186,76
							358,20	200,09	3,36	224,61	67,38	29,20	1,59	86,06	26,08	13,33	125,47	74,62	37,29	19,70	16,19	3286,10	3870,49
							357,99	198,05	3,36	224,48	67,34	29,18	1,59	86,01	26,06	13,33	125,40	72,65	36,68	19,89	15,88	3396,74	4061,65
OS-17-10-4-3-7	17	10	4	3	7	11	379,10	203,83	3,53	297,41	29,74	13,09	1,67	113,95	11,51	5,98	131,44	72,40	35,52	8,58	19,46	1390,76	2464,80
							379,45	204,51	3,54	297,68	29,77	13,10	1,67	114,06	11,52	5,98	131,56	72,95	35,67	8,56	19,56	1341,64	2326,64
							379,57	204,17	3,54	297,78	29,78	13,10	1,67	114,09	11,52	5,98	131,60	72,58	35,55	8,57	19,48	1338,81	2389,89
OS-17-30-4-3-7	17	30	4	3	7	11	380,18	202,16	3,86	249,80	74,94	12,99	1,82	95,71	29,00	5,93	130,64	71,52	35,38	17,28	15,93	2394,20	5547,36
							380,18	203,30	3,86	249,80	74,94	12,99	1,82	95,71	29,00	5,93	130,64	72,66	35,74	17,18	16,12	2442,00	5638,42
							379,72	203,17	3,85	249,50	74,85	12,97	1,82	95,59	28,97	5,92	130,48	72,68	35,77	17,17	16,14	2517,45	5352,89
OS-17-30-10-3-7	17	30	10	3	7	11	379,47	203,10	3,49	238,53	71,56	31,01	1,65	91,39	27,69	14,16	133,25	69,86	34,39	20,61	14,74	4003,55	7327,70
							379,59	204,57	3,49	238,61	71,58	31,02	1,65	91,42	27,70	14,16	133,29	71,28	34,84	20,47	14,96	3992,68	7326,28
							378,53	202,10	3,48	237,94	71,38	30,93	1,64	91,17	27,63	14,12	132,92	69,18	34,23	20,66	14,66	3921,50	7235,75

Tabela A.2 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 7 dias de cura e molalidade=3

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B_{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q_u (kPa)	G_0 (MPa)
OS-15-10-4-0-28	15	10	4	0	28	11	332,95	197,72	0	262,42	26,24	11,55	0	100,54	10,16	5,27	115,97	81,75	41,34	7,80	23,26	358,93	1120,79
							333,28	196,41	0	262,68	26,27	11,56	0	100,64	10,17	5,28	116,09	80,32	40,90	7,86	22,96	390,80	1205,32
							333,15	197,26	0	262,57	26,26	11,55	0	100,60	10,16	5,28	116,04	81,22	41,18	7,83	23,14	368,16	1167,93
OS-15-30-4-0-28	15	30	4	0	28	11	332,18	198,91	0	220,63	66,19	11,47	0	84,53	25,62	5,24	115,39	83,52	41,99	15,51	19,49	919,52	1843,25
							332,52	198,38	0	220,86	66,26	11,48	0	84,62	25,64	5,24	115,50	82,88	41,78	15,57	19,37	854,82	1844,32
							332,30	197,40	0	220,71	66,21	11,48	0	84,56	25,62	5,24	115,43	81,97	41,52	15,64	19,23	818,46	1851,45
OS-15-30-10-0-28	15	30	10	0	28	11	332,66	195,35	0	209,54	62,86	27,24	0	80,28	24,33	12,44	117,05	78,30	40,08	18,82	17,62	1260,89	1997,90
							331,12	198,12	0	208,57	62,57	27,11	0	79,91	24,21	12,38	116,51	81,61	41,19	18,47	18,21	1122,65	1958,19
							330,92	196,32	0	208,44	62,53	27,10	0	79,86	24,20	12,37	116,44	79,89	40,69	18,63	17,94	1172,96	1947,18
OS-16-10-4-0-28	16	10	4	0	28	11	354,08	201,50	0	278,60	27,86	12,26	0	106,74	10,78	5,60	123,12	78,38	38,90	8,13	21,63	491,58	1656,12
							354,39	200,09	0	278,84	27,88	12,27	0	106,84	10,79	5,60	123,23	76,86	38,41	8,19	21,32	559,96	1620,51
							354,25	199,76	0	278,73	27,87	12,26	0	106,79	10,79	5,60	123,18	76,57	38,33	8,20	21,26	491,45	1639,75
OS-16-20-7-0-28	16	20	7	0	28	11	353,40	201,23	0	249,18	49,84	20,93	0	95,47	19,29	9,56	124,31	76,91	38,22	14,33	18,14	1337,58	2368,31
							353,46	199,02	0	249,22	49,84	20,93	0	95,49	19,29	9,56	124,34	74,68	37,53	14,50	17,75	1300,05	2471,93
							353,65	199,50	0	249,36	49,87	20,95	0	95,54	19,30	9,56	124,40	75,10	37,64	14,47	17,81	1288,17	2272,65
OS-16-30-4-0-28	16	30	4	0	28	11	353,46	199,22	0	235,05	70,52	12,22	0	90,06	27,29	5,58	122,93	76,29	38,29	16,50	17,47	1541,36	2405,22
							352,97	197,77	0	234,73	70,42	12,21	0	89,93	27,25	5,57	122,76	75,02	37,93	16,60	17,27	1382,81	2371,43
							353,06	196,52	0	234,79	70,44	12,21	0	89,96	27,26	5,57	122,79	73,73	37,52	16,71	17,05	1427,15	2326,05
OS-16-30-10-0-28	16	30	10	0	28	11	353,87	198,56	0	223,35	67,00	29,04	0	85,57	25,93	13,26	124,76	73,80	37,17	19,74	16,12	1829,63	2605,32
							353,40	198,10	0	223,05	66,92	29,00	0	85,46	25,90	13,24	124,60	73,50	37,10	19,76	16,09	2042,48	2647,08
							352,28	199,83	0	222,35	66,70	28,90	0	85,19	25,81	13,20	124,20	75,63	37,85	19,52	16,47	1896,34	2635,79
OS-17-10-4-0-28	17	10	4	0	28	11	375,20	200,90	0	296,19	29,62	13,03	0	113,48	11,46	5,95	130,90	70,00	34,84	8,67	19,03	753,32	2096,16
							375,50	201,36	0	296,43	29,64	13,04	0	113,57	11,47	5,96	131,00	70,36	34,94	8,65	19,10	671,62	2023,92
							375,21	202,63	0	296,20	29,62	13,03	0	113,49	11,46	5,95	130,90	71,73	35,40	8,59	19,38	666,42	2019,81
OS-17-30-4-0-28	17	30	4	0	28	11	375,19	203,64	0	249,48	74,85	12,97	0	95,59	28,96	5,92	130,48	73,16	35,93	17,13	16,22	1841,28	3082,30
							375,15	200,83	0	249,46	74,84	12,97	0	95,58	28,96	5,92	130,46	70,37	35,04	17,37	15,75	1980,07	3033,09
							375,51	203,30	0	249,70	74,91	12,98	0	95,67	28,99	5,93	130,59	72,71	35,77	17,18	16,13	1939,68	3143,42
OS-17-30-10-0-28	17	30	10	0	28	11	375,83	204,24	0	236,54	70,96	30,75	0	90,63	27,46	14,04	132,13	72,11	35,31	20,32	15,19	2493,81	3504,57
							375,36	202,03	0	236,24	70,87	30,71	0	90,51	27,43	14,02	131,97	70,06	34,68	20,52	14,88	2658,99	3695,32
							375,65	203,57	0	236,43	70,93	30,74	0	90,58	27,45	14,03	132,07	71,50	35,12	20,38	15,10	2464,42	3587,92

Tabela A.3 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 28 dias de cura e molalidade=0

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B_{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q_u (kPa)	G_0 (MPa)
OS-15-10-4-3-28	15	10	4	3	28	11	335,80	203,17	3,08	263,88	26,39	11,61	1,45	101,10	10,21	5,30	116,62	86,55	42,60	7,64	24,11	1056,16	2029,36
							336,40	200,03	3,09	264,35	26,44	11,63	1,46	101,28	10,23	5,31	116,83	83,20	41,59	7,77	23,43	989,72	1917,59
							336,30	199,17	3,09	264,27	26,43	11,63	1,46	101,25	10,23	5,31	116,79	82,38	41,36	7,80	23,27	1024,46	1876,51
OS-15-30-4-3-28	15	30	4	3	28	11	336,25	197,51	3,13	223,25	66,98	11,61	1,48	85,54	25,92	5,30	116,76	80,76	40,89	15,81	18,88	2287,49	2562,61
							335,64	196,32	3,12	222,85	66,85	11,59	1,47	85,38	25,87	5,29	116,55	79,78	40,64	15,87	18,74	2257,50	2469,20
							335,77	196,92	3,12	222,93	66,88	11,59	1,47	85,41	25,88	5,29	116,59	80,33	40,79	15,83	18,82	2304,70	2766,23
OS-15-30-10-3-28	15	30	10	3	28	11	336,51	198,38	3,11	211,40	63,42	27,48	1,47	81,00	24,54	12,55	118,09	80,29	40,47	18,70	17,83	2859,55	4947,65
							336,45	195,15	3,11	211,37	63,41	27,48	1,47	80,98	24,54	12,55	118,07	77,08	39,50	19,00	17,32	3159,98	5195,21
							335,80	196,85	3,10	210,96	63,29	27,42	1,46	80,83	24,49	12,52	117,84	79,01	40,14	18,80	17,65	2972,36	5161,37
OS-16-10-4-3-28	16	10	4	3	28	11	358,73	203,30	3,32	281,65	28,17	12,39	1,57	107,91	10,90	5,66	124,47	78,83	38,77	8,14	21,55	1499,81	2278,70
							357,94	201,30	3,31	281,03	28,10	12,37	1,56	107,68	10,88	5,65	124,20	77,10	38,30	8,21	21,24	1377,45	2087,55
							358,37	203,30	3,32	281,37	28,14	12,38	1,56	107,80	10,89	5,65	124,35	78,96	38,84	8,14	21,59	1359,02	2143,64
OS-16-20-7-3-28	16	20	7	3	28	11	357,93	200,57	3,31	250,44	50,09	21,04	1,56	95,95	19,38	9,61	124,94	75,62	37,70	14,45	17,85	3356,00	4078,63
							358,01	201,50	3,31	250,50	50,10	21,04	1,56	95,98	19,39	9,61	124,97	76,53	37,98	14,39	18,00	3075,62	3636,97
							357,63	201,30	3,30	250,23	50,05	21,02	1,56	95,87	19,37	9,60	124,84	76,46	37,98	14,39	18,00	3166,12	3910,46
OS-16-30-4-3-28	16	30	4	3	28	11	357,62	196,67	3,36	237,16	71,15	12,33	1,59	90,86	27,53	5,63	124,03	72,64	36,94	16,86	16,75	3653,02	5154,06
							357,26	198,45	3,36	236,92	71,08	12,32	1,58	90,77	27,51	5,63	123,90	74,55	37,56	16,69	17,08	3417,74	4657,91
							357,99	198,38	3,37	237,40	71,22	12,34	1,59	90,96	27,56	5,64	124,16	74,22	37,41	16,73	17,00	3679,31	4429,77
OS-16-30-10-3-28	16	30	10	3	28	11	358,37	199,17	3,35	224,81	67,44	29,22	1,58	86,13	26,10	13,34	125,58	73,59	36,95	19,80	16,01	5181,87	6255,53
							357,68	199,11	3,35	224,37	67,31	29,17	1,58	85,97	26,05	13,32	125,33	73,77	37,05	19,77	16,07	4932,14	6915,80
							357,86	198,70	3,35	224,49	67,35	29,18	1,58	86,01	26,06	13,33	125,40	73,30	36,89	19,82	15,98	4958,54	7523,79
OS-17-10-4-3-28	17	10	4	3	28	11	377,87	203,44	3,50	296,63	29,66	13,05	1,65	113,65	11,48	5,96	131,09	72,35	35,56	8,57	19,49	1559,79	2367,00
							379,92	204,58	3,52	298,24	29,82	13,12	1,66	114,27	11,54	5,99	131,80	72,78	35,57	8,57	19,49	1578,58	2456,90
							379,78	204,44	3,52	298,13	29,81	13,12	1,66	114,23	11,54	5,99	131,75	72,69	35,56	8,57	19,48	1713,91	2499,56
OS-17-30-4-3-28	17	30	4	3	28	11	379,73	203,70	3,75	250,40	75,12	13,02	1,77	95,94	29,07	5,95	130,95	72,75	35,71	17,19	16,11	4910,93	6440,22
							377,61	201,57	3,72	249,00	74,70	12,95	1,76	95,40	28,91	5,91	130,22	71,34	35,39	17,28	15,94	4875,03	6265,53
							380,11	199,64	3,75	250,65	75,19	13,03	1,77	96,03	29,10	5,95	131,08	68,56	34,34	17,56	15,39	4750,29	6376,18
OS-17-30-10-3-28	17	30	10	3	28	11	378,65	201,63	3,46	238,14	71,44	30,96	1,63	91,24	27,65	14,14	133,02	68,61	34,03	20,72	14,56	6900,81	10037,52
							377,85	202,90	3,46	237,64	71,29	30,89	1,63	91,05	27,59	14,11	132,74	70,16	34,58	20,55	14,83	7001,63	9429,16
							379,66	200,77	3,47	238,77	71,63	31,04	1,64	91,48	27,72	14,17	133,38	67,39	33,57	20,87	14,34	6747,99	9201,58

Tabela A.4 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 28 dias de cura e molalidade=3

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B _{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q _u (kPa)
OS-15-10-4-2-7	15	10	4	2	7	11	330,59	200,96	2,04	261,75	26,17	11,52	0,96	100,29	10,13	5,26	115,68	85,29	42,44	7,66	24,00	901,17
							330,24	197,72	2,03	261,47	26,15	11,50	0,96	100,18	10,12	5,25	115,55	82,17	41,56	7,77	23,40	854,12
							330,30	195,36	2,03	261,52	26,15	11,51	0,96	100,20	10,12	5,25	115,57	79,78	40,84	7,87	22,92	881,85
OS-15-10-7-2-7	15	10	7	2	7	11	330,40	198,24	2,26	251,30	25,13	19,35	1,07	96,28	9,73	8,84	114,84	83,40	42,07	9,36	22,49	992,16
							330,15	197,66	2,26	251,11	25,11	19,34	1,07	96,21	9,72	8,83	114,76	82,90	41,94	9,38	22,41	941,87
							330,30	197,95	2,26	251,22	25,12	19,34	1,07	96,25	9,72	8,83	114,81	83,14	42,00	9,37	22,45	1023,60
OS-15-10-10-2-7	15	10	10	2	7	11	330,35	197,70	1,95	248,34	24,83	27,32	0,92	95,15	9,61	12,47	117,23	80,47	40,70	11,17	20,71	1127,71
							330,10	200,75	1,95	248,15	24,81	27,30	0,92	95,08	9,60	12,46	117,14	83,61	41,65	10,99	21,29	1226,14
							330,28	199,22	1,95	248,28	24,83	27,31	0,92	95,13	9,61	12,47	117,21	82,02	41,17	11,08	20,99	1194,35
OS-15-20-4-2-7	15	20	4	2	7	11	330,76	196,68	2,20	238,10	47,62	11,43	1,04	91,22	18,43	5,22	114,87	81,80	41,59	12,02	20,73	901,67
							330,39	197,53	2,19	237,83	47,57	11,42	1,03	91,12	18,41	5,21	114,74	82,79	41,91	11,96	20,92	872,00
							330,41	197,10	2,19	237,85	47,57	11,42	1,03	91,13	18,41	5,21	114,75	82,35	41,78	11,98	20,84	943,66
OS-15-20-7-2-7	15	20	7	2	7	11	330,32	201,10	2,18	231,23	46,25	19,42	1,03	88,59	17,90	8,87	115,36	85,74	42,64	13,31	20,65	1243,07
							330,19	200,10	2,18	231,14	46,23	19,42	1,03	88,56	17,89	8,87	115,31	84,79	42,37	13,37	20,50	1331,67
							330,24	200,60	2,18	231,17	46,23	19,42	1,03	88,57	17,89	8,87	115,33	85,27	42,51	13,34	20,58	1346,57
OS-15-20-10-2-7	15	20	10	2	7	11	330,49	201,03	2,30	223,67	44,73	26,84	1,09	85,70	17,31	12,26	115,27	85,77	42,66	14,71	20,10	1509,62
							330,26	200,50	2,30	223,52	44,70	26,82	1,09	85,64	17,30	12,25	115,19	85,31	42,55	14,74	20,03	1437,39
							330,52	200,77	2,30	223,69	44,74	26,84	1,09	85,71	17,31	12,26	115,28	85,49	42,58	14,73	20,05	1469,66
OS-15-30-4-2-7	15	30	4	2	7	11	330,08	197,72	2,14	219,88	65,97	11,43	1,01	84,25	25,53	5,22	115,00	82,73	41,84	15,55	19,40	959,16
							330,42	198,04	2,14	220,11	66,03	11,45	1,01	84,33	25,55	5,23	115,11	82,93	41,87	15,54	19,42	885,01
							330,38	197,88	2,14	220,08	66,03	11,44	1,01	84,32	25,55	5,23	115,10	82,78	41,83	15,55	19,40	985,34
OS-15-30-7-2-7	15	30	7	2	7	11	330,29	196,47	2,21	213,08	63,92	19,39	1,04	81,64	24,74	8,85	115,23	81,23	41,35	17,10	18,67	1261,87
							330,05	198,18	2,21	212,93	63,88	19,38	1,04	81,58	24,72	8,85	115,15	83,03	41,90	16,94	18,97	1220,85
							330,31	197,32	2,21	213,10	63,93	19,39	1,04	81,65	24,74	8,85	115,24	82,08	41,60	17,03	18,81	1319,87
OS-15-30-10-2-7	15	30	10	2	7	11	329,93	198,18	2,05	208,73	62,62	27,13	0,97	79,97	24,23	12,39	116,60	81,59	41,17	18,48	18,19	1584,10
							330,35	199,31	2,06	208,99	62,70	27,17	0,97	80,07	24,26	12,41	116,74	82,57	41,43	18,40	18,33	1577,56
							330,12	198,75	2,06	208,85	62,65	27,15	0,97	80,02	24,25	12,40	116,66	82,08	41,30	18,44	18,26	1601,80
OS-16-10-4-2-7	16	10	4	2	7	11	352,10	202,43	2,24	277,75	27,77	12,22	1,06	106,42	10,75	5,58	122,75	79,68	39,36	8,07	21,94	787,07
							351,94	201,49	2,24	277,62	27,76	12,22	1,06	106,37	10,74	5,58	122,69	78,80	39,11	8,10	21,77	926,34
							352,50	201,96	2,25	278,06	27,81	12,23	1,06	106,54	10,76	5,59	122,89	79,08	39,15	8,09	21,80	871,67
OS-16-10-7-2-7	16	10	7	2	7	11	351,96	202,43	2,17	270,82	27,08	20,85	1,02	103,76	10,48	9,52	123,76	78,66	38,86	9,88	20,46	1289,56
							352,01	199,37	2,17	270,86	27,09	20,86	1,02	103,78	10,48	9,52	123,78	75,58	37,91	10,03	19,88	1415,03
							352,09	200,90	2,17	270,92	27,09	20,86	1,02	103,80	10,48	9,53	123,81	77,09	38,37	9,96	20,16	1348,78
OS-16-10-10-2-7	16	10	10	2	7	11	352,00	201,83	2,17	263,47	26,35	28,98	1,02	100,95	10,20	13,23	124,38	77,45	38,38	11,61	19,32	1536,81
							351,79	200,57	2,17	263,32	26,33	28,96	1,02	100,89	10,19	13,23	124,30	76,26	38,02	11,67	19,11	1633,25
							352,41	201,20	2,17	263,78	26,38	29,02	1,02	101,06	10,21	13,25	124,52	76,68	38,11	11,66	19,16	1610,35
OS-16-20-4-2-7	16	20	4	2	7	11	351,76	200,30	2,40	252,49	50,50	12,12	1,13	96,74	19,54	5,53	121,81	78,49	39,19	12,52	19,31	1153,68
							350,96	200,17	2,39	251,91	50,38	12,09	1,13	96,52	19,50	5,52	121,54	78,63	39,28	12,50	19,37	1068,11
							352,00	200,24	2,40	252,66	50,53	12,13	1,13	96,80	19,56	5,54	121,90	78,34	39,12	12,53	19,27	1166,36

OS-16-20-7-2-7	16	20	7	2	7	11	351,97	199,18	2,46	244,83	48,97	20,57	1,16	93,80	18,95	9,39	122,14	77,03	38,68	14,23	18,39	1502,10
							352,20	202,76	2,46	244,99	49,00	20,58	1,16	93,86	18,96	9,40	122,22	80,54	39,72	13,99	18,98	1568,29
							351,68	202,10	2,46	244,63	48,93	20,55	1,16	93,73	18,93	9,38	122,04	80,06	39,61	14,01	18,92	1544,86
OS-16-20-10-2-7	16	20	10	2	7	11	352,60	198,83	2,39	239,36	47,87	28,72	1,13	91,71	18,53	13,12	123,35	75,48	37,96	15,91	17,49	1958,52
							352,12	199,77	2,39	239,04	47,81	28,68	1,13	91,58	18,50	13,10	123,18	76,59	38,34	15,82	17,70	1961,11
							352,42	199,31	2,39	239,24	47,85	28,71	1,13	91,66	18,52	13,11	123,29	76,02	38,14	15,87	17,59	1984,46
OS-16-30-4-2-7	16	30	4	2	7	11	351,46	201,17	2,37	233,08	69,92	12,12	1,12	89,30	27,06	5,53	121,90	79,27	39,41	16,20	18,07	1646,43
							352,28	198,44	2,38	233,62	70,09	12,15	1,12	89,51	27,12	5,55	122,18	76,26	38,43	16,46	17,54	1681,81
							352,54	199,80	2,38	233,79	70,14	12,16	1,12	89,58	27,14	5,55	122,27	77,53	38,80	16,36	17,74	1719,43
OS-16-30-7-2-7	16	30	7	2	7	11	351,70	198,78	2,36	226,92	68,08	20,65	1,11	86,94	26,35	9,43	122,72	76,06	38,26	18,00	17,04	2115,45
							351,76	199,57	2,36	226,96	68,09	20,65	1,11	86,96	26,35	9,43	122,74	76,84	38,50	17,93	17,16	2209,78
							352,48	199,18	2,36	227,42	68,23	20,70	1,11	87,14	26,40	9,45	122,99	76,19	38,25	18,00	17,03	2173,73
OS-16-30-10-2-7	16	30	10	2	7	11	353,15	198,65	2,26	222,73	66,82	28,95	1,07	85,34	25,86	13,22	124,41	74,23	37,37	19,67	16,23	2993,71
							350,96	200,30	2,25	221,34	66,40	28,77	1,06	84,81	25,70	13,14	123,64	76,66	38,27	19,39	16,69	2866,96
							351,99	199,47	2,26	221,99	66,60	28,86	1,06	85,06	25,77	13,18	124,01	75,47	37,83	19,53	16,46	2811,48
OS-17-10-4-2-7	17	10	4	2	7	11	374,23	202,83	2,41	294,82	29,48	12,97	1,14	112,96	11,41	5,92	130,29	72,54	35,76	8,55	19,61	1379,45
							373,26	203,97	2,41	294,06	29,41	12,94	1,14	112,66	11,38	5,91	129,95	74,02	36,29	8,48	19,95	1420,75
							374,58	203,40	2,42	295,10	29,51	12,98	1,14	113,06	11,42	5,93	130,41	72,99	35,88	8,53	19,69	1315,83
OS-17-10-7-2-7	17	10	7	2	7	11	373,04	205,39	2,36	286,31	28,63	22,05	1,11	109,70	11,08	10,07	130,85	74,54	36,29	10,30	18,89	1416,36
							373,86	202,63	2,36	286,94	28,69	22,09	1,11	109,94	11,10	10,09	131,13	71,50	35,28	10,46	18,29	1370,69
							374,47	204,01	2,36	287,41	28,74	22,13	1,12	110,12	11,12	10,11	131,35	72,66	35,62	10,41	18,48	1435,24
OS-17-10-10-2-7	17	10	10	2	7	11	373,62	202,83	2,40	278,42	27,84	30,63	1,13	106,67	10,77	13,98	131,43	71,40	35,20	12,21	17,47	1648,80
							374,04	201,90	2,40	278,73	27,87	30,66	1,13	106,79	10,79	14,00	131,58	70,32	34,83	12,28	17,26	1693,80
							374,12	202,37	2,40	278,79	27,88	30,67	1,13	106,82	10,79	14,00	131,61	70,76	34,97	12,25	17,34	1663,07
OS-17-20-4-2-7	17	20	4	2	7	11	374,30	199,24	2,52	268,98	53,80	12,91	1,19	103,06	20,82	5,90	129,77	69,47	34,87	13,41	16,86	1532,60
							373,12	198,19	2,51	268,14	53,63	12,87	1,19	102,73	20,75	5,88	129,36	68,82	34,73	13,44	16,78	1564,98
							374,38	198,71	2,52	269,04	53,81	12,91	1,19	103,08	20,82	5,90	129,80	68,91	34,68	13,45	16,75	1537,61
OS-17-20-7-2-7	17	20	7	2	7	11	374,66	199,18	2,56	261,21	52,24	21,94	1,21	100,08	20,22	10,02	130,32	68,86	34,57	15,18	16,14	2460,34
							373,93	199,11	2,56	260,71	52,14	21,90	1,21	99,89	20,18	10,00	130,07	69,04	34,68	15,16	16,20	2435,19
							374,15	199,14	2,56	260,86	52,17	21,91	1,21	99,95	20,19	10,01	130,14	69,00	34,65	15,16	16,18	2342,22
OS-17-20-10-2-7	17	20	10	2	7	11	374,00	201,57	2,59	253,31	50,66	30,40	1,22	97,06	19,61	13,88	130,54	71,02	35,24	16,61	16,04	2857,12
							373,35	200,96	2,58	252,87	50,57	30,34	1,22	96,89	19,57	13,86	130,32	70,65	35,15	16,63	16,00	2738,61
							374,49	201,26	2,59	253,65	50,73	30,44	1,22	97,18	19,63	13,90	130,71	70,55	35,05	16,66	15,95	2717,90
OS-17-30-4-2-7	17	30	4	2	7	11	372,45	203,03	2,48	247,42	74,23	12,87	1,17	94,80	28,73	5,87	129,40	73,63	36,27	17,04	16,39	2120,58
							373,53	200,43	2,49	248,14	74,44	12,90	1,17	95,07	28,81	5,89	129,77	70,66	35,25	17,31	15,87	2118,91
							374,20	201,73	2,49	248,58	74,58	12,93	1,17	95,24	28,86	5,90	130,01	71,72	35,55	17,23	16,02	2076,67
OS-17-30-7-2-7	17	30	7	2	7	11	374,29	200,63	2,48	241,80	72,54	22,00	1,17	92,64	28,07	10,05	130,76	69,87	34,82	19,00	15,27	3098,16
							374,05	202,77	2,48	241,64	72,49	21,99	1,17	92,58	28,05	10,04	130,68	72,09	35,55	18,79	15,64	3104,27
							374,30	201,70	2,48	241,81	72,54	22,00	1,17	92,65	28,07	10,05	130,77	70,93	35,17	18,90	15,44	3128,11
OS-17-30-10-2-7	17	30	10	2	7	11	374,00	203,84	2,80	231,59	69,48	30,11	1,32	88,73	26,89	13,75	129,37	74,47	36,53	19,94	15,81	3468,00
							373,75	200,10	2,80	231,44	69,43	30,09	1,32	88,67	26,87	13,74	129,28	70,82	35,39	20,29	15,24	3752,66
							373,69	202,10	2,68	232,68	69,80	30,25	1,26	89,15	27,01	13,81	129,98	72,12	35,69	20,20	15,38	3633,06

Tabela A.5 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 7 dias de cura e molalidade=2

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B _{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q _u (kPa)
OS-15- 10-4-4-7	15	10	4	4	7	11	330,86	199,50	4,49	256,50	25,65	11,29	2,12	98,28	9,93	5,15	113,36	86,15	43,18	7,56	24,51	310,21
							330,70	198,64	4,49	256,38	25,64	11,28	2,12	98,23	9,92	5,15	113,30	85,34	42,96	7,59	24,36	248,31
							332,00	199,07	4,51	257,39	25,74	11,33	2,13	98,62	9,96	5,17	113,75	85,32	42,86	7,60	24,29	301,93
OS-15- 10-7-4-7	15	10	7	4	7	11	330,75	193,55	3,92	253,23	25,32	19,50	1,85	97,02	9,80	8,90	115,73	77,83	40,21	9,66	21,31	824,09
							332,36	196,50	3,94	254,46	25,45	19,59	1,86	97,49	9,85	8,95	116,29	80,22	40,82	9,56	21,69	814,02
							332,08	195,03	3,94	254,25	25,42	19,58	1,86	97,41	9,84	8,94	116,19	78,84	40,42	9,63	21,44	826,94
OS-15- 30-4-4-7	15	30	4	4	7	11	332,41	195,15	4,68	217,05	65,11	11,29	2,21	83,16	25,20	5,15	113,51	81,64	41,83	15,55	19,40	989,38
							332,42	198,18	4,68	217,05	65,12	11,29	2,21	83,16	25,20	5,15	113,51	84,66	42,72	15,32	19,90	1097,06
							332,54	196,66	4,68	217,13	65,14	11,29	2,21	83,19	25,21	5,16	113,56	83,11	42,26	15,44	19,64	1048,06
OS-16- 20-4-4-7	16	20	4	4	7	11	354,52	199,49	5,25	249,05	49,81	11,95	2,47	95,42	19,28	5,46	120,15	79,34	39,77	12,40	19,65	1154,54
							354,80	199,04	5,25	249,24	49,85	11,96	2,48	95,50	19,29	5,46	120,25	78,79	39,59	12,44	19,54	1204,30
							354,80	199,27	5,25	249,24	49,85	11,96	2,48	95,50	19,29	5,46	120,25	79,02	39,65	12,42	19,58	1129,81
OS-16- 20-7-4-7	16	20	7	4	7	11	353,90	200,37	4,68	245,28	49,06	20,60	2,21	93,98	18,98	9,41	122,37	78,00	38,93	14,17	18,53	1079,62
							354,11	199,30	4,68	245,43	49,09	20,62	2,21	94,03	19,00	9,41	122,44	76,86	38,56	14,25	18,33	1056,94
							354,78	199,84	4,69	245,89	49,18	20,65	2,21	94,21	19,03	9,43	122,68	77,16	38,61	14,24	18,35	1074,49
OS-16- 30-4-4-7	16	30	4	4	7	11	354,75	198,83	4,95	231,90	69,57	12,06	2,33	88,85	26,92	5,51	121,28	77,55	39,00	16,31	17,85	1317,56
							354,94	199,96	4,95	232,03	69,61	12,07	2,33	88,90	26,94	5,51	121,35	78,61	39,31	16,23	18,02	1448,58
							354,45	199,39	4,94	231,71	69,51	12,05	2,33	88,78	26,90	5,50	121,18	78,21	39,22	16,25	17,97	1397,46
OS-16- 30-10-4-7	16	30	10	4	7	11	354,34	197,32	4,87	219,43	65,83	28,53	2,30	84,07	25,48	13,03	122,58	74,74	37,88	19,51	16,49	2411,80
							355,11	199,37	4,88	219,91	65,97	28,59	2,30	84,26	25,53	13,05	122,84	76,52	38,38	19,35	16,74	2417,10
							354,45	198,34	4,87	219,50	65,85	28,54	2,30	84,10	25,48	13,03	122,61	75,73	38,18	19,42	16,64	2429,53
OS-17- 10-10-4-7	17	10	10	4	7	11	376,38	200,96	5,15	275,60	27,56	30,32	2,43	105,59	10,67	13,84	130,10	70,85	35,26	12,20	17,50	1494,98
							376,56	200,36	5,15	275,73	27,57	30,33	2,43	105,65	10,67	13,85	130,17	70,19	35,03	12,24	17,37	1521,82
							377,00	200,66	5,16	276,06	27,61	30,37	2,43	105,77	10,68	13,87	130,32	70,34	35,05	12,23	17,39	1528,18
OS-17- 20-4-4-7	17	20	4	4	7	11	376,10	203,64	5,06	267,56	53,51	12,84	2,39	102,51	20,71	5,86	129,09	74,55	36,61	13,05	17,83	1712,09
							377,02	201,63	5,08	268,21	53,64	12,87	2,39	102,76	20,76	5,88	129,40	72,22	35,82	13,21	17,39	1641,25
							376,94	202,63	5,07	268,16	53,63	12,87	2,39	102,74	20,76	5,88	129,37	73,26	36,15	13,14	17,58	1697,83
OS-17- 30-10-4-7	17	30	10	4	7	11	375,85	203,30	5,14	232,86	69,86	30,27	2,43	89,22	27,03	13,82	130,08	73,22	36,02	20,10	15,55	2939,30
							375,98	201,30	5,15	232,94	69,88	30,28	2,43	89,25	27,04	13,83	130,12	71,18	35,36	20,30	15,22	3041,36
							376,87	202,30	5,16	233,49	70,05	30,35	2,43	89,46	27,11	13,86	130,43	71,87	35,53	20,25	15,30	2899,46

Tabela A.6 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 7 dias de cura e molalidade=4

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B _{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	q _u (kPa)
OS-15-10- 4-1-7	15	10	4	1	7	11	328,81	197,12	1,07	260,57	26,06	11,46	0,50	99,83	10,08	5,24	115,15	81,97	41,58	7,77	23,42	482,32
							329,60	196,73	1,07	261,19	26,12	11,49	0,50	100,07	10,11	5,25	115,43	81,30	41,33	7,81	23,25	602,92
							329,38	196,93	1,07	261,02	26,10	11,48	0,50	100,01	10,10	5,24	115,35	81,57	41,42	7,79	23,31	515,36
OS-16-20- 7-1-7	16	20	7	1	7	11	350,57	205,12	1,18	246,59	49,32	20,71	0,56	94,48	19,09	9,46	123,02	82,09	40,02	13,92	19,15	1546,12
							349,71	201,50	1,18	245,98	49,20	20,66	0,56	94,25	19,04	9,43	122,72	78,78	39,10	14,13	18,62	1507,08
							350,97	203,30	1,18	246,87	49,37	20,74	0,56	94,59	19,11	9,47	123,16	80,14	39,42	14,06	18,81	1581,43
OS-17-30- 10-1-7	17	30	10	1	7	11	372,56	203,29	1,23	235,74	70,72	30,65	0,58	90,32	27,37	13,99	131,68	71,60	35,22	20,35	15,15	3159,17
							372,78	202,17	1,23	235,88	70,76	30,66	0,58	90,37	27,39	14,00	131,76	70,40	34,82	20,47	14,95	2971,03
							373,00	202,73	1,23	236,02	70,81	30,68	0,58	90,43	27,40	14,01	131,84	70,89	34,97	20,43	15,02	3047,66
OS-15-10- 4-6-7	15	10	4	6	7	11	334,45	197,11	6,46	260,58	26,06	11,47	3,05	99,84	10,08	5,24	115,16	81,95	41,58	7,77	23,41	343,50
							335,37	197,06	6,47	261,30	26,13	11,50	3,05	100,12	10,11	5,25	115,48	81,58	41,40	7,80	23,30	394,71
							335,25	197,09	6,47	261,21	26,12	11,49	3,05	100,08	10,11	5,25	115,44	81,65	41,43	7,79	23,32	373,96
OS-16-20- 7-6-7	16	20	7	6	7	11	357,65	197,11	6,59	249,63	49,93	20,97	3,11	95,65	19,32	9,58	124,54	72,57	36,82	14,66	17,36	621,86
							357,84	199,83	6,60	249,77	49,95	20,98	3,11	95,70	19,33	9,58	124,61	75,22	37,64	14,47	17,81	518,28
							357,51	198,47	6,59	249,54	49,91	20,96	3,11	95,61	19,31	9,57	124,49	73,98	37,27	14,55	17,61	563,80
OS-17-30- 10-6-7	17	30	10	6	7	11	379,19	201,43	7,24	236,67	71,00	30,77	3,41	90,68	27,48	14,05	132,20	69,23	34,37	20,62	14,73	1814,76
							379,32	202,02	7,24	236,75	71,03	30,78	3,42	90,71	27,49	14,05	132,25	69,77	34,54	20,56	14,81	1902,58
							379,91	201,73	7,25	237,12	71,14	30,83	3,42	90,85	27,53	14,08	132,45	69,27	34,34	20,62	14,72	1928,47

Tabela A.7 - Dados Gerais dos corpos de prova de RCS para 7 dias de cura e molalidade=1&6

Mistura	γ_d (kN/m ³)	Teor de telha (%)	Teor de cal (%)	NaOH (molal)	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (%)	Massa do CP (g)	Volume (cm ³)	Massa NaOH (g)	Massa areia (g)	Massa telha (g)	Massa cal (g)	Vol. NaOH (cm ³)	Vol. areia (cm ³)	Vol. telha (cm ³)	Vol. cal (cm ³)	Vol. sólidos (cm ³)	Vol. vazios (cm ³)	η (%)	B_{IV} (%)	$\eta/B_{IV}^{0,28}$	G_0 (MPa)	PMA (%)
OS-15-10-7-0		10					1696,40	1000,95	0	1308,01	130,80	100,72	0	501,15	50,62	45,99	597,76	403,19	40,28	9,65	21,35	1546,09	31,62
OS-15-20-7-0	15	20	7	0	7	11	1700,80	1007,66	0	1189,39	237,88	99,91	0	455,71	92,06	45,62	593,38	414,28	41,11	13,66	19,77	1794,84	18,62
OS-15-30-7-0		30					1700,60	1006,83	0	1093,11	327,93	99,47	0	418,82	126,91	45,42	591,15	415,69	41,29	17,12	18,64	1983,83	14,99
OS-16-10-7-0		10					1829,40	1001,64	0	1395,56	139,56	107,46	0	534,70	54,01	49,07	637,77	363,87	36,33	10,29	18,91	1796,22	19,28
OS-16-20-7-0	16	20	7	0	7	11	1833,35	999,29	0	1295,07	259,01	108,79	0	496,20	100,24	49,67	646,11	353,18	35,34	15,00	16,56	1950,41	9,79
OS-16-30-7-0		30					1836,93	993,25	0	1191,48	357,44	108,42	0	456,50	138,33	49,51	644,34	348,91	35,13	18,91	15,42	2119,14	7,21
							1850,00	987,76	0	1201,45	360,44	109,33	0	460,33	139,49	49,92	649,74	338,02	34,22	19,18	14,97	2293,60	7,10
OS-17-10-7-0		10					1939,18	1011,59	0	1488,33	148,83	114,60	0	570,24	57,60	52,33	680,17	331,42	32,76	10,87	16,80	1947,07	15,87
OS-17-20-7-0	17	20	7	0	7	11	1947,94	1006,24	0	1370,75	274,15	115,14	0	525,19	106,10	52,58	683,87	322,38	32,04	15,77	14,80	2302,41	7,82
OS-17-30-7-0		30					1937,00	1024,29	0	1243,81	373,14	113,19	0	476,56	144,41	51,68	672,65	351,64	34,33	19,14	15,02	2375,28	6,33
OS-15-10-7-3		10					1709,24	986,47	15,87	1303,87	130,39	100,40	7,49	499,57	50,46	45,84	595,87	390,60	39,60	9,76	20,92	1002,36	19,57
OS-15-20-7-3	15	20	7	3	7	11	1709,86	1004,35	16,64	1189,08	237,82	99,88	7,85	455,59	92,03	45,61	593,23	411,12	40,93	13,70	19,67	1242,28	13,10
OS-15-30-7-3		30					1711,73	996,64	16,43	1100,62	330,18	100,16	7,75	421,69	127,78	45,73	595,21	401,44	40,28	17,41	18,10	1676,35	10,51
OS-16-10-7-3		10					1818,00	1005,91	16,72	1388,33	138,83	106,90	7,89	531,93	53,73	48,81	634,47	371,45	36,93	10,19	19,28	1353,41	13,99
OS-16-20-7-3	16	20	7	3	7	11	1820,82	1008,90	17,82	1265,39	253,08	106,29	8,41	484,82	97,94	48,54	631,30	377,60	37,43	14,52	17,69	1747,32	9,90
OS-16-30-7-3		30					1860,57	1018,17	19,11	1186,46	355,94	107,97	9,01	454,58	137,75	49,30	641,63	376,54	36,98	18,37	16,37	1590,68	8,01
OS-17-10-7-3		10					1929,94	1019,29	18,52	1466,58	146,66	112,93	8,74	561,91	56,76	51,56	670,23	349,06	34,25	10,63	17,67	1500,14	11,94
OS-17-20-7-3	17	20	7	3	7	11	1933,72	1025,57	19,48	1339,09	267,82	112,48	9,19	513,06	103,64	51,36	668,07	357,50	34,86	15,11	16,30	1893,23	6,59
OS-17-30-7-3		30					1932,33	1025,77	18,84	1240,15	372,04	112,85	8,89	475,15	143,98	51,53	670,66	355,11	34,62	19,06	15,17	2324,87	5,07
							1972,28	1030,86	20,99	1251,90	375,57	113,92	9,90	479,66	145,34	52,02	677,02	353,84	34,32	19,15	15,02	2199,58	5,56

Tabela B - Dados Gerais dos corpos de prova de Durabilidade por molhagem/secagem e escovação