



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

LUIZ FLÁVIO REIS FERNANDES

**AGLOMERANTE ÁLCALI-ATIVADO CONTENDO
RESÍDUO DE PORCELANA**

CAMPINAS
2022

LUIZ FLÁVIO REIS FERNANDES

**AGLOMERANTE ÁLCALI-AATIVADO CONTENDO
RESÍDUO DE PORCELANA**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Miriam Gonçalves Miguel

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO VALDIR MORAES PEREIRA E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MIRIAM GONÇALVES MIGUEL.

ASSINATURA DA ORIENTADORA

**CAMPINAS
2022**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F391a Fernandes, Luiz Flávio Reis, 1982-
Aglomerante álcali-ativado contendo resíduo de porcelana / Luiz Flávio Reis
Fernandes. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Miriam Gonçalves Miguel.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Geopolímeros. 2. Ligantes. 3. Porcelana. 4. Argamassa. 5. Resíduos
como material de construção. I. Miguel, Miriam Gonçalves, 1970-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Alkali-activated binder containing porcelain waste

Palavras-chave em inglês:

Geopolymers

Binders

Porcelain

Mortar

Waste as construction material

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Miriam Gonçalves Miguel [Orientador]

José Roberto Guimarães

Adriano Luiz Tonetti

Gladis Camarini

Lia Lorena Pimentel

Michelle Santos Rodrigues

Data de defesa: 01-09-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: 0000-0002-8111-5365

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8081948908775341>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

**AGLOMERANTE ÁLCALI-ATIVADO CONTENDO RESÍDUO
DE PORCELANA**

LUIZ FLÁVIO REIS FERNANDES

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Profa. Dra. Miriam Gonçalves Miguel
Presidente e Orientadora/UNICAMP

Prof. Dra. Gladis Camarini
FECFAU/UNICAMP

Prof. Dr. José Roberto Guimarães
FECFAU/UNICAMP

Prof. Dr. Adriano Luiz Tonetti
FECFAU/UNICAMP

Profa. Dra. Michelle Santos Rodrigues
FATEC/ TATUAPÉ

Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
PUC

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 01 de setembro de 2022

**À minha esposa Édna, meus filhos Arthur e Luiza;
à minha mãe Maria Lúcia, ao meu pai Antônio Carlos,
e aos meus irmãos e sobrinhos dedico este trabalho.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir serenidade, dedicação, lucidez e saúde. Grato a tudo pelo que Ele tem me proporcionado.

À minha família: pais, irmãos, sobrinhos, tios, cunhados, etc, em especial minha esposa Édna e meus filhos Arthur e Luiza, por estarem comigo em todos os momentos.

À professora Dra. Gladis Camarini, pela orientação, paciência e qualidade nas indicações e sugestões. À professora Dra. Miriam, pelo acolhimento inicial e final.

Agradeço à UNICAMP e ao professor José Roberto (Tuca) por acreditar no meu potencial e me incentivar diante de adversidades. Aos professores membros das bancas de qualificação e defesa pelas sugestões. Ao pessoal do laboratório: Ademir, Rodolfo e, carinhosamente ao amigo Marçal (*in memoriam*) por todo suporte dado nos ensaios.

De uma maneira especial, minha gratidão ao amigo/irmão Rodrigo Henrique Geraldo, sem o qual não teria conseguido atingir meus objetivos. Agradeço também a sua família: Sra. Lori (mãe), Evaildo (pai), Renan (irmão) e Camila (namorada) pelas noites de acolhimento em Pedreira/SP.

A todos os professores do programa Saneamento e Ambiente da FECFAU, em especial aos professores Adriano Toneti e Edson Nour. À Rosana da Secretaria, pela cordialidade e presteza no atendimento.

Ao IFSULDEMINAS por me permitir, dentro da estrutura de capacitação, realizar o doutorado e assim colaborar para o desenvolvimento da instituição.

Aos colegas e estudantes do IFSULDEMINAS campus Inconfidentes. Aos amigos, companheiros de viagem para Campinas/SP: Fábio Albarici, Tone Marcílio, Luciano Barbosa, Julierme Vagner e Bia. Aos amigos que ganhei nesse período e levo por toda a vida: Otacísio Teixeira, Francisco Madrid, Maria Emília, Sara Beloti. Ao amigo Professor Carlos Marmorato

pelo apoio, motivação e ensinamentos. Todos aqueles que, de uma forma ou de outra colaboraram na construção desse projeto.

RESUMO

Os impactos ambientais decorrentes da indústria da construção civil têm sido, cada vez mais, motivos de preocupação da sociedade e da comunidade científica. A indústria do cimento Portland é responsável por consideráveis emissões de CO₂ e a utilização dos agregados convencionais representa um elevado consumo de recursos naturais não renováveis. Por isso, deve-se buscar alternativas para serem aplicadas na construção civil. Dentre as práticas sustentáveis utilizadas na construção civil, estão a redução de resíduos gerados e a escolha por materiais que promovam a substituição de recursos naturais, dentre eles os resíduos gerados nas atividades industriais, comerciais e agrícolas. Neste contexto, apresentam-se os aglomerantes álcali-ativados, materiais que representam produção mais limpa por permitir a utilização de resíduos na sua composição e incorporar componentes diferentes ao cimento Portland. Assim, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a utilização do resíduo do Isolador Elétrico de Porcelana em substituição a areia natural em argamassas álcali-ativadas. Hidróxido de Sódio (NaOH) e cinza da casca de arroz foram utilizados para a produção do ativador alcalino e o metacaulim como fonte de aluminossilicato. Para isso, o trabalho foi dividido em três fases, caracterização dos materiais (Fase 1), produção do Silicato de Sódio e estudo da incorporação do resíduo de porcelana (Fase 2) e avaliação do desempenho das propriedades nos estados fresco e endurecido, durabilidade e microestrutura das argamassas álcali-ativadas (Fase 3). As argamassas álcali-ativadas apresentaram bons resultados de resistência a compressão, resistência à tração na flexão, boa aderência em substrato existente e considerável módulo de elasticidade, indicando potencial de utilização como material de reparo, embora o resíduo de porcelana não promoveu reação pozolânica. A quantidade do resíduo de porcelana nas argamassas influenciou diretamente a permeabilidade ao ar, a absorção capilar e a absorção total de água. A presença do resíduo inibiu o surgimento de eflorescência e evitou a lixiviação de alguns elementos presentes nos materiais de origem. De uma maneira geral, o resíduo de porcelana apresentou viabilidade para a substituição da areia natural na produção de argamassas álcali-ativadas, oferecendo utilização sustentável por garantir sua correta destinação final.

Palavras-chave: geopolímeros, ligantes, incorporação de resíduos, porcelana, argamassas de reparo.

ABSTRACT

The environmental impacts from civil construction industry have been increasingly the concern for society and the scientific community. The Portland cement industry is responsible for considerable CO₂ emissions and the use of conventional aggregates represents a high consumption of non-renewable natural resources. Therefore, it is necessary to look for alternatives to be applied in civil construction. Among the sustainable practices used in civil construction are the reduction of waste generated and the choice of materials that promote the replacement of natural resources, including waste generated in industrial, commercial and agricultural activities. In this context, alkali-activated binders are presented. These materials represent cleaner production by allowing the use of waste in its composition and incorporating different components to Portland cement. Thus, the present work aims to evaluate the use of the Porcelain Electric Insulator waste to replace the natural sand in alkali-activated mortars. Sodium hydroxide (NaOH) and rice ash were used to make a sodium silicate which was used as alkali activator, and metakaolin was the aluminosilicate source. For this, the work was divided into three phases, characterization of materials (Phase 1), production of Sodium Silicate and study of the incorporation of porcelain waste (Phase 2) and evaluation of the performance of the properties in the fresh and hardened states, durability and microstructure of alkali-activated mortars (Phase 3). The alkali-activated mortars presented good results in compressive and flexural strengths, bond strength and considerable modulus of elasticity, indicating potential of use as repair material, although the porcelain residue did not promote a pozzolanic reaction. The amount of porcelain residue in the mortar directly influenced air permeability, capillary suction and water absorption. The presence of the residue inhibited the appearance of efflorescence and prevented the leaching of some elements present in the source materials. In general, the porcelain residue presented feasibility for the replacement of natural sand in the production of alkali-activated mortars, offering sustainable use by guaranteeing its correct final destination.

Keywords: Geopolymer, binder, waste incorporation, porcelain, mortars repair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Isoladores de Porcelana	26
Figura 3.1 – Estrutura Sialato	35
Figura 3.2 - Modelo de reação de ativação alcalina proposto por Glukhosvky	37
Figura 3.3 - Fixação de Alumina e Sílica no processo de reação de ativação alcalina	37
Figura 3.4 – MEV de aglomerante álcali-ativado contendo metacaulim	39
Figura 3.5 - Efeitos da Molaridade do NaOH em relação ao tempo de pega	46
Figura 3.6- Vaso de aglomerante álcali-ativado a base de metacaulim	56
Figura 3.7- Instituto de Mudança Global (GCI), da Universidade de Queensland	57
Figura 5.1 – Programa Experimental da Pesquisa – Primeira Fase	73
Figura 5.2 – Programa Experimental da Pesquisa – Segunda Fase	75
Figura 5.3 – Programa Experimental da Pesquisa – Terceira Fase	78
Figura 5.4 - Curva Granulométrica da AN e da ARP	81
Figura 5.5 - Aspecto da AN e do RP	81
Figura 5.6 - Difratoograma do RP	83
Figura 5.7 - Sílica da Casca do Arroz e Metacaulim	84
Figura 5.8 - Aparato para dissolução da sílica da SCA	86
Figura 5.9 - Misturador Mecânico para preparação das misturas	87
Figura 5.10 - Aparelho de Vicat e Mesa de Consistência	90
Figura 5.11 - Versa Tester para aferição da Resistência à Flexão e Compressão	91
Figura 5.12 – Esquema do Triplet Test	92
Figura 5.13 – Ilustração esquemática do ensaio de Permeabilidade ao ar	94
Figura 5.14 - Esquema do ensaio de ataque por cloreto	97
Figura 5.15 - Esquema do ensaio de ataque por sulfato	98
Figura 6.1 - Tempos de Início e Fim de Pega e suas respectivas diferenças	101
Figura 6.2 - Regressão linear Tempo de Pega Inicial x Relação Água/Materiais secos	103
Figura 6.3 – Índice de Consistência das Argamassas	104
Figura 6.4 - Resistência à Compressão das Argamassas álcali-ativadas	107
Figura 6.5 - Resistência à Tração na Flexão das Argamassas álcali-ativadas	110
Figura 6.6 - Resistência à Compressão das argamassas álcali-ativadas	111
Figura 6.7 - Resistência à Tração na Flexão das argamassas álcali-ativadas	112
Figura 6.8 - Módulo de Elasticidade	115
Figura 6.9 - Resultados do ensaio de aderência das argamassas	117
Figura 6.10 - Rupturas das argamassas álcali-ativadas após ensaio de aderência	119
Figura 6.11 - Permeabilidade ao ar das argamassas	120
Figura 6.12. Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade	122
Figura 6.13 – Coeficiente de Capilaridade	123
Figura 6.14 – Amostras submetidas ao ensaio de absorção por capilaridade	124
Figura 6.15 - Absorção Total de Água	125
Figura 6.16 - Índice de Vazios	125
Figura 6.17. Imagens das Argamassas submetidas ao ensaio de efluorescência	126
Figura 6.18 – Amostras submetidas ao ensaio de ataque por cloretos	129
Figura 6.19 - Comparação entre as argamassas submetidas ao ataque por cloretos	131
Figura 6.20 - Alteração de massa das argamassas	132
Figura 6.21 - Resistência à compressão das 4 argamassas	134
Figura 6.22 - Efluorescências das argamassas submetidas ao ataque por sulfato	135
Figura 6.23 - Elementos lixiviados da argamassa AN ₁₀₀	138
Figura 6.24 - Elementos lixiviados da argamassa AN ₇₀ PRP ₃₀	139

Figura 6.25 - Elementos lixiviados da argamassa ARP ₇₀ PRP ₃₀	139
Figura 6.26 - Elementos lixiviados da argamassa ARP ₅₀ PRP ₃₀	140
Figura 6.27 - MEV da matriz da argamassa AN ₁₀₀	144
Figura 6.28 - MEV da matriz da argamassa ARP ₅₀ PRP ₅₀	144
Figura 6.29 - MEV da matriz da argamassa AN ₁₀₀ e ARP ₅₀ PRP ₅₀	145
Figura 6.30 - MEV da matriz da argamassa ARP ₇₀ PRP ₃₀	145
Figura A.1 - Resistência Mecânica das misturas	180
Figura A.2 - Consistência	181
Figura A.3 - Resistência Mecânica aos 7 dias das misturas com aditivo	183
Figura A.4 - Resistência Mecânica de 1 e 7 dias das misturas com aditivo	184
Figura A.5 - Resistência à Compressão das argamassas Ref e AN ₁₀₀	185
Figura A.6 - Resistência à Compressão de argamassas com 30 e 45 min de dissolução	185

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Comparação Geral entre Cimento Portland e Materiais Álcali-ativados	21
Quadro 3.1 - Matérias-primas utilizadas em aglomerantes álcali-ativados	41
Quadro 3.1 - Matérias-primas utilizadas em aglomerantes álcali-ativados - continuação	42
Quadro 3.2 - Aplicação dos Aglomerantes Álcali-Ativados	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Teores de Sílica e Alumina presentes em alguns tipos de materiais	44
Tabela 3.2 - Valores de resistência à compressão a partir de diferentes matérias-primas	50
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos materiais para reparo	65
Tabela 5.1 - Materiais e suas funções nas misturas	79
Tabela 5.2 - Características físicas da Areia Natural	80
Tabela 5.3 - Características físicas da ARP	80
Tabela 5.4 - Composição química do RP por FRX.	82
Tabela 5.5 - Composição química dos materiais por FRX	84
Tabela 5.6 - Nomenclatura e descrição das pastas e argamassas	86
Tabela 5.7 - Misturas experimentais	87
Tabela 5.8 - Características dos Ensaios	88
Tabela 5.9 - Relações molares utilizadas nas misturas	89
Tabela 6.1 - Análise de Variância da Resistência à Compressão	106
Tabela 6.2 - Análise de Variância da Resistência à Tração na Flexão	109
Tabela 6.3 - ANOVA para os testes de compressão e flexão	112
Tabela 6.4 - Teste estatístico de Scott-Knott com 5% de significância	112
Tabela 6.5 - Conceitos Qualitativos de Aderência	118
Tabela 6.6 - Equação da Reta, Coeficientes de Correlação e Absorção Capilar	123
Tabela 6.7 - Concentrações dos elementos lixiviados (mg/L). Parte 1.	137
Tabela 6.7 - Concentrações dos elementos lixiviados (mg/L). Parte 2	137
Tabela 6.8 - Características de diferentes materiais de reparo - literatura	147
Tabela 6.9. Características de Argamassas de Reparo Comerciais	149
Tabela 6.10. Características de Argamassas de Reparo	150
Tabela A.1 - Caracterização das misturas	179
Tabela A.2. Descrição das misturas com aditivo superplastificante	181
Tabela A.3 - Argamassas moldadas com diferentes tempos de dissolução	184
Tabela B.1 - Tempos de Início e Fim de Pega, Relação Água/Materiais secos	187
Tabela C.1 - Teste de Scott-Knott das médias de Resistência à Tração na Flexão	188
Tabela C.2 - Teste de Scott-Knott das médias de Resistência à Compressão	188

LISTA DE ABREVIACÕES

AAA – aglomerante álcali-ativado
ABCERAM - Associação Brasileira Cerâmica
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
ANOVA - Análise de Variância
AN - Areia natural
ARP – Areia de porcelana
CETESB – Companhia Ambiental Paulista de Saneamento
CPV-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
CP – Cimento Portland
DMC - Dimensão máxima característica
ETA - Estação de Tratamento de Água
FRX - Fluorescência de Raios-X
DRX - Difração de Raios-X
GCI - Instituto de Mudança Global da Universidade de Queensland
GEE – Gases do Efeito Estufa
IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração
IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MK - Metacaulim
MPa – Mega Pascal
NBR – Norma Brasileira
PIB – Produto Interno Bruto
PRP – Resíduo de Porcelana em pó
PS - Polissialato
PSS - Polissialato-siloxo
PSDS - Polissialatodisiloxo
RP – Resíduo de porcelana
SANASA - Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento
SCA - sílica da casca de arroz
SS - Silicato de Sódio Alternativo
USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo	23
1.2 Objetivos Específicos	23
1.3 Delimitações do Estudo	23
1.4 Estrutura da Tese	24
2. RESÍDUO DE PORCELANA	25
3. MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS	32
3.1 A Química da Reação Alcalina	34
3.2 Matérias Primas	39
3.3 Ativadores Alcalinos	45
3.4 Propriedades dos Materiais Álcali-ativados	48
3.4.1 Influência da Relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	48
3.4.2 Resistência Mecânica	50
3.4.3 Consistência (Trabalhabilidade)	52
3.4.4 Cura	53
3.6 Aplicações dos Materiais Álcali-ativados	55
3.7 Lacunas existentes nas propriedades dos Materiais Álcali-ativados	58
4. MATERIAIS DE REPARO	62
5. MATERIAIS E MÉTODOS	72
5.1 Primeira fase do programa experimental	72
5.2 Segunda fase do programa experimental	73
5.2.1 Etapa A	73
5.2.2 Etapa B	74
5.3 Terceira fase do programa experimental	75
5.3.1 Etapa A	76
5.3.2 Etapa B	77

5.4 Materiais	79
5.4.1 Água	79
5.4.2 Areia Natural (AN)	79
5.4.3 Resíduos de Porcelana (RP)	80
5.4.4 Sílica de Casca de Arroz (SCA)	83
5.4.5 Metacaulim (MK)	84
5.4.6 Hidróxido de Sódio (NaOH)	85
5.4.7 Silicato de Sódio Alternativo (SS)	85
5.5 Misturas experimentais	86
5.5.1 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova	88
5.6 Relações Molares	89
5.7 Métodos	87
5.7.1 Ensaio no estado Fresco	89
a) Tempo de Pega das Pastas	89
b) Consistência das argamassas no estado fresco	90
5.7.2 Estado Endurecido	90
a) Propriedades Mecânicas	90
a.1) Resistência à Compressão	90
a.2) Resistência à Tração na Flexão	90
5.7.3 Módulo de Elasticidade	91
5.7.4 Aderência em substrato existente	92
5.7.5 Permeabilidade ao ar	93
5.7.6 Absorção de água por capilaridade	95
5.7.7 Absorção Total e Índice de Vazios	95
5.7.8 Eflorescência	96
5.7.9 Ataque por Cloreto	97
5.7.10 Ataque por Sulfato	98
5.7.11 Lixiviação	98
5.7.12 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	99
5.8 Tratamento de Dados	99
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	101
6.1 Estado Fresco	101

6.1.1 Tempo de pega	101
6.1.2 Consistência das Argamassas	104
6.2 - Estado Endurecido	106
6.2.1 Resistência à Compressão	106
6.2.2 Resistência à Tração na Flexão	109
6.3 Resistência à Compressão e Flexão das argamassas	111
6.4 Módulo de Elasticidade	114
6.5 Aderência em substrato existente	116
6.6 Permeabilidade ao ar	120
6.7 Absorção de água por capilaridade	121
6.8 Absorção Total de Água e Índice de Vazios	124
6.9 Eflorescência	126
6.10 Ataque por cloretos	128
6.11 Ataque por Sulfatos	131
6.11.1 Alteração de Massa	132
6.11.2 Resistência à Compressão - Ataque por sulfato	133
6.11.3 Eflorescência - Ataque por sulfato	135
6.12 Lixiviação	136
6.13 Microestrutura Eletrônica de Varredura	143
6.14 Utilização das argamassas como material de reparo	146
7. CONCLUSÃO	153
REFERÊNCIAS	154
APÊNDICE A - Ensaio Preliminares	179
A.1 - 1ª Etapa	180
A.2 - 2ª Etapa	181
A.2.1 – Consistência das argamassas com aditivo	181
A.2.2 - Resistência Mecânica das argamassas com aditivo	182
A.3 - 3ª Etapa	183
A.4 - 4ª Etapa	184
APÊNDICE B - Tempos de Pega das Pastas	187

APÊNDICE C- Teste de Scott-Knott das médias dos ensaios de Resistência à 188
Tração na Flexão e Resistência à Compressão

1

INTRODUÇÃO

O cimento Portland (CP) é um material de construção comumente utilizado devido ao baixo custo, fácil disponibilidade, durabilidade e capacidade de ser moldado em qualquer formato ou tamanho. Além disso, o modelo de desenvolvimento da sociedade requer uma elevada produção de CP, o que faz com que o seu consumo seja cada vez mais necessário.

A produção de CP evoluiu de 594 milhões de toneladas em 1970 para 2.228 milhões de toneladas em 2005, sendo atribuída aos países em desenvolvimento grande parte deste crescimento, de modo especial à China (TAYLOR; TAM; GIELEN, 2006; SINGH; KUMAR; RAI, 2020).

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o mercado de CP no Brasil movimentou 411 milhões de toneladas em 202, sendo 273 milhões de toneladas para exportação e 138 milhões de toneladas de CP em importação (SNIC, 2022). O Brasil possui um parque produtor de cimento com 91 fábricas, cuja capacidade é de 94 milhões de toneladas por ano, porém, a produção se limita a 57 milhões de toneladas, sendo produzidas em 80 municípios distribuídos em 23 estados Brasileiros. O setor ainda gera mais de 18 mil empregos diretos, o que demonstra a sua importância no desenvolvimento nacional (SNIC, 2022).

A produção de CP provoca, devido à descarbonatação do calcário (CaCO_3), a emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2). Por essa razão, decorre atualmente a preocupação com as questões ambientais por parte da indústria cimentícia.

Para Bhutta *et al.* (2017), a indústria de cimento se transformou em uma grande fonte de emissões de GEE, já que o resultado da sua produção tradicional demanda elevado consumo de energia, alto consumo de recursos naturais, resultando em uma das ações antrópicas mais impactantes em relação ao meio ambiente. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) da produção de CP são de cerca de 1,5 bilhão de toneladas, representando cerca de 7 a 8% das emissões totais anuais em todo o Globo. Para produzir uma tonelada de cimento são necessárias 2,8 toneladas de matérias-primas (GUO; SHI; DICK, 2010) e são lançadas cerca de 810 kg (CO_2) na produção de cada tonelada de cimento (ZHANG *et al.*, 2018). Além disso, cada tonelada de cimento gera aproximadamente 1 kg de dióxido de enxofre (SO_2) e 2 kg de óxidos de nitrogênio (NO_x). Os custos para captura de CO_2 foram estimados na faixa de 20 a 50 euros

por tonelada, sem incluir os custos adicionais de transporte e armazenamento (SCHNEIDER *et al.*, 2011).

A fim de reduzir a emissão de GEE, os consumos de energia e matérias-primas durante a fabricação do CP, várias opções têm sido buscadas por cientistas e setores industriais. Merece destaque o desenvolvimento de materiais ligantes, cuja fabricação e aplicação reduzem significativamente os impactos negativos ao meio ambiente. Neste sentido, surgem os aglomerantes álcali-ativados (AAA), que permitem reduzir as emissões de carbono e são mais econômicos.

Os AAA são resultantes de uma reação química decorrente da mistura em determinadas proporções de uma fonte de aluminossilicato com um ativador alcalino. A aplicação dos aglomerantes álcali-ativados pode garantir a produção sustentável, econômica, durável e de maior desempenho do que aqueles derivados de CP (DUXSON; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PROVIS, 2006). O Quadro 1.1 indica dados comparativos, do ponto de vista técnico, entre materiais álcali-ativados e o CP.

A preparação dos AAA permite a reincorporação de resíduos, fontes de aluminossilicatos em seus processos, que podem atender as determinações da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305/2010 (Brasil, 2010a), regulamentada pelo Decreto 7404/2010 (Brasil 2010b), ao estabelecer que só devem ser lançados em aterros sanitários aqueles materiais considerados rejeitos, ou seja, materiais que não podem ser reutilizados nem reciclados, seja por falta de tecnologia ou em função da inviabilidade econômica para a sua reutilização ou reciclagem. A mesma lei ainda fomenta o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis (BRASIL, 2010a).

Alguns resíduos agroindustriais calcinados (com ou sem recuperação energética) são utilizados para substituir parcialmente o cimento Portland na produção de argamassas e concretos (PAYÁ; MONZÓ; BORRACHERO, 2010; SHAH; HUSEIEN, 2020). Merece destaque a sílica da casca de arroz (SCA), subproduto bastante utilizado na preparação de materiais para a construção civil, que é um resíduo originado da queima da casca do arroz (APRIANTI *et al.*, 2015; HWANG; HUYNH, 2015). De acordo com a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), a estimativa para a produção brasileira de arroz em 2022 ocorrerá em uma área de 1,7 milhão de hectares, totalizando 11 milhões de toneladas (CONAB, 2022). Para cada tonelada de arroz produzida, cerca de 25% são compostos pelas cascas, que, quando queimadas, geram em torno de 45 kg de cinzas (XU *et al.*, 2012; VILLAQUIRÁN-CAICEDO *et al.*, 2017).

Quadro 1.1 - Comparação Geral entre Cimento Portland e Materiais Álcali-ativados

Parâmetro	Aglomerante Álcali-ativado	Cimento Portland
Materiais	Disponibilidade local de materiais fontes de aluminossilicatos	Depende da disponibilidade de jazidas minerais
Energia	Economia de energia e proteção ambiental	Requer quantidades significativas de energia. Elevada emissão de CO ₂
Preparo	Técnica de preparação simples. Pode ser sintetizado pela mistura de aluminossilicatos reativos às soluções alcalinas e curados a temperatura ambiente	Oneroso processo de produção e extração de matérias-primas
Propriedades	Elevado ganho de resistência em curto período de tempo: pode alcançar cerca de 70% de resistência à compressão nas primeiras 4 h de cura	Necessidade de utilização de materiais com granulometria adequada para a obtenção de boas resistências mecânicas e baixa permeabilidade
	Podem resistir ao ataque de agentes agressivos sem grandes perdas de função garantindo excelente durabilidade	Sujeito à corrosão das armaduras. Baixa resistência ao ataque pelos sulfatos e cloretos
	Alta resistência ao fogo e baixa condutividade térmica	A elevação gradual de temperatura provoca perda de resistência mecânica, fragmentação superficial, fissuração até a própria desintegração da estrutura
	Menor calor de reação e retração	Elevado calor de reação e retração

Fonte: ZHANG, LI e DING. (2004); PINTO (2004); MORALES, CAMPOS e FAGANELLO (2011); DAVIDOVITS (2016).

Resíduos de atividades industriais também têm sido utilizados como agregados (miúdos e graúdos) na produção de argamassas e concretos, tendo em vista a necessidade da correta disposição final destes materiais devido aos grandes volumes produzidos. Dentre os resíduos utilizados como agregados merece destaque o Resíduo de Isolador Elétrico de Porcelana, doravante denominado Resíduo de porcelana (RP), oriundo das atividades de distribuição de energia no país. No Brasil, anualmente, se produz mais de 30.000 toneladas de isoladores cerâmicos, com uma geração de resíduos da ordem de 10% do total produzido (RIBEIRO; SANTOS; BRANDALISE, 2014).

A iniciativa de se produzir argamassas álcali-ativadas com RP pode garantir redução da extração de recursos naturais, já que jazidas minerais seriam supostamente poupadas pela extração de areia. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, no período de 1997 a 2011, a demanda por agregados da construção civil teve um aumento de 460 milhões de toneladas para 673 milhões de toneladas, que corresponde a 46,2% (IBRAM, 2016). Quando se analisa o período entre 2001 e 2011, o crescimento da demanda foi de 92,3%. A ANEPAC reporta que em 2014 o consumo per capita de agregados do brasileiro foi de 3,7 t.hab⁻¹, indicando uma demanda reprimida de agregados para a construção tendo em vista que o consumo per capita da União Europeia, dos Estados Unidos, da China e da Finlândia são de 5,2, 9, 12 e 17 t.hab⁻¹ respectivamente (ANEPAC, 2020). Com base na correlação da evolução da demanda por cimento e do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, projetou, para o intervalo de dez anos (2012-2022), um consumo de 1,12 bilhão de toneladas de agregados (IBRAM, 2020).

Diversas pesquisas têm caracterizado o RP, evidenciando o seu uso na construção civil como pozolana e como agregados (PORTELLA, 2006; CAMPOS, 2009; FRANCO *et al.*, 2010; CAMPOS, 2011; GOMES *et al.*, 2012; LIMA; FERREIRA, 2012; CAMPOS *et al.*, 2014; RIBEIRO, 2015; XU *et al.*, 2015; SHIROMA, 2016; CAMARINI; SOARES, 2018; CAMPOS *et al.*, 2020; PIVÁK *et al.*, 2020, GERALDO; FERNANDES; CAMARINI, 2021). A utilização do RP em AAA têm sido pouco estudados.

Por ser uma fonte de óxido de silício (SiO₂) e de óxido de alumínio (Al₂O₃), o RP tem potencial para ser utilizado na fabricação de materiais álcali-ativados, visando à obtenção de um material com menor impacto ambiental e com os requisitos técnicos necessários para a aplicação na construção civil. A cadeia de produção de todos os componentes produzidos na construção civil deve estar amparada pelos requisitos ambientais, legais e econômicos.

Diante de toda a questão que envolve a produção e a utilização do CP, a demanda por produtos com menores emissões de gases do efeito estufa e baixo consumo de energia e a busca por novos materiais são os principais meios de se reduzir tais emissões. Dessa forma, os AAA se apresentam como agentes cimentantes ambientalmente viáveis, com baixo consumo energético e baixa toxicidade (NIMWINYA *et al.*, 2016).

1.1 Objetivo

Estudar a incorporação de Resíduos de Porcelana (RP) com diferentes granulometrias em argamassas álcali-ativadas.

1.2 Objetivos Específicos

Analisar o comportamento do RP no processo de ativação alcalina;

Identificar um material substituto ao agregado miúdo convencional (areia);

Analisar as propriedades mecânicas das argamassas álcali-ativadas tendo o RP como material substituto ao agregado miúdo;

Investigar a possibilidade de atuação do RP como filler;

Avaliar o desempenho do RP como pozolana em argamassa álcali-ativada;

Investigar a ocorrência de lixiviação dos componentes do material produzido;

Avaliar a durabilidade da argamassa álcali-ativada.

1.3 Delimitação do assunto

Esta pesquisa visa melhorar o desempenho dos AAA a partir da adição de materiais residuais, especificamente o resíduo de porcelana. A crescente aplicação de materiais álcali-ativados no ramo de construção evidencia a necessidade de aprimorar cada vez mais os estudos relacionados ao tema para se obter um material com características ideais para promover a substituição, ainda que parcial, do CP e dos agregados convencionais da construção civil.

O estudo pretende avaliar as propriedades de argamassas álcali-ativadas como um material para a construção civil. Para isso, as misturas são compostas por materiais de baixo impacto ambiental, como sílica da casca do arroz e silicato de sódio alternativo, além de RP, que é um resíduo gerado em todo o mundo.

Em condições de laboratório, este trabalho desenvolve a utilização do resíduo de porcelana em materiais álcali-ativados, particularmente em pastas e argamassas. O emprego do RP será na forma de pó e na forma de agregado miúdo em substituição ao agregado miúdo natural.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese trabalho está dividida em 7 capítulos.

No capítulo 1, Introdução, é apresentado o tema do projeto, o problema a ser explanado, as justificativas que motivam a realização da pesquisa e a estrutura da tese. Complementam o capítulo 1, o objetivo geral do trabalho, bem como os objetivos específicos.

O capítulo 2, Resíduos de Porcelana, apresenta o processo de produção do isolador de porcelana, analisa a geração do resíduo, bem como sua caracterização, e apresenta uma revisão bibliográfica das pesquisas desenvolvidas para a viabilidade técnica de utilização do material na construção.

O capítulo 3, Materiais álcali-ativados, faz uma revisão bibliográfica sobre o processo produtivo do material, abordando a química do processo de ativação alcalina, as aplicações, os tipos e as propriedades destes aglomerantes e as características das matérias-primas utilizadas. Apresenta também algumas propriedades de argamassas e concretos produzidos com esse material bem como algumas lacunas existentes as quais foram abordadas neste trabalho experimental. Ainda neste capítulo são descritos métodos de ensaio de determinação de lixiviação de materiais da construção civil.

O capítulo 4, Materiais de Reparo, apresenta características de materiais de reparo utilizados na construção civil, além de indicar dados técnicos referentes às argamassas álcali-ativadas utilizadas como material de reparo.

O capítulo 5, Materiais e Métodos, engloba os materiais, os métodos de ensaio e suas respectivas normatizações e os equipamentos utilizados para produzir um diagnóstico sobre as propriedades físicas, químicas, mecânicas e microestruturais da argamassa álcali-ativada.

O capítulo 6, Resultados e Discussões, expõe os resultados obtidos de acordo com o planejamento experimental e discute os dados de acordo com o estado da arte relacionado ao assunto. Alguns resultados são explicados por meio de tabelas e/ou gráficos e, em alguns casos, a partir de análise estatística.

O capítulo 7, Conclusões, apresenta o fechamento do trabalho, seguido pelas Referências.

2

RESÍDUO DE PORCELANA

Nas últimas décadas, observou-se um aumento nas pesquisas relacionadas a novos materiais para a construção civil, os quais devem ser produzidos com melhorias em suas aplicações e com uma preocupação em relação ao impacto ambiental causado tanto por eles próprios quanto pelos processos produtivos (AZEVEDO *et al.*, 2017).

A indústria da construção civil está dentre os setores que mais degradam o meio ambiente durante a produção dos seus materiais. Da mesma forma, o setor energético por meio de empresas de transporte e distribuição de energia elétrica, sabendo que a energia elétrica é um bem essencial ao ser humano, tem desenvolvido seus produtos e materiais com índices de confiabilidade o mais elevado possível de modo a satisfazer as necessidades dos consumidores (PEREIRA, 2019).

O sistema de distribuição de energia aéreo, subsector de energia elétrica, destaca-se pela utilização de isoladores elétricos, que têm por finalidade a sustentação de condutores e massas energizadas sem permitir que se estabeleça corrente elétrica (BEZERRA, 2014). Pereira (2019) enfatiza que se os isoladores instalados em infraestruturas elétricas forem dimensionados de maneira errada, não terão a capacidade de suportar sobretensões, caracterizada como uma situação indesejável no processo de condução de energia, causando descargas disruptivas entre os condutores e o apoio.

Os isoladores cerâmicos são o tipo de isolador mais comuns nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Eles apresentam boa resistência mecânica e à corrosão, fornecendo um elevado nível de proteção, sendo que também consistem nos tipos de isoladores mais baratos. São usados desde os primórdios da transmissão de energia elétrica (PEREIRA, 2019).

O isolador de porcelana (Figura 2.1) é um dispositivo utilizado para garantir o isolamento de condutores energizados, sendo necessário que o isolador apresente capacidade de se opor à passagem de corrente elétrica, além de apresentar elevada resistência mecânica (SOUSA *et al.*, 2004).

O processo de fabricação dos isoladores elétricos de porcelana é feito em três etapas distintas, classificadas como: 1) Fabricação de porcelana crua; 2) extrusão, calibração e torneamento e 3) sinterização.

Anteriormente à sinterização, peças defeituosas, sobras de processo e outros refugos são perfeitamente recicláveis com possibilidade de reutilização pelo próprio fabricante. Porém, após sinterizados, dificilmente os materiais podem ser reaproveitados no próprio processo de produção, sendo possível reaproveitá-los na composição de argamassas e concretos, pois esses materiais são geralmente rígidos e uma moagem costuma ser suficiente para fragmentá-los em tamanhos variados, inclusive semelhantes às frações areia e brita (MANCINI *et al.*, 2009).

Figura 2.1 - Isoladores de Porcelana



Fonte: ATS ELÉTRICA (2016); PPC SANTANA (2016)

A norma da Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC 6067-3 define que as porcelanas elétricas podem ser divididas em três classes, cujas diferenças principais estão relacionadas à densidade aparente após a queima e à resistência mecânica.

Diversos são os tipos de isoladores: isolador de pino multicorpo; isolador roldana; isolador com cadeia de ancoragem e isolador tipo disco. Todos esses modelos são fabricados em porcelana e se diferem quanto à aplicação. A porcelana é preparada a partir da queima de argilas como o caulim, constituídas de feldspato, quartzo e outros argilominerais. O tipo de argila depende das condições de aplicação e da relação custo benefício do projeto (ANUNCIAÇÃO, 2013).

De acordo com PEREIRA (2019), estes três elementos desempenham diferentes funções:

Quartzo - O quartzo, além de ser um excelente dielétrico, garante boa resistência térmica, que é fator fundamental a ser considerado devido às elevadas temperaturas que o isolador pode atingir durante o seu funcionamento.

Feldspato - Fornece uma elevada resistência mecânica à mistura cerâmica e, da mesma forma que o quartzo, aumenta a rigidez dielétrica.

Argilomonerais - Permitem moldar a mistura e faz com que o isolador consiga suportar os elevados esforços mecânicos que são exigidos durante a utilização.

Os isoladores de porcelana estão entre os componentes mais produzidos no setor elétrico do Brasil representando um importante segmento de faturamento para o país (QUARESMA, 2018). No Brasil, são seis empresas com nove unidades fabris, cuja capacidade instalada é de 44.000 t.ano⁻¹ e um faturamento anual de 39 milhões de dólares, que gera 1.700 empregos diretos (CETESB, 2020).

Os últimos dados referentes à produção nacional de isoladores elétricos de porcelana foram disponibilizados pela Associação Brasileira de Cerâmica no ano de 2003 e a estimativa foi de cerca de 30.000 toneladas do material. A cidade de Pedreira-SP concentra 80% da produção nacional, cujo passivo anual é de cerca de 25.000 toneladas de isoladores (CAMPOS, 2011).

Os isoladores elétricos de porcelana são amplamente utilizados em função das suas boas propriedades mecânicas e elétricas, aliadas ao baixo custo em relação a outros materiais utilizados na rede de distribuição e transmissão de energia. Esses materiais perdem suas funções após um dado período de uso, tendo necessidade de serem substituídos, e o seu descarte mensal pelas concessionárias do setor elétrico brasileiro atinge dezenas de toneladas (CAMPOS, 2009). Esse dado reforça a necessidade de buscar meios tecnológicos e operacionais para desenvolver procedimentos que visem incorporar esses resíduos de porcelana (RP) na cadeia produtiva, evitando, dessa forma, a geração de impactos ambientais negativos, devido ao passivo criado, pois o RP leva muitos anos para sua decomposição. O problema com a disposição final dos RP deve aumentar, pois têm surgido no mercado nacional brasileiro, isoladores poliméricos que estão substituindo os produtos de porcelana e de vidro na rede elétrica (GIANELLI, 2009; MANCINI *et al.*, 2009), ou seja, a geração do resíduo está direta e proporcionalmente ligada ao processo de substituição dos isoladores utilizados atualmente. Por outro lado, outros países continuarão a utilizar esse material, indicando também um aumento da geração do resíduo devido à continuação da produção nacional para exportação.

Paralelamente à sua utilização, observa-se um grande passivo ambiental deixado a partir da destinação/disposição final dos isoladores de porcelana. O problema ambiental mais evidente em relação a esses tipos de isoladores é a deterioração dos isoladores em locais de alta umidade e de calor intenso. Além disso, o tempo de degradação da porcelana é alto (ROSA JÚNIOR, 2010).

Tanobe *et al.* (2019), promoveram uma Análise do Ciclo de Vida de isoladores de porcelana e identificaram que eles possuíam capacidade de durabilidade maior em relação aos outros analisados. Os autores ainda observaram uma maior estabilidade em ambientes agressivos, concluindo, portanto, que a produção da porcelana resultou em impactos ambientais superiores em relação à produção da fibra de vidro. Tal constatação faz com que seja levada em consideração a possibilidade de recuperação desses materiais por meio de reciclagem e/ou reutilização desses materiais residuais.

As técnicas de reciclagem dos isoladores de porcelana ainda se encontram em desenvolvimento, sendo que a moagem e incorporação em concretos é um dos métodos mais pesquisados na comunidade científica (FRANCO *et al.*, 2010). Por essa razão, procedimentos e alguns estudos têm sido desenvolvidos para mitigar o problema de destinação final destes resíduos. Além do descarte após a utilização, tem-se a questão do desperdício do material durante o processo produtivo.

Nesse sentido, evidencia-se a necessidade do reaproveitamento dos RP, inserindo-os em novos processos químicos, físicos e tecnológicos, dentre eles a incorporação ao cimento Portland ou em processos de ativação alcalina. Esse reaproveitamento visa a uma alternativa de minimização dos impactos ambientais negativos causados e, nessa ótica, a fabricação de materiais para a construção civil apresenta-se como uma solução ambientalmente correta para a sua destinação. O grande apelo ambiental e econômico, que fez com que as empresas vinculadas ao setor elétrico e as concessionárias de energia mudassem sua postura em relação às melhorias das suas atividades, observa-se algumas iniciativas que visam garantir o reaproveitamento dos isoladores elétricos de porcelana.

Nos anos de 2008 e 2009, Mancini *et al.* (2009) avaliaram a geração de resíduos no processo de transformação e distribuição de eletricidade da Eletropaulo e verificaram que o valor médio da peça de isoladores de porcelana e de vidro foi comercializado por valores inferiores a R\$ 1,00, indicando pouco valor agregado ao material residual.

Ao avaliar o potencial de outros meios de reciclagem, os resultados de Franco *et al.* (2010) demonstraram que não existem diferenças apreciáveis entre os isoladores novos e

usados, não houve qualquer degradação no material ao longo do seu tempo de uso. Sobre a potencial reciclagem dos materiais, não foi constatada a presença de contaminantes tóxicos nos isoladores usados; portanto, a utilização destes materiais na forma de agregados para a construção civil pode ser considerada uma alternativa tecnicamente viável e Shiroma (2016) promoveu a caracterização do RP, conforme ABNT NBR 10.004 (2004), que classificou o resíduo como Classe I (perigoso).

Santos Filho e Costa (2005) descreveram os procedimentos para manuseio, transporte, triagem, armazenamento e descarte de isoladores retirados dos serviços de energia elétrica. Os autores garantem que a reciclagem conduzida ou controlada pelas concessionárias de energia elimina ou reduz a possibilidade de falsificações, pois as características originais são mantidas, agregando valor, indicando que sua reutilização pode crescer significativamente, como tem-se observado nos últimos anos.

Portella *et al.* (2006) caracterizaram o concreto com substituição dos agregados naturais por RP. Apesar da aparente vantagem de uso, o autor destacou que alguns efeitos podem prejudicar as aplicações, porque o RP pode ser potencialmente reativo com os cimentos Portland, produzindo reações álcali-agregado, fissuras e diminuição da resistência mecânica final.

Nesse mesmo sentido, a Celtins (Energisa - Companhia Elétrica do Tocantins) tem um programa de reciclagem das porcelanas danificadas retiradas das redes de distribuição e após serem britadas, estão se transformando em agregados artificiais e, por isso, substituem os agregados de origem natural na confecção de placas de concreto armado (CREPALDI, 2010).

Campos *et al.* (2020) desenvolveram uma pesquisa que promoveu a substituição do agregado miúdo por resíduo de porcelana e areia de fundição. Os resultados, nas combinações destes dois tipos de agregados testados, resultaram em argamassas com trabalhabilidade, no estado fresco, e resistência à compressão simples, nas idades de 7, 28, 91, 180 e 365 dias, similares a argamassa convencional e em atendimento às normas vigentes, atingindo 21,7 MPa de resistência à compressão. Ainda, de acordo com os autores, o resíduo de porcelana consiste em materiais potencialmente passíveis de substituição da areia, pois são compostos principalmente por sílica, que combinada aos produtos de hidratação do cimento Portland, resulta na composição do composto C-S-H que confere maior resistência à argamassa.

Resíduos do isolador elétrico de porcelana foram testados como substitutos parciais da areia convencional para avaliar o desempenho em aglomerantes de baixo carbono para materiais à base de cimento Portland. O uso de RP diminuiu muito a porosidade da matriz

composta e a substituição de 10% da areia por RP proporcionou melhor resistência mecânica e menor absorção de água (PIVÁK *et al.*, 2020)

Camarini e Soares (2018), avaliaram o desempenho de pastas e argamassas nos estados fresco e endurecido ao utilizar o RP em substituição ao cimento e a areia natural. Os resultados desse trabalho indicaram que o aumento da quantidade de resíduo aumentou os tempos de pega e houve perda de fluidez, porém com argamassas ainda trabalháveis, cuja consistência chegou a 197 mm. A quantidade de areia de resíduo interferiu nas resistências mecânicas das argamassas, atingindo 15 MPa aos 28 dias, porém individualmente as argamassas apresentaram aumento de resistência com a idade. O estudo concluiu que os resultados da substituição do cimento e da areia pelo resíduo de isolador de porcelana indicaram bons resultados e a possibilidade de seu uso em argamassas.

O trabalho de Ferreira *et al.* (2016) estudou variados tipos de isoladores de porcelana em substituição às pedras empregadas para preenchimento de gabiões no intuito de dispor corretamente os RP avaliando a resistência à compressão e permeabilidade. O trabalho indicou que, apesar de alguns empecilhos, o preenchimento de gabiões a partir da utilização dos RP é uma alternativa viável, promovendo a redução da extração de pedras da natureza e da quantidade de isoladores depositados em aterros.

A utilização de RP em aglomerantes com escória de alto forno ativada por silicato de sódio, com cargas térmicas de 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C e 1200 °C apresentou um bom potencial para usos futuros na construção civil, principalmente em aplicações cujas instalações exijam proteções contra elevadas temperaturas, pois a substituição do RP por areia (agregado miúdo) garantiu um valor de resistência à compressão de 95,3 MPa, na temperatura de 1200 °C, o equivalente a quase o dobro da medição em temperatura ambiente (49,9 MPa) (ZUDA *et al.*, 2008).

No trabalho de Binici (2007), o RP foi identificado como um possível substituto para o agregado graúdo (brita) convencional. Os resultados foram obtidos a partir de ensaios para determinar as resistências à compressão e à flexão de concretos compostos por RP em substituição ao agregado graúdo, tendo o cimento Portland como aglomerante e areia natural como agregado miúdo. O autor identificou boa trabalhabilidade do concreto composto por resíduos cerâmicos, atingindo *slump* de 155 mm para uma relação água/cimento 0,6, enquanto para um concreto convencional, nessas mesmas condições, o valor foi de 48 mm. Além disso, verificou-se que as características de resistência do concreto composto por RP (30 MPa) são comparáveis às do concreto convencional (31 MPa) nas mesmas condições.

Além das características específicas que possibilitam utilizar o RP como agregado, existe a hipótese de se analisar o comportamento desse material como fonte de sílica e alumina para a mistura álcali-ativada. Outra possibilidade é o uso como pozolana, tendo em vista que a soma dos teores de SiO_2 e Al_2O_3 nas pozolanas é usualmente superior a 70%, é possível estabelecer o potencial pozolânico deste material.

A composição química do isolador de porcelana varia de acordo com sua utilização, sendo os mais comuns compostos por, aproximadamente, 30% de caulim e argilominerais, 30% de feldspato e 40% de quartzo (CAMPOS, 2011). Outros elementos, em teores reduzidos, são adicionados na composição influenciando diretamente na qualidade mecânica dos isoladores (MAMEDE FILHO, 1994; ABCERAM, 2016). Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 são predominantes no RP, indicando predominância do SiO_2 (acima de 60%) (PORTELLA *et al.*, 2006; ZUDA *et al.*, 2008; CAMPOS, 2009; CAMPOS, 2011; PEREIRA *et al.*, 2015). Alguns óxidos de metais, em menores teores, também são observados, tais como: TiO_2 , ZnO , SrO , ZrO_2 , PbO , Cr_2O_3 .

A possibilidade de substituição parcial de RP em pó por cimento Portland em argamassa de assentamento mostrou-se viável até uma porcentagem de 12,5% de substituição, pois em termos de propriedades mecânicas e reação pozolânica as amostras tiveram o mesmo desempenho quando comparadas com a referência (LIMA e FERREIRA, 2012). Os resultados obtidos por Shiroma (2016) mostraram que o teor ideal de substituição do cimento Portland por RP seria de, no máximo, 10%, porém, tanto os resultados dos ensaios de caracterização do RP quanto da pasta com cimento Portland mostraram que o RP apresentou características de um material pozolânico. Campos e Paulon (2015) indicaram a possibilidade de produzir 500.000 m^3 de concreto anualmente, com consumo de cimento de 250 kg/m^3 , utilizando-se agregado de porcelana na proporção de substituição de 10 % dos agregados convencionais.

Tendo em vista que os RP são considerados materiais com possibilidade de utilização na construção civil, podendo substituir os agregados convencionais, garantindo, em alguns casos, melhor desempenho mecânico, torna-se importante a avaliação destes resíduos em materiais álcali-ativados. Além disso, a atual necessidade de gerenciar o resíduo, buscando meios para a sua destinação final, permite diminuir o consumo de matérias-primas, cooperando, dessa forma, para o uso sustentável dos recursos naturais.

3

MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS

Pelo fato de o setor de construção civil enfrentar uma crescente pressão tecnológica e comercial pela diminuição da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes ambientais, surgem novas tecnologias que visam aperfeiçoar os métodos de produção aproveitando ao máximo os subprodutos gerados nas atividades de mineração, industriais e agrícolas, gerando menos resíduos e economizando matéria-prima e recursos naturais (PROVIS, 2014). Alguns pesquisadores produziram novos materiais substituindo totalmente ou em partes o cimento tradicional, e o produto álcali-ativado é o material aglomerante com maior potencial (NGUYEN *et al.*, 2017) que surge como alternativa ao cimento Portland.

De acordo com Provis (2018), os aglomerantes álcali-ativados ainda não se enquadram como uma única alternativa ao cimento Portland para atender às demandas futuras do ramo de materiais de construção. Porém, o mesmo autor indica que essa classe de materiais é muito versátil e adaptável localmente e que provavelmente constituirá um componente chave de uma gama de materiais aglomerantes mais ampla usados em todo o mundo no desenvolvimento de uma indústria de materiais de construção sustentável.

Esses materiais, quando comparados ao cimento Portland, possuem vantagens ecológicas e físico-químicas que garantem rápido desenvolvimento de resistência mecânica e durabilidade (BORGES, 2014). As vantagens ecológicas se tornaram evidentes com a possibilidade de serem produzidos à temperatura ambiente, promovendo baixo consumo energético e com baixa liberação de CO₂.

A teoria dos aglomerantes álcali-ativados surgiu na década de 1950 com o pesquisador ucraniano Glukhovsky, ao produzir cimentos álcali-ativados com escórias de alto forno contendo cálcio. Por outro lado, Davidovits foi o primeiro pesquisador que adotou o procedimento sem o uso de cálcio, utilizando argilas calcinadas (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

Os aglomerantes álcali-ativados foram originalmente desenvolvidos como um material alternativo resistente ao fogo, após a ocorrência de uma série de incêndios na Europa. A partir disso, diversos outros autores se propuseram a avaliar as possibilidades de aplicações do material (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Ainda não é encontrada na comunidade científica uma padronização do nome para o produto gerado a partir da ativação alcalina. Embora o termo geopolímero seja usado genericamente para descrever a reação de produtos gerados a partir da síntese da reação de aluminossilicatos em solução alcalina, os compostos álcali-ativados são comumente denominados de: aluminossilicatos de baixa temperatura, cimentos álcali-ativado, geocimentos, concretos poliméricos inorgânicos, cerâmicas alcalinamente ligadas, hidrocerâmicos, cerâmicas alcalinas e cimentos ativados alcalinamente (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; CESARI 2015; PROVIS, 2018).

Existem, basicamente, duas frentes que estabelecem diferentes nomes para os materiais álcali-ativados: geopolímeros e aglomerantes álcali-ativados.

Um conceito bastante difundido na comunidade científica para o termo geopolímero define que a ativação alcalina é uma reação química de polimerização, em que o material de uma fonte de aluminossilicato, misturado com uma solução com elevado pH, forma um material cimentante, conhecido como geopolímero (DAVIDOVITS, 2008). Esse polímero é inorgânico de estrutura amorfa ou semicristalina, dependendo dos materiais empregados na ativação e das condições de cura (DAVIDOVITS, 1991).

Davidovits (2016) destacou que o termo ativação alcalina foi banida de todos os seus trabalhos, pois esse processo, na sua concepção, é diferente da geopolimerização, que apesar do processo de ativação alcalina apresentar bons resultados de resistência mecânica, apresenta problemas técnicos em termos de durabilidade em longo prazo, além de gerar muitos lixiviados que são prejudiciais para o produto final.

Diferentemente dos conceitos estabelecidos por Davidovits, a literatura científica define que materiais álcali-ativados apresentam uma classificação mais ampla, englobando essencialmente qualquer sistema derivado da reação de um álcali com um pó de silicato, sendo, portanto, o geopolímero um subconjunto dos materiais álcali-ativados (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; PROVIS, 2014; PROVIS, 2018). Existe um debate em curso sobre se o termo geopolímero poderia (ou deveria) ser aplicado a sistemas álcali-ativados; porém, esta questão parece basear-se principalmente nos campos do marketing ao invés do campo científico (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

O maior impacto nessa proliferação de diferentes nomenclaturas consiste no fato de os pesquisadores que não estão familiarizados com o assunto encontrarem dificuldades para definir quais termos referem-se aos produtos, além de que poderão não encontrar trabalhos importantes desenvolvidos nessa área (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

De toda forma, define-se que todo geopolímero é fruto de um processo de ativação alcalina, porém a recíproca não é verdadeira. A ativação alcalina é, portanto, uma designação mais abrangente do que a geopolimerização, sendo esta, portanto, uma parte daquela (OSÓRIO, 2006; PROVIS, 2018).

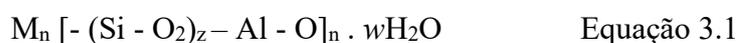
Sendo assim, pelo fato de a difusão dos conceitos provocar diferenciação terminológica e ao mesmo tempo não existir a padronização da nomenclatura conceituando tal tecnologia, emprega-se neste trabalho o termo aglomerante/material álcali-ativado por acreditar ser a ativação alcalina um processo mais abrangente e completo.

3.1 A Química da Reação Alcalina

De acordo com Provis (2018), a ativação alcalina é o termo genérico aplicado à reação de um aluminossilicato sólido (precursor) sob condições alcalinas (induzida pelo por um ativador alcalino), para produzir um aglomerante endurecido que é baseado em uma combinação de alcali-aluminossilicato hidratado. Toda a estrutura do material gerado se dá por meio de uma reação na qual ocorre a transformação do precursor, fonte de aluminossilicato e silicatos, na presença de uma solução alcalina forte ativadora geralmente a base de sódio ou potássio (GLID *et al.*, 2017; LONGHI *et al.*, 2016)

De uma maneira geral, a reação alcalina, parte integrante do processo de ativação alcalina, pode ser definida como sendo o processo que transforma estruturas vítreas em um material cimentício.

A fórmula empírica para descrever a reação de ativação alcalina é indicada pela Equação 3.1 (DAVIDOVTS, 1994)



Sendo:

M, o metal alcalino;

z, pode ser 1, 2 ou 3;

n, o grau de polimerização;

w, o número de moléculas de água.

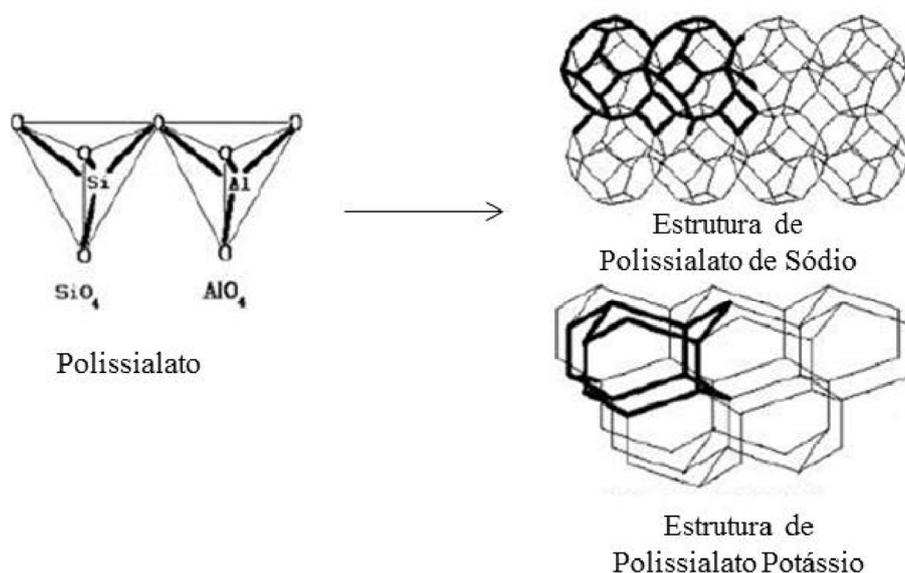
O grau da reação de ativação alcalina é predominantemente dependente da relação Si/Al, que por sua vez determina a estrutura final do material por formar oligômeros na forma

de cadeia sialato (NIMWINYA *et al.*, 2016; ZHUANG *et al.*, 2016). Complementarmente, Bezerra *et al.* (2013) ressaltam que os aglomerantes álcali-ativados podem ser produzidos em três estruturas diferentes de sialato, sendo a relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ o fator determinante dessa diferença:

- 1 - Polissialato (PS) quando a relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é 1:1, M^+ (Si–O–Al–O–)
- 2 - Polissialato-siloxo (PSS) quando a relação é 2:1, M^+ (–Si–O–Al–O–Si–O–);
- 3 - Polissialatodisiloxo (PSDS) quando a relação é 3:1, M^+ (–Si–O–Al–O–Si–O–Si–O–).

O termo polissialato foi determinado para a designação química dos aglomerantes álcali-ativados a partir de fontes de aluminossilicatos, de maneira que o termo sialato é uma abreviação para sílico-óxido-aluminato (DAVIDOVITS, 1991). As estruturas de sialato são compostas por AlO_4^- e SiO_4^- em coordenação tetraédrica (Figura 3.1a) de maneira que os cátions Na^+ e K^+ formam diferentes estruturas moleculares (Figura 3.1b). A presença de cátions é necessária para balancear a carga negativa na estrutura e, em geral, pode-se afirmar que o íon OH^- atua como um catalisador da reação, e o cátion de metal alcalino atua como um elemento formador de estrutura (MAJIDI, 2009; DUXSON *et al.*, 2007).

Figura 3.1 – Estrutura Sialato



- a) Coordenação Tetraédrica b) Estrutura dos Sialatos de Na e K

Fonte: DAVIDOVITS (1991)

É esperado que o alumínio apresente coordenação tetraédrica, pois a coordenação octaédrica sugere reação de ativação alcalina incompleta, que por sua vez é o resultado de uma quantidade insuficiente de álcalis disponíveis para a dissolução dos aluminossilicatos. Além

disso, durante a reação de contato do aluminossilicato com a solução ativadora, surge uma estrutura polimérica de Si-O-Al tetraédrica, para que posteriormente ocorra a nucleação das estruturas tetraédricas, e por fim, na fase final, a precipitação e condensação, caracterizada pelo endurecimento do material final (TEMUJIN; VAN RIESEN; MACKENZIE, 2010; JESUS, 2018).

A temperatura de condensação determina a estrutura do material final. Material amorfo é obtido em temperaturas entre 20 °C e 90 °C, enquanto os materiais semicristalinos são obtidos em temperaturas entre 150 °C e 1200 °C. Porém, cabe destacar que geralmente a reação de ativação alcalina ocorre à temperatura ambiente ou ligeiramente elevada, comumente inferior a 100 °C (DAVIDOVITS, 1991; ZHUANG *et al.*, 2016).

O procedimento exato da reação de ativação alcalina ainda não é amplamente compreendido. Grande parte dos mecanismos propostos consiste em dissolução, transporte e policondensação dos constituintes (ARIOZ *et al.*, 2012). Além disso, o mecanismo de dissolução e formação de gel, além das reais reações dos sistemas álcali-ativados, é complexo e ainda não é totalmente conhecido (CESARI, 2015; LONGHI, 2015; ZHUANG *et al.*, 2016); porém, alguns pesquisadores formularam hipóteses sobre as etapas desse processo.

Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernandez-Jimenez (2015) descreveram o início da formação dos aglomerantes álcali ativados como sendo um ataque alcalino em materiais amorfos ou vítreos de aluminossilicatos, que endurecem gerando um material com boas propriedades ligantes

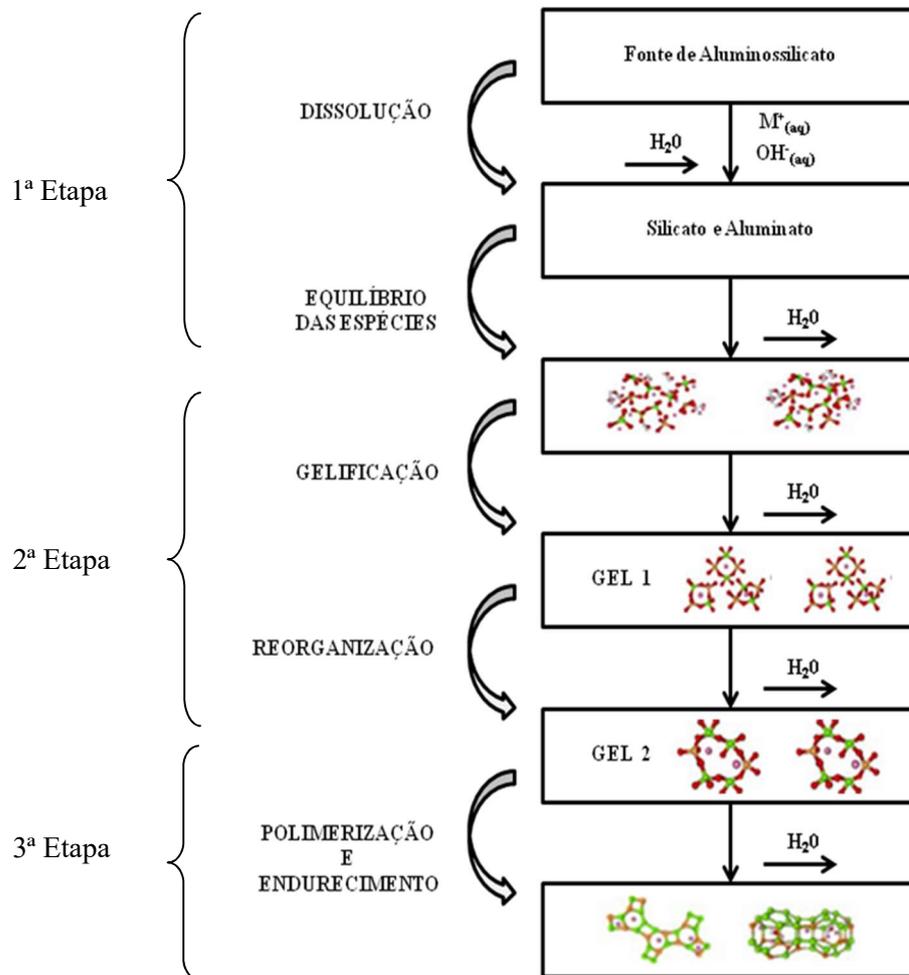
Um dos modelos mais utilizados pela comunidade científica foi indicado por Glukhovsky, em 1959, dividido em três etapas dividido em três etapas: 1 - destruição-coagulação; 2 - coagulação-condensação; 3 - condensação-cristalização (Figura 3.2) (DUXSON; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PROVIS, 2006).

Basicamente, o processo de reação de ativação alcalina envolve uma sequência de processos: a dissolução de uma amostra de aluminossilicato em solução alcalina, a difusão de alumínio e silício dissolvidos, a formação da fase gel e finalmente o enrijecimento da fase gel (AREDES *et al.*, 2015). Embora o sistema seja representado linearmente, todo o mecanismo é amplamente conectado e ocorre concomitantemente (DUXSON *et al.*, 2007).

A reação de ativação alcalina inicia-se pela etapa de dissolução, caracterizada por elevada alcalinidade, que ocorre quando a solução alcalina entra em contato com a fonte de aluminossilicato sólido. Com o decorrer da reação de dissolução, as concentrações de aluminato e silicato aumentam até o ponto em que se inicia a condensação (BORGES, 2014), que resulta

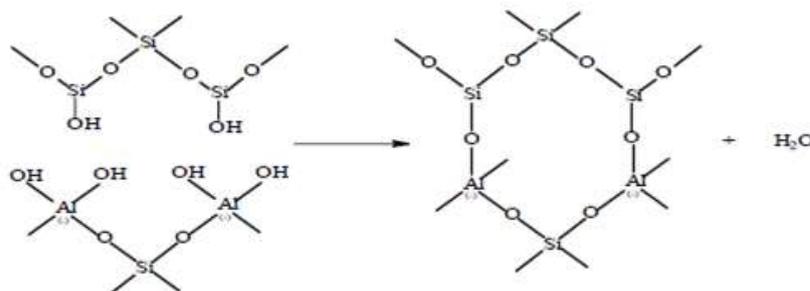
na formação de um gel, caracterizado por grandes redes de policondensação formados por oligômeros (Figura 3.3). Nessa fase, a água consumida durante a dissolução é liberada e o tipo de estrutura do gel é referido como formação bifásica, já que a água não é ligada estruturalmente ao gel aluminossilicato (DUXSON *et al.*, 2007).

Figura 3.2 - Modelo de reação de ativação alcalina proposto por Glukhosvky



Fonte: DUXSON *et al.* (2007)

Figura 3.3 - Fixação de Alumina e Sílica no processo de reação de ativação alcalina



Fonte: VAZ (2011)

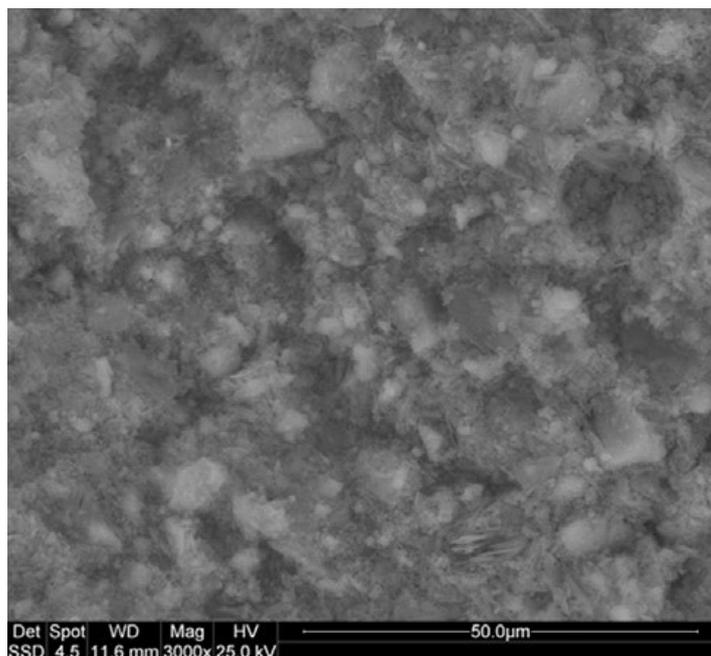
A formação e o endurecimento do produto final resultam da condensação entre espécies aluminatos e silicatos (podendo ser de Na e K) (AREDES *et al.*, 2015; NIMWINYA *et al.*, 2016).

Assim, o aglomerante álcali-ativado é caracterizado fundamentalmente por uma rede de gel de aluminossilicato, incluindo o AlO_4 ligado a SiO_4 partilhando átomos de oxigênio (DAVIDOVITS, 2008), composto pela fase gel solidificada em que as partículas de aluminossilicatos estão ligadas entre si pelo próprio gel que atua como um aglomerante (XU; VAN DEVENTER, 2000).

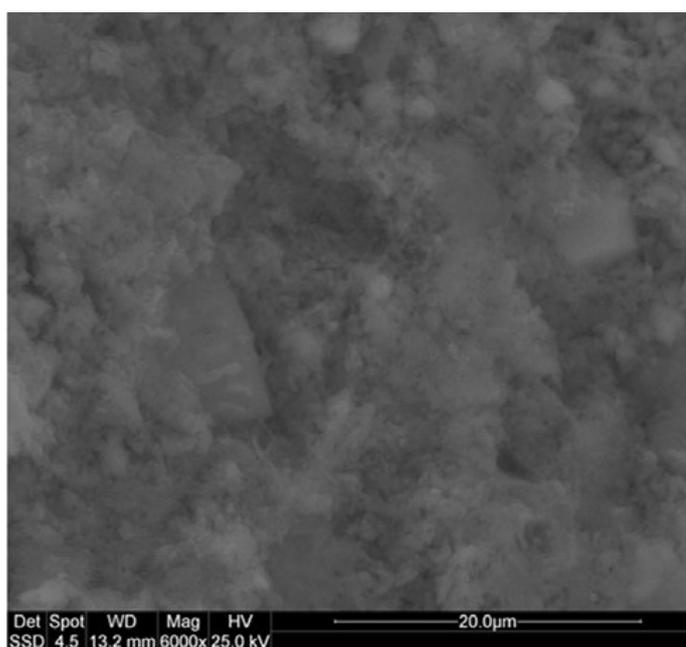
O principal produto da reação de ativação alcalina em aglomerantes com baixo teor de cálcio é o gel de aluminossilicato hidratado, de natureza amorfa ou semi-cristalina, representado por (N, K) - A - S - H (LONGHI, 2015). Para os casos em que o ativador alcalino é o Na^+ , a representação é N - A - S - H, podendo, em alguns casos, a letra H ser omitida pelo fato de a água não ser um componente estrutural no gel. É possível ocorrer a coexistência de C - S - H e N - A - S - H, que se dá na presença de aluminossilicato reativo e fontes de cálcio hidratados em meio alcalino, desde que o pH não seja tão elevado.

Um fator que deve ser considerado no processo de reação de ativação alcalina é a molaridade. Em alguns casos a fonte de aluminossilicato pode não reagir com a solução alcalina. Os resultados de microscopia eletrônica de varredura (Figura 3.4) de compostos álcali-ativados, compostos metacaulim (fonte de aluminossilicato) e cinzas da casca do arroz (fonte de sílica) indicam uma estrutura típica de um aglomerante álcali-ativado cuja matéria-prima é o metacaulim. A microestrutura destas misturas varia de mais grossa e porosa a 8M (concentração do ativador a 8 molar) (Figura 3.4a) a matriz mais fina e mais densa em 12M (concentração do ativador 12 molar) (Fig. 3.4b). Na micrografia de aglomerantes álcali-ativados com solução inicial de NaOH de 8M, pode-se observar uma quantidade significativa de metacaulim que não foi afetada durante a reação de ativação alcalina. Por outro lado, quando as cinzas da casca do arroz são bem dissolvidas em solução de NaOH (caso de 12M), a sílica solúvel formada desempenha papel semelhante ao do silicato de sódio padrão (KAMSEU *et al.*, 2017)

Figura 3.4 – MEV de aglomerante álcali-ativado contendo metacaulim



a) Concentração do ativador a 8 M



b) Concentração do ativador a 12 M

Fonte: KAMSEU *et al.* (2017)

3.2 Matérias Primas

Os aglomerantes álcali-ativados apresentam inúmeras propriedades que os tornam promissores para serem utilizados na construção civil e se propõem para diversas aplicações.

Uma ampla variedade de aglomerantes álcali-ativados tem sido desenvolvida nas últimas décadas. A natureza dos componentes divide os aglomerantes em duas grandes categorias: a) sistema com alto teor de cálcio - $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, compostos geralmente por escória de alto forno ou outro material rico em CaO e SiO_2 ; b) Sistema com baixo teor de cálcio - $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, cuja composição é basicamente de materiais compostos por predominantemente alumínio e silício, como é o caso da cinza volante, metacaulim e cinzas da casca do arroz (GARCIA-LODEIRO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2015).

Dependendo dos procedimentos de processamento e seleção da matéria-prima (fonte de aluminossilicato), os aglomerantes álcali-ativados podem exibir uma ampla variedade de atributos e características (DUXSON *et al.*, 2007) e excelentes propriedades de resistência à compressão, fluência, ataque ácido, baixa retração de cura, e baixa deformação (TEMUJIN; VAN RIESSEN; MACKENZIE, 2010; SEVERO *et al.*, 2013).

Embora algumas características macroscópicas dos produtos preparados a partir de diferentes fontes de aluminossilicatos pareçam similares, sua microestrutura, composição química, propriedades físicas e mecânicas variam bastante. Assim, as condições de processamento e a escolha da matéria-prima determinam o comportamento dos materiais álcali-ativados.

Vários resíduos (subprodutos) dos setores industrial e agrícola, sem utilização em larga escala, têm sido testados e validados como materiais cimentícios complementares para o uso em aglomerantes álcali-ativados.

Shi, Qu, Provis (2019) relatam que a seleção de matérias-primas (também denominadas fontes de aluminossilicatos ou matérias-primas de material precursor) disponíveis para utilização nos processos de ativação alcalina ampliou significativamente nos últimos anos, com ênfase no uso de materiais para os quais não há forte competição na demanda de utilização em misturas com cimento Portland.

Diferentes pesquisas relatam materiais residuais utilizados como fonte de aluminossilicatos na produção de aglomerantes álcali-ativados. Cinzas volantes, o resíduo proveniente da produção de fibra de vidro, as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, a escória granulada de alto forno, as cinzas de casca de arroz, cinzas volantes de incineração de resíduos sólidos urbanos (contendo metais como Pb, Cu, Zn e Cr), os resíduos do corte do granito, o resíduo (lodo) do tratamento de água, palha do trigo, o resíduo do óleo de palma, as cinzas da casca do amendoim, as cinzas da casca de caramujo, a casca de coco, a espiga de milho, o

bambu, serragem, argila bentonita, a casca da mandioca, dentre outros, são algumas das matérias-primas encontradas na literatura, as quais apresentam bons desempenhos mecânicos e geram menos impactos ambientais (ETTU *et al.*, 2013; CASTALDELLI, 2013; YUSUF *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014; PHOO-NGERNKHAM *et al.*, 2015; JAMIL *et al.*, 2016; ONUTAI *et al.*, 2016; Ye *et al.*, 2016; KARA *et al.*, 2018; MALEKI *et al.*, 2019; APOLONIO *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, resultados têm mostrado que os aglomerantes álcali-ativados, sintetizados por meio de diversos de materiais que apresentam baixo custo, tipo cinzas volantes, cinza da casca de arroz, escória de alto forno e metacaulim, possuem elevada capacidade de resistência à compressão e alto desempenho a ambientes ácidos e a altas temperaturas (FAN *et al.*, 2018).

O Quadro 3.1 apresenta alguns estudos realizados com materiais utilizados como matérias-primas na produção de aglomerantes álcali-ativados.

Tais estudos têm se fundamentado na busca de matérias-primas com desempenho aceitável, com base nas matérias-primas específicas que estão, na maioria das vezes, disponíveis localmente. Conclusões a respeito das propriedades físicas, químicas e/ou microestruturais dos aglomerantes álcali-ativados derivados de combinações específicas de matérias-primas e diferentes ativadores alcalinos foram observadas nos estudos.

Quadro 3.1 – Matérias-primas utilizadas em aglomerantes álcali-ativados

Ano	Autor	Matéria Prima	Conclusões
2008	Bigno	Escória Granulada de alto forno, Cinza da Casca do Arroz e Casca do Ovo Calcinação	Material indicado para utilização em obras que requerem materiais de rápido endurecimento e de altas resistências nas idades iniciais.
2012	Salau; Ikponmwosa; Olonade	Cinza da Casca da Mandioca	A cinza da mandioca contribui para a resistência a idades avançadas no concreto
2012	Tashima <i>et al.</i>	Resíduo de craqueamento catalítico	A ativação alcalina do material produziu um aglomerante estável cuja resistência à compressão atingiu 68,34 MPa
2013	Costa <i>et al.</i>	Alumina	A variação do teor de alumina não mostrou influência significativa nos resultados, sendo apenas a granulometria um fator determinante no comportamento mecânico de pastas álcali-ativadas

**Quadro 3.1 – Matérias-primas utilizadas em aglomerantes álcali-ativados
(continua)**

2014	Pereira	Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar e Escória de Alto Forno	As argamassas produzidas com misturas de cinza e escória atingiram valores de resistência à compressão de 15 a 50 MPa
2015	Raheem; Arubike; Awogboro	Cinza da Casca da Mandioca	A resistência à compressão do produto final diminuiu de acordo com o aumento de cinzas.
2016	Nimwinya <i>et al.</i>	Lodo Calcinado e Cinza da Casca do Arroz	A resistência à compressão do aglomerante álcali-ativado com uma relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 4,9 é muito próxima a do cimento Portland.
2016	Shehab; Eisa e Wahba	Cinza Volante	A substituição de 50% de cimento Portland por cinzas volantes promoveu melhor desempenho nas propriedades mecânicas do concreto álcali-ativado
2017	Geraldo; Fernandes e Camarini	Lodo de Estação de Tratamento de Água, Metacaulim e Cinza da Casca do Arroz	A substituição de 15% de metacaulim por lodo permitiu alcançar melhores valores de resistência à compressão
2018	Azevedo, Strecke, Lombardi	Metacaulim e Cerâmica Vermelha	A cerâmica vermelha pode ser utilizada como substituinte parcial do metacaulim, porém sua aplicação na construção civil deve ser tratada com cautela.
2020	Geraldo; Aguiar e Camarini	Metacaulim e Cinza da Casca do Arroz	A argamassa aglomerante álcali-ativada produzida apresentou desempenho térmico similar à argamassa de cimento Portland, indicando a possibilidade de aplicação do material na construção civil
2020	Lan <i>et al.</i>	Cinzas Volantes e Metacaulim	A mistura de cinzas volantes e metacaulim como precursores produz um material adsorvente com excelente desempenho
2020	Shah, Huseien	Cerâmica, Cinzas Volantes e Escória de Alto Forno	Os aglomerantes álcali-ativados produzidos apresentaram excelente desempenho e durabilidade em ambientes agressivos, sendo adequados para várias aplicações na construção civil.

Fonte: Elaborado pelo autor

Na maior parte dos casos, os efeitos das misturas entre as fontes de aluminossilicato e/ou cimento Portland são estudados sempre objetivando produzir um material com menor geração de impactos ambientais. Destacam-se, nesse sentido, as argamassas produzidas com misturas de escória de alto forno e cinzas do bagaço da cana, que atingiram valores de resistência à compressão de 15 a 50 MPa, dependendo da porcentagem de cinzas (BIGNO, 2008). Shehab; Eisa e Wahba (2016), utilizando cinza volante e uma solução ativadora composta por NaOH e Na_2SiO_3 , obtiveram resistência à compressão de 36,2 MPa. Da mesma maneira, Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) produziram um ativador alcalino alternativo ao silicato de sódio convencional composto por NaOH e cinzas da casca do arroz e produziram uma argamassa cuja resistência à compressão foi de 36,8 MPa.

Portanto, ao se definir a fonte de aluminossilicato, deve-se avaliar se o material apresenta estrutura cristalina ou se é amorfo. É interessante que ele (ou material) esteja no estado amorfo para combinar-se quimicamente, já que os aluminossilicatos devem ser submetidos a um tratamento térmico para que ocorra a perda de água e, principalmente, haja a alteração da coordenação do íon alumínio com oxigênio (FREITAS, 2008). Como consequência, o material perde parte de sua estrutura cristalina. As condições ótimas de queima, para produção de cinzas com reatividade pozolânica, devem ser processadas a uma temperatura na faixa de 500 °C a 700 °C. Porém, se o tempo de combustão for inferior a 1 minuto a atividade deve ocorrer em temperaturas entre 700 °C e 800 °C, para que a sílica residual seja mantida como amorfa (MEHTA, 1992).

Para isso, a temperatura de incineração do material exerce papel fundamental na composição da cinza da casca do arroz, por exemplo. Zou e Yang (2019) afirmam que muitos pesquisadores constataram a cristalização da cinza numa temperatura de queima de 900°C. Essa cristalização denota a perda da fase amorfa, fase esta que evidencia o grau de reatividade do material. A cinza da casca de arroz pode integrar o ativador alcalino, substituindo o silicato de sódio por um ativador alternativo, quando da necessidade de apresentar o elemento silício para a formação dos géis iniciais.

O elevado conteúdo de sílica e alumina contido nas cinzas volantes torna possível o seu uso como matéria-prima na produção de um aglomerante álcali-ativado (MEJÍA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MONTES, 2016). Porém, especial atenção deve ser dada para que o teor de carbono seja reduzido, da mesma maneira que ocorre com o lodo de estação de tratamento de água.

A preparação da escória de alto forno, que é feita por diferentes processos, requer precaução nas etapas de esfriamento e peletização e/ou granulação, influenciando dessa forma, os teores de sílica e alumina disponíveis.

Em relação às fontes de aluminossilicatos oriundas das atividades agrícolas, cabe destacar que, teoricamente, todo material aluminossilicato pode ser ativado alcalinamente. Entretanto, requisitos como alta solubilidade em meios básicos e alta disponibilidade de SiO_2 e Al_2O_3 são necessários (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

A Tabela 3.1 indica, a partir dos ensaios de Florescência de Raios-X (FRX) de alguns estudos, a quantidade de sílica e alumina presentes em alguns tipos de matérias-primas.

Tabela 3.1 - Teores de Sílica e Alumina presentes em alguns tipos de materiais

Matéria Prima	Teor (%) de SiO_2	Teor (%) de Al_2O_3	Referência
Metacaulim	50,6	41,0	Bigno (2008)
Cinzas da Casca do Arroz	85,8	0,7	
Escória de Alto Forno	34,2	12,0	
Cinzas Volantes	48,8	27,0	Nematollahi e Sanjayan (2014)
Bagaço da Cana	61,0	9,2	Calligaris <i>et al.</i> (2015)
Metacaulim	58,6	34,1	Geraldo (2016)
Lodo de ETA	34,9	34,1	
Cinzas da Casca do Arroz	96,2	0,1	
Cinzas de Fundo	57,3	23,7	Boca Santa; Soares e Riella (2016)
Metacaulim	47,4	37,9	
Sepiolita	36,2	0,8	Pu <i>et al.</i> (2016)
Metacaulim	53,3	42,1	
Cinzas Volantes	29,5	51,7	
Granito decomposto	40,4	30,4	Dassekpo; Zha e Zhan (2017)
Cinzas Volantes	60,7	24,7	
Cinza da Casca de Arroz	88	-	Apolonio <i>et al.</i> (2020)
Metacaulim	53,06	36,50	
Cinzas Volantes	50,32	33,61	Lan <i>et al.</i> (2020)
Metacaulim	51,36	41,28	

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir desses dados, observa-se que não existe uma padronização nos teores de sílica e alumina nas fontes de aluminossilicatos devido às diferentes condições de síntese e de preparação dos materiais. Dessa forma, evidencia-se a possibilidade de produção de

aglomerantes álcali-ativados com mais de uma fonte de aluminossilicato, de forma que a adição ou a substituição parcial de um material por outro possa promover a alteração ou até mesmo a constância das relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. A adição de até 10% de sepiolita, material rico em SiO_2 , em uma pasta álcali-ativada promoveu aumento da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e por consequência promoveu ganhos de resistência mecânica na ordem de 70 MPa aos 90 dias de idade (PU *et al.*, 2016).

Diferente das outras pozolanas artificiais, a exemplo da sílica ativa e a cinza volante, o metacaulim pode ser produzido mediante controle de qualidade rigoroso, com o intuito de atingir menores variações em sua composição, maior pureza e maior grau de pozolanicidade (MUDULI; MUKHARJEE, 2019). Os mesmos autores informam que o metacaulim, quando adicionado ao concreto, reage com o hidróxido de cálcio (portlandita) gerado do processo de hidratação do cimento, modificando a microestrutura desse concreto por meio da formação extra dos géis cimentantes C-S-H.

Billong *et al.* (2018) levantaram os benefícios em utilizar pastas álcali-ativadas cujo precursor seja uma combinação do metacaulim e da cinza da casca de arroz. Foi observado pelos autores uma melhora na trabalhabilidade das pastas, substituindo parcialmente o metacaulim pela sílica da casca do arroz (SCA). Substituições de 12,5 e 25% demonstraram incremento na resistência das pastas.

A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ do metacaulim na reação de ativação alcalina varia de 3,30 a 4,50 (DAVIDOVITS, 1994). As relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,13 a 4,73 e 3,3 propostas por Bigno (2008) e Boca Santa; Soares e Riella (2016), respectivamente, estão dentro do intervalo sugerido por Davidovits quando um dos ativadores é o metacaulim, favorecendo, portanto, a eficiência do processo de reação de ativação alcalina devido ao arranjo dos elementos, tornando, o material em questão, uma matéria-prima fundamental em várias misturas por fornecer alumínio adicional para a reação.

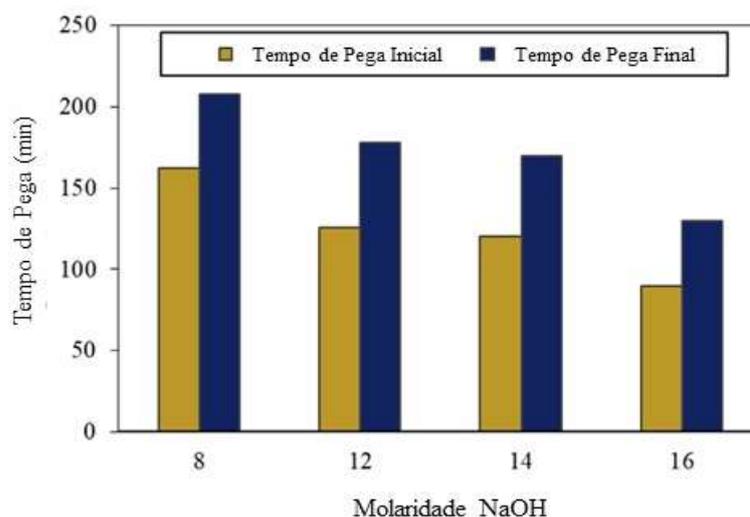
3.3 - Ativadores Alcalinos

Teoricamente, qualquer íon metálico pode ser o elemento alcalino. Comumente, o ativador mais utilizado nos processos de ativação alcalina é o hidróxido de sódio (NaOH) adicionado a silicatos de sódio ($\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$). Em alguns casos, tem-se o uso do hidróxido de potássio (KOH) em vez do NaOH (XU; VAN DEVENTER, 2000; PEREIRA, 2019).

O NaOH é o hidróxido mais comumente utilizado no processo de ativação por ter sua síntese mais simplificada e, portanto, ser menos oneroso. Além de ampla disponibilidade e baixa viscosidade, possui uma maior aptidão para dissolver a estrutura da matéria-prima e produzir amostras reativas de silicatos e aluminatos (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; LONGHI, 2015; GERALDO *et al.*, 2018).

Um dos fatores mais relevantes em relação aos ativadores alcalinos é a dosagem. Uma quantidade excessiva de álcalis pode provocar eflorescência, aumento da porosidade e menor resistência mecânica (TEMUJIN; VAN RIESEN; MACKENZIE, 2010). Além disso, o tempo de pega é influenciado pela concentração de NaOH, pois Antoni, Satria e Hardjito (2017) e Zhang *et al.* (2018) identificaram que a diminuição da molaridade do NaOH pode promover um aumento no tempo de pega. Resultados similares foram encontrados por Phoo-ngernkham *et al.* (2015), demonstrando que o tempo de pega pode diminuir quando a molaridade aumenta. Corrobora com tal informação o trabalho de Umniati *et al.* (2017), cujos resultados estão representados na Figura 3.5, mostrando que o tempo de pega pode diminuir quando a molaridade de NaOH aumenta.

Figura 3.5 - Efeitos da Molaridade do NaOH em relação ao tempo de pega



Fonte: Modificada de Umniati *et al.* (2017)

De acordo com Zhang *et al.* (2018), aparentemente quanto maior a concentração de álcali, maior é a reação de ativação alcalina e, como resultado, os tempos de pega são reduzidos. Os mesmos autores relatam que com o aumento da concentração do álcali, as resistências à compressão aumentam. No trabalho, os autores identificaram que a resistência à compressão

mudou pela combinação de diferentes arranjos de Na_2SiO_3 e NaOH . A utilização de $\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ na ativação alcalina do metacaulim aumenta a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão (PINTO, 2004).

Para o caso específico de ativação alcalina cujas fontes de aluminossilicatos são escórias de alto forno, Rodrigues (2014) concluiu que a escória pode reduzir o consumo de solução ativadora, em particular o silicato de sódio, pois este material é menos fino que o metacaulim e, portanto, requer uma menor quantidade para garantir a mesma trabalhabilidade.

Pastas álcali-ativadas contendo ativador à base de NaOH apresentaram maior resistência à compressão à temperatura ambiente do que as pastas compostas por KOH (HOSAN; HAQUE; SHAIKH, 2016). Esses resultados podem ser atribuídos ao menor coeficiente de difusão do íon K^+ , que corresponde às variações na velocidade de deslocamento na solução, indicando a facilidade com que o soluto se move em um determinado solvente (OLIVEIRA *et al.*, 2004). Alguns estudos realizados com aglomerantes álcali-ativados verificaram que a solução alcalina não interfere na resistência mecânica, mas sim na concentração utilizada. A solução de NaOH é melhor do que a solução de KOH devido o tamanho do átomo de sódio ser menor que o átomo de potássio e, também, por ocorrer maior de liberação de íons de Si e Al , promovendo melhorias nas propriedades mecânicas (PEREIRA, 2019).

Altan e Erdogan (2012) identificaram que o KOH e o NaOH são ativadores necessários para a cura em temperatura ambiente para se obter ganhos de resistência mecânica. Entretanto, quando a cura ocorre a $80\text{ }^\circ\text{C}$, o NaOH não aumenta a resistência mecânica da argamassa. Sendo assim, os autores concluíram que o KOH se mostra mais eficaz do que o NaOH a $80\text{ }^\circ\text{C}$; porém, melhores resultados são observados em temperatura ambiente quando o ativador é o NaOH .

Diferentes ativadores têm sido utilizados na síntese de aglomerantes álcali-ativados, cujas propriedades químicas e físicas de cada um desempenharam um papel na determinação das propriedades do produto final. A concentração do álcali utilizado na solução ativadora deve ser controlada no sentido de se evitar uma superdosagem, que por consequência pode promover o surgimento de eflorescência, uma vez que os cristais de carbonato de sódio e bicarbonato de sódio, resultantes da reação com o CO_2 atmosférico, são mais recorrentes em aglomerantes álcali-ativados curados em temperatura ambiente (PROVIS, 2009). Cabe ressaltar que a eflorescência indica que a reação de ativação alcalina no interior do corpo de prova não é

completa, prejudicando a reação, podendo estar relacionada com a dosagem excessiva do ativador alcalino na mistura.

3.4 Propriedades dos Materiais Álcali-ativados

Os aglomerantes álcali-ativados exibem diversas propriedades que os tornam excelentes para aplicações tanto em argamassas quanto em concretos. O desempenho de argamassas álcali-ativadas varia de acordo com suas características no estado fresco e no seu estado endurecido. No estado fresco, a argamassa deve apresentar aceitável trabalhabilidade (consistência) e adequado tempo de pega. Por outro lado, no estado endurecido, as características mínimas necessárias são resistência mecânica (resistência à tração na flexão e resistência à compressão), permeabilidade ao ar, aderência ao substrato e absorção de água.

As argamassas álcali-ativadas apresentam propriedades quase que similares em relação ao cimento convencional, sendo elas: resistência, dureza e estabilidade química (KAUR; SINGH; KAUR, 2018; GERALDO; AGUIAR; CAMARINI, 2020). São dotadas de resistência à incêndio e ataques de meios ácidos (KAUR; SINGH; KAUR, 2018; GUADES, 2016).

A síntese dos aglomerantes álcali-ativados demanda controle dos parâmetros físico-químicos, entendidos como relação Si/Al, condições de cura (tempo e temperatura) e composição (natureza e concentração) da solução alcalina, pois influenciam as propriedades químicas e mecânicas dos produtos obtidos (SEVERO *et al.*, 2013; BORGES, 2014). Além disso, estes parâmetros determinam o resultado de resistência mecânica nos aglomerantes álcali-ativados, dependendo necessariamente das características da matéria-prima.

3.4.1 Influência da Relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

As características dos aglomerantes álcali-ativados podem ser drasticamente afetadas por alterações nos teores de Si e Al disponíveis para a reação, pois o aumento das proporções molares é, em grande parte, responsável pelos ganhos de propriedades mecânicas (SEVERO *et al.*, 2013). Davidovits (2016) e Zhang *et al.* (2014) recomendam uma relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, entre 3 e 4.

O trabalho de Nimwinya *et al.* (2016), mostrou um aumento na relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 2,5 para 3,8 em aglomerantes álcali-ativados curados a 40 °C por 24 h aumentou a resistência

à compressão em cerca de dez vezes. Todavia o aumento da razão molar entre SiO_2 e Al_2O_3 dos aglomerantes álcali-ativados promoveu um retardamento no tempo de endurecimento, o que permitiu inferir que o tempo de pega dos geopolímeros de Lodo de Estação de Tratamento de Água calcinado é diretamente influenciado pelo teor de alumina. Por outro lado, Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) afirmam que baixa relação molar entre SiO_2 e Al_2O_3 do Lodo de Estação de Tratamento de Água, em decorrência da maior quantidade de alumina, resulta em tempo de pega menores.

Mehta e Siddique (2017) estudaram a trabalhabilidade de uma pasta álcali-ativada com diferentes relações mássicas de SiO_2 e Al_2O_3 e diferentes molaridades de NaOH. Os autores identificaram que a concentração de hidróxido de sódio (NaOH) afeta significativamente a trabalhabilidade do material, independente da variação de SiO_2 e Al_2O_3 devido a um incremento de sólidos na solução do ativador alcalino quando a concentração de NaOH aumenta. Já o trabalho de Silva, Sagoe-Cresntil e Sirivivatnanon (2007) mostrou que a diminuição na relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,7 para 2,5 resultou em perda de resistência à compressão de, aproximadamente, cinco vezes, e quando a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ elevou-se de 1,75 para 2,25 a resistência a compressão diminuiu (HAJIMOHAMMADI *et al.*, 2017).

A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é também importante para determinar a resistência ao fogo dos aglomerantes álcali-ativados. Relações inferiores a 1,4 propiciaram a obtenção de pastas com grandes poros interconectados, ao passo que amostras com relações acima de 1,6 indicaram um material com poros menores (DUXSON *et al.*, 2005).

A proporção de sílica em relação à alumina determina a estrutura final do material álcali-ativado (HE *et al.*, 2012), pois a caracterização e a finalidade de uso se dão a partir da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Quadro 3.2) (DAVIDOVITS, 1999).

Quadro 3.2. Aplicação dos Aglomerantes Álcali-Ativados

Relação Si:Al	Aplicação
1:1	Materiais Cerâmicos, Blocos e Proteção ao Fogo
2:1	Cimentos com baixas quantidades de CO_2 e Inertização de Resíduos.
3:1	Alta Resistência ao Calor

Fonte: DAVIDOVITS (1999)

De uma maneira geral, a obtenção das relações molares dependerá das características do precursor, do ativador alcalino, dos aditivos utilizados, e a partir de cálculos estequiométricos é possível saber qual a relação molar está sendo obtida. (PEREIRA, 2019)

3.4.2 - Resistência Mecânica

A literatura científica reporta que a maioria dos trabalhos se utiliza de ensaios de resistência mecânica como indicador de desempenho das argamassas. O desenvolvimento de um entendimento detalhado da microestrutura e das propriedades mecânicas dos aglomerantes álcali-ativados é a principal chave para a aplicação destes materiais na construção civil (SHI; QU; PROVIS, 2019).

A resistência mecânica depende, dentre outros aspectos, do tempo e da temperatura de cura (Tabela 3.2), da reatividade do material, sendo diretamente proporcional à presença da fase amorfa. Além disso, o aumento da superfície específica da matéria-prima leva a um aumento da resistência mecânica e a um menor tempo de pega devido à maior quantidade de alumina disponível para reagir com a solução alcalina (RODRIGUES, 2014).

Tabela 3.2 - Valores de resistência à compressão a partir de diferentes matérias-primas

Matéria Prima	Temperatura de cura (°C)	Resistência à compressão (MPa)
Cinzas volantes	25	22,9
	60	67,0
Metacaulim	60	17,9
	90	13,1
Cinzas vulcânicas	40	23,0
	90	49,0

Fonte: SEVERO *et al.* (2013).

O desenvolvimento da resistência à compressão de um aglomerante álcali-ativado é significativamente afetado pela distribuição do tamanho das partículas, material de origem e o regime de cura adotado (ASSI *et al.*, 2018).

À medida que a temperatura de reação de ativação alcalina aumenta o desenvolvimento da resistência mecânica também aumenta; porém, existe um valor limitante para o desenvolvimento de resistência mecânica, para além do qual a taxa de ganho de resistência é lenta (DUXSON *et al.*, 2007). O valor limitante está relacionado à dosagem das matérias-primas e do ativador alcalino.

Um material composto por escória de alto forno e cinzas volantes com diferentes proporções (100/0, 70/30, 50/50, 30/70, 0/100), curado a 25 °C e 65 °C, apresentou uma variação de resistência à compressão, atingindo o valor máximo de 50 MPa (PUERTAS *et al.*, 2000).

A resistência à compressão de um aglomerante álcali-ativado, cuja matéria-prima foi o metacaulim, aumentou em torno de quatro vezes à medida que foi aumentada a dose de alumina na mistura (de 1,1 para 1,9). Porém, maiores teores de sílica produziram efeitos prejudiciais nas propriedades mecânicas do produto final (DUXSON *et al.*, 2005).

Sun *et al.* (2013) obtiveram valores de resistência à compressão de até 71,1 MPa em amostras curadas por 28 dias após tratamento térmico de 1000 °C, utilizando resíduos cerâmicos ativados com hidróxidos alcalinos e silicato de sódio.

Argamassas álcali-ativadas produzidas com porcelana grês, ativadas com NaOH e silicato de sódio, após cura a 65 °C, atingiram até 36 MPa aos 7 dias de idade devido a presença de silicato de sódio na mistura mantendo constante a concentração de SiO₂ (REIG *et al.*, 2014).

A produção de um material álcali-ativado com a substituição de 0% a 60% de cinzas volantes por escória de alto forno e uma variação de 0,5, 1,0 e 1,5% de silicato de sódio como solução ativadora alcançou uma resistência à compressão de 93,06 MPa aos 28 dias, indicando que essa propriedade aumenta com a idade e com a concentração da solução alcalina. Além disso, ficou evidenciado que quanto mais elevado for a substituição de cinzas volantes por escória de alto forno, menor será a resistência à compressão nas primeiras idades (WANG; WANG; LO, 2015).

Perná, Hanzlicek e Supova (2014) relataram que a resistência máxima à compressão de aglomerante álcali-ativado, usando metacaulim, pode ser alcançada aumentando a concentração de NaOH e o tempo de cura. Além disso a resistência à compressão do material aumenta com o aumento da razão aglomerante/agregado (areia) de 0,25 para 0,5. Por outro lado, a resistência a compressão diminui se a razão aglomerante/agregado (areia) é maior que 0,5 (WAZIEN *et al.*, 2016).

As propriedades de um concreto álcali-ativado foram analisadas por Wongsa *et al.* (2016), utilizando solução ativadora de silicato de sódio e NaOH. Nesse estudo, o concreto composto por cinza volante como fonte de aluminossilicato e cinzas de fundo (bottom ash) como agregado, atingiu resistência à compressão de 18,1 MPa aos 7 dias de idade (WONGSA *et al.*, 2016)

O trabalho de Azevedo, Strecker e Lombardi (2018) indicou que a resistência a compressão atingiu 20 MPa após 7 dias de cura em um aglomerante álcali-ativado a base de metacaulim. Os autores atribuem esse resultado à maior disponibilidade de aluminossilicato amorfo (presente no metacaulim) capaz de se solubilizar e então formar as cadeias responsáveis pelo ganho de resistência mecânica.

Uma argamassa álcali-ativada feita preparada com metacaulim e cinza da casca de arroz apresentou excelente desempenho em termos de resistência mecânica, atingindo, aos 28 dias, 40 MPa de resistência a compressão, melhor aderência que um material convencional e grande eficiência na utilização como material de reparo (TEIXEIRA *et al.*, 2019)

De acordo com o exposto, observa-se que a resistência mecânica é um parâmetro fundamental para indicar a viabilidade de uso de determinadas matérias-primas e ativadores alcalinos, variando de caso a caso em função dos diversos materiais que compõem a mistura.

3.4.3 - Consistência (Trabalhabilidade)

A consistência tem sido outro parâmetro importante na avaliação do desempenho dos materiais álcali-ativados. Para Hassan, Ari e Shariq (2019) a trabalhabilidade, juntamente com a resistência a compressão dos materiais-álcali ativados são influenciadas pelas proporções e características dos materiais utilizados na sua produção. Ramujee e Potharaju (2017) informaram que a trabalhabilidade pode ser significativamente afetada por fatores como razão solução alcalina/ativador e a finura do precursor. Já Lokuge *et al.* (2018) e Mehta e Siddique (2017) identificaram que o aumento na molaridade de NaOH resultou em um menor valor de *slump*.

Em aglomerantes álcali-ativados, merece destaque a proporção de água presente na composição da solução alcalina para garantir a dissolução completa do aluminossilicato, pois a água não desempenha qualquer papel na reação química, fornecendo apenas a trabalhabilidade durante o manuseio (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009), servindo como meio para as reações de dissolução, sendo eliminada da mistura durante a reação de ativação alcalina (LIVI; REPETTE, 2015).

A quantidade de água afeta as propriedades dos materiais álcali-ativados tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido (KOMLJENOVIC; BAŠČAREVIC; BRADIC, 2010). Elevadas demandas de água podem conduzir a uma porosidade excessiva nos aglomerantes álcali-ativados (DUXSON, 2009; PROVIS *et al.*, 2014). À medida que a relação Água/Materiais secos aumenta a resistência à compressão diminui devido ao aumento da porosidade do material, originária da evaporação de água durante a cura (NURUDDIN; DEMIE; SHAFIQ, 2011).

De acordo com Provis (2018), a trabalhabilidade dos materiais álcali-ativados pode ser mais desafiadora do que a de um concreto de cimento Portland moderno devido, em parte, à atual indisponibilidade de agentes de controle de reologia altamente eficazes.

Matérias-primas que são materiais fontes de aluminossilicatos e que apresentam maiores tamanhos de partículas adsorvem água na sua superfície dificultando a trabalhabilidade da mistura. O uso de lodo de estação de tratamento de água (ETA) resultou em diminuição da consistência, necessitando da utilização de um aditivo plastificante em casos que maior fluidez seja exigida (GERALDO, 2016). O mesmo comportamento foi observado por Rodrigues (2014) ao avaliar a consistência de argamassas álcali-ativadas compostas por cal e metacaulim.

Além da razão Água/Materiais secos, a trabalhabilidade depende da absorção de água pelos agregados. Em alguns casos, é necessário melhorar a fluidez da mistura alterando o volume de água ou então com o uso de agentes plastificantes.

O uso de plastificantes tradicionalmente usados na produção de concretos de cimento Portland, em regra geral não produz qualquer influência nos aglomerantes álcali-ativados, pois o meio altamente alcalino destrói a estrutura química dos plastificantes (VAZ, 2011). Especial atenção merece o superplastificante de naftaleno, que é quimicamente estável em solução de NaOH 8M, que aumentou em 136% a trabalhabilidade de argamassa composta por cinzas volantes sem que ocorresse nenhuma alteração negativa na resistência à compressão da pasta álcali-ativada por cinzas volantes (NEMATOLLAHI; SANJAYAN, 2014).

3.4.4 Cura

Outro parâmetro que influencia diretamente na qualidade do produto ativado alcalinamente refere-se às condições de cura. Um adequado processo de cura é necessário para que os aglomerantes álcali-ativados atinjam boas propriedades mecânicas e durabilidade (AREDES *et al.*, 2015).

Parâmetros como umidade, tempo e temperatura ambientes devem ser monitorados e bem definidos. Diversas pesquisas têm estudado esses parâmetros, enfatizando que uma cura adequada durante a síntese dos aglomerantes álcali-ativados depende tanto da matéria-prima quanto da temperatura e do tempo de cura transcorrido (HARDJITO; WALLAH; RANGAN *et al.*, 2004; CALLIGARIS *et al.*, 2015; NIMWINYA *et al.*, 2016; LEE; VAN RIESSEN; CHON, 2016).

O tempo de exposição precisa ser monitorado de modo que a umidade deva ser controlada no início do processo para inibir o aparecimento de fissuras (SEVERO *et al.*, 2013).

Em muitos casos, o aspecto mais importante do regime de cura é a cura selada, que é a mais desejável, uma vez que a desidratação resulta em eflorescência e uma diminuição subsequente na resistência à compressão (KOVALCHUK; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2007; LEE; VAN RIESSEN; CHON, 2016); a cura imersa em água pode lixiviar o ativador e restringir o desenvolvimento de resistência, e a cura sob condições secas pode, em alguns casos, causar rachaduras na superfície (PROVIS, 2018).

Uma importante diferença entre os aglomerantes álcali-ativados e o cimento Portland, no que tange o processo de cura, é que o primeiro não perde água durante a cura da mesma maneira que o cimento Portland durante sua hidratação, pois não há uma força química forte para promover a retirada de água do fluido por meio do poro nas fases sólidas (MA; YE, 2015; SHI; QU; PROVIS, 2020). De acordo com Luukkonen *et al.*, (2018), embora as temperaturas de cura usadas para a produção de aglomerantes álcali-ativados, as emissões de CO₂ produzidas não são desprezíveis. Turner e Collins (2013) calcularam as emissões de CO₂ para a produção de um concreto álcali-ativado, com condições de cura de 24 horas a 50 °C e descobriram que esse fator contribuiu com 12% do total de CO₂.

Quando curados à temperatura ambiente, concretos e argamassas álcali-ativados apresentam fissuras devido à evaporação da água presente no material, ocorrendo o fenômeno da eflorescência pelo arraste de sais de sódio juntamente com a água (PINTO, 2004). A cura por calor do aglomerante álcali-ativado melhora o processo de ativação alcalina e, subsequentemente, as propriedades mecânicas do material. Embora a cura por calor possa acelerar o ganho de resistência em aglomerante álcali-ativado a base de escória de alto forno, em idade precoce, ela leva a uma resistência mais baixa em uma idade posterior do que as amostras curadas em temperatura ambiente, pois ocorre uma rápida taxa de reação (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019).

A cura por 1 hora sob elevadas temperaturas nos materiais álcali-ativados à base de metacaulim apresenta efeitos positivos na resistência à compressão, que aumenta de acordo com o aumento do período de cura (AREDES *et al.*, 2005).

O efeito do aquecimento convencional na resistência à compressão do concreto álcali-ativado à base de cinzas volantes na presença de caulim aos 7 dias indica que a resistência aumentou até 100 °C e diminuiu a 120 °C. Essa ocorrência se dá em temperaturas mais altas,

pois a perda de resistência à compressão pode ser devido à perda excessiva de umidade e formação de fissuras (OKOYE; DURGAPRASAD; SINGH, 2015).

Onutai *et al.* (2016) desenvolveram um trabalho com condições de cura em um forno de microondas. O resultado demonstrou que o desenvolvimento da resistência à compressão é muito mais rápido em um período de tempo mais curto, pois o volume do aglomerante álcali-ativado pode aumentar durante o aquecimento por microondas, levando à evaporação da água em temperaturas superiores a 100 °C.

Sturm *et al.*, 2016 verificaram que após apenas um dia de cura, a resistência à compressão era relativamente alta (30 MPa) e que a cinza da casca de arroz havia reagido quase completamente.

Elevada resistência (40 MPa) foi obtida com cura de argamassas álcali-ativadas em temperatura ambiente (temperatura média de 25 °C e umidade relativa de 60%) sem o uso de silicato de sódio comercial (GERALDO; FERNANDES; CAMARINI, 2017).

As condições de cura devem ser ajustadas de acordo com o sistema a ser analisado com o intuito de melhorar as características físicas, mecânicas e da durabilidade do material, ou seja, a estrutura deverá variar conforme os materiais utilizados como fonte de aluminossilicato, características da solução alcalina e utilizações previstas para o produto final. Os requisitos técnicos e ambientais na definição do processo de cura devem ser considerados, pois o consumo de energia demandado pela cura térmica pode influenciar nos custos de produção do produto final.

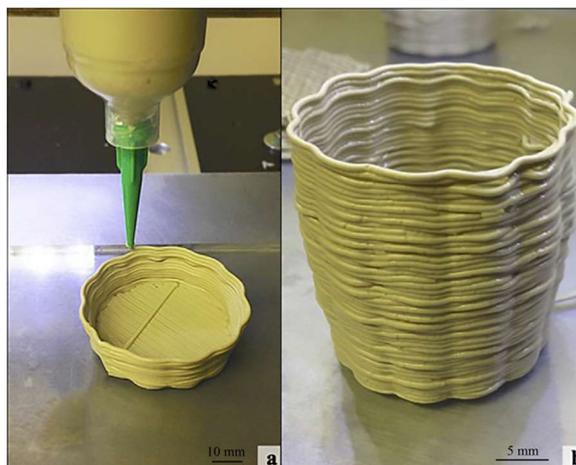
3.6 Aplicações dos Materiais Álcali-ativados

Apesar da ainda embrionária utilização prática de aglomerantes álcali-ativados na construção civil, o fato desses materiais demandarem menos energia e emitirem menos CO₂ em sua produção, quando comparados ao cimento Portland, atrelado ao crescente interesse acadêmico e comercial, faz com que seja aberta uma variedade de oportunidades de aplicações (PROVIS, 2014).

O escopo de aplicação de aglomerantes álcali-ativados é amplo e continua a crescer, com utilização comprovada em concretos, componentes de concreto pré-moldado, argamassas e rejuntas, matrizes para a imobilização de resíduos tóxicos e nucleares, orgânicos e inorgânicos (PROVIS, 2018). Estes materiais também podem ser utilizados em materiais refratários, aplicações balísticas e estabilização de solos (PEREIRA, 2019). Argamassas de reparo

(KRAMAR; ŠAJNA; DUCMAN, 2016; TEIXEIRA *et al.*, 2019, HE *et al.*, 2020) e materiais para a construção 3D, mostrados na Figura 3.6, também são preparadas com os aglomerantes álcali-ativados (FRANCHIN *et al.*, 2017).

Figura 3.6 - Vaso de aglomerante álcali-ativado a base de metacaulim



Fonte: FRANCHIN *et al.* (2017)

De acordo com o livro "The Pyramids: An Enigma Solved" - as pirâmides do Egito foram erguidas há 4.500 anos com blocos moldados de concreto álcali-ativado e não com pedra calcária. A mistura álcali ativada foi obtida por meio de pedregulhos de calcário caulínico oriundos de Gizé com NaOH, produzido a partir da mistura de cal - CaOH_2 , barrilha - Na_2CO_3 e água.

O primeiro edifício construído com a técnica de ativação alcalina, utilizando painéis pré-moldados de concreto álcali-ativado à base de escória de alto forno e cinzas volantes, está localizado na Austrália e abriga o *Global Change Institute* da Universidade de Queensland, (Figura 3.7) (DAVIDOVITS, 2016).

Também na Austrália, a agência estadual VicRoads, tem executado a construção de projetos de infraestrutura rodoviária com aglomerantes álcali-ativados, sendo uma das prioridades da agência, maximizar o nível de produtos reciclados usados durante a manutenção e construção de estradas. Na Alemanha, um grupo de pesquisadores da Universidade Técnica de Darmstadt, criaram condutores pré-moldados para sistemas de esgotos, a partir de aglomerantes álcali-ativados, por possuírem uma melhor resistência a ataques químicos do que os produtos convencionais (TU DARMSTADT, 2020).

Diversos países têm aplicado e buscado padronizar a tecnologia dos aglomerantes álcali-ativados, como: África do Sul, Rússia, Ucrânia, EUA, Holanda e Reino Unido (PROVIS, 2018).

O concreto álcali-ativado também está sendo utilizado na confecção de abóbadas de túneis, pois o material possui duas propriedades importantes: resistência ao fogo e resistência à corrosão química. Além das utilidades citadas anteriormente, merece destaque o uso em design urbano e a construção do aeroporto regional de Brisbane, também na Austrália. Nessa obra, utilizou-se concreto álcali-ativado em todas as edificações, inclusive na pista de pouso e decolagem (DAVIDOVITS, 2016).

Figura 3.7- Instituto de Mudança Global (GCI), da Universidade de Queensland



Fonte: GRANDES CONSTRUÇÕES (2016)

Dentre as aplicações que mais se destacam para o uso dos aglomerantes álcali-ativados situam-se os setores nuclear, de construção civil, aeronáutico e de transportes, pois esses materiais, considerados de alta tecnologia, garantem proteção ao fogo de instalações prediais, promovem o controle de resíduos tóxicos e radioativos, dentre outras características (DAVIDOVITS, 1991). Esses ligantes têm utilidade em cimentos para ambientes agressivos e reparações estruturais, retenção de resíduos tóxicos e radioativos, estabilização de solos contaminados, moldes para vários tipos de indústrias, artes e decoração (FREITAS, 2008).

Os aglomerantes álcali-ativados também são adequados para trabalhos de reparação devido à sua alta resistência mecânica em um curto período de cura. Por isso, em alguns casos, o tempo de pega é mais importante que a resistência mecânica, como por exemplo nas

aplicações em defesa marinha, em que a estrutura é necessária para resistir às ondas do mar imediatamente após a realização do reparo (RATTANASAK; PANKHET; CHINDAPRASIRT, 2011).

O desempenho ambiental dos aglomerantes álcali-ativados permite o reaproveitamento de quantidades significativas de subprodutos industriais e da mineração, além de possuírem elevado potencial para imobilizar resíduos tóxicos e radioativos (TORGAL; JALALI, 2010). Embora o fornecimento dos materiais precursores também possa ser um desafio em algumas regiões, os volumes a serem transportados podem ser reduzidos por um fator de cerca de 10 vezes em comparação com a importação de cimento, que foi identificada como oferecendo vantagens quando uma matéria-prima de aluminossilicato (por exemplo, cinza volante de carvão ou outros subprodutos industriais ou um solo vulcânico local ou à base de argila) podem ser adquiridos localmente (PROVIS, 2018).

Por outro lado, alguns resultados ainda são insatisfatórios para ser pensada a aplicação prática do material. Por exemplo, a utilização de cinzas volantes para a produção de aglomerantes álcali-ativados para a adsorção de metais tóxicos e imobilização de CO₂ necessita de uma investigação mais aprofundada no sentido de aprimorar o desempenho do sistema como um todo (ZHUANG *et al.*, 2016).

No entanto, vislumbra-se como aplicação principal para aglomerantes álcali-ativados o setor da construção civil, pois é possível produzir um material com alto desempenho tecnológico e ambiental.

3.7 - Lacunas existentes nas propriedades dos Materiais Álcali-ativados

Apesar dos progressos obtidos durante a última década, ainda são necessários entendimentos mais aprofundados sobre o processo de produção dos aglomerantes álcali-ativados. Os processos químicos e físicos envolvidos na síntese e durabilidade destes materiais fornecem questões complexas que exigem respostas multifacetadas (PROVIS, 2014). Esforços de padronização relacionados a materiais álcali-ativados estão sendo desenvolvidos em tempo relativamente rápido (em comparação com o ritmo geral de desenvolvimento de padrões na indústria de materiais de construção) em várias localidades do mundo (PROVIS, 2018). No entanto, não somente o processo de padronização levanta desafios, mas também a especificação, já que é quase impossível escrever um padrão baseado em receita prescritiva que cubra um conjunto tão amplo de materiais potenciais (SHI; QU; PROVIS, 2019).

Mais informações e ensaios ainda são necessários para demonstrar a adequação e durabilidade a longo prazo desses materiais. Além disso, falta um conhecimento fundamental sobre a cinética da reação (LUUKKONEN *et al.*, 2018).

O mercado relacionado aos aglomerantes álcali-ativados é encorajador e ainda levará tempo para que o material seja uma mercadoria disponível em uma base global, pois suas aplicações comerciais ainda não são dadas até o presente momento (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; SINGH; MIDDENDORF, 2020). Tem-se ainda uma grande necessidade de promover maiores avaliações da pegada ambiental da produção desse tipo de aglomerante por meio dos sistemas de Análise do Ciclo de Vida (SHI; QU; PROVIS, 2019).

Nesse sentido, destaca-se que ainda não são claras e precisas, na comunidade científica, as questões relacionadas ao processo químico de ativação alcalina, exigindo um conhecimento do mecanismo de reação ocorrida em cada etapa do processo.

Evidencia-se também a necessidade de pesquisar o emprego de aditivos plastificantes, já que os aditivos comercialmente utilizados não têm efeito significativo em materiais álcali-ativados.

É necessário um maior conhecimento para entender o papel da água na determinação da nanoestrutura e da microestrutura. Por isso, análises microestruturais, utilizando técnicas microscópicas paralelamente aos testes de permeabilidade, são essenciais para tentar resolver algumas destas questões em aberto (BRICE *et al.*, 2014)

É preciso o desenvolvimento de mais pesquisas sobre o comportamento dos materiais álcali-ativados em temperatura elevada e também sobre a deterioração devido aos efeitos ambientais. Para um melhor entendimento do comportamento mecânico do material, a microestrutura, nanoestrutura e a química dos geopolímeros devem ser bem investigadas (HASSAN; ARIF; SHARIQ, 2019; GERALDO; AGUIAR; CAMARINI, 2020).

Em relação à durabilidade do material, os ensaios de ataque de cloretos de materiais álcali-ativados apresentam resultados que variam de "quase zero" a muito mais elevado do que o concreto de cimento Portland. Isto se dá devido ao fato de que as estruturas de poros de materiais álcali-ativados abrangem uma gama de produtos com diferentes permeabilidades, e isto precisa ser compreendido e melhor controlado (BRICE *et al.*, 2014). A resistência ao ataque por cloreto é um dos principais parâmetros a ser avaliado na durabilidade de cimentos e concretos. Os íons cloreto, que penetram nos aglomerantes álcali-ativados por meio da absorção capilar, pressão hidrostática e difusão de íons, quando presentes em elevadas quantidades, provocam ataques localizados no aço em concretos álcali-ativados (ZHUANG *et al.*, 2016). A

quantidade requerida para iniciar a corrosão varia de acordo com traço e o pH da solução contida nos poros do material (PORTELLA *et al.*, 2006). Tendo em vista que os íons cloreto podem atacar rapidamente o concreto e atingir a armadura em um curto período de tempo, torna-se necessário avaliar a resistência das argamassas ao ataque por cloreto.

Outro fator relevante em relação à durabilidade é o aprofundamento nos estudos das interações entre o aglomerante e a armadura metálica (PROVIS, 2017). Além disso, cabe ressaltar que poucos autores se preocupam em desenvolver pesquisas relacionadas à eflorescência nos materiais, indicando, em alguns casos, apenas a existência ou não do fenômeno.

Um dos mais importantes riscos ambientais associados ao uso de subprodutos na construção é o potencial de liberação e consequente migração de contaminantes para o ambiente (ABORA *et al.*, 2014). O uso de resíduos em materiais álcali-ativados, que contêm não somente componentes inertes, mas também, em alguns casos, elementos tóxicos (metais pesados, compostos orgânicos, materiais radioativos, entre outros), evidencia a necessidade de se avaliar o processo de lixiviação, pois as características dos materiais podem colocar em risco a saúde humana e o meio ambiente. Além disso, devido à composição química dos materiais que compõem as argamassas, torna-se viável analisar o potencial de lixiviação dos elementos como forma de adotar eventuais medidas para reduzir o risco de contaminação ambiental.

Dentro do escopo das lacunas ainda existentes, destaca-se a necessidade de:

- a) Desenvolvimento e otimização de projetos baseados em misturas com uma gama mais ampla de matérias-primas e ativadores, incluindo sistemas de uma parte (apenas adição de água) ou duas partes (solução ativadora + matéria-prima);
- b) Análise das características de durabilidade, em particular as interações entre o aglomerante e reforço de aço;
- c) Desenvolvimento de aditivos apropriados para permitir o controle da reologia;
- d) Desenvolvimento de ativadores com menor impacto ambiental que o hidróxido de sódio ou silicato de sódio, mas com similar e desejável rápido desenvolvimento de resistência inicial;
- e) Validação e padronização de métodos de teste e especificações baseadas em desempenho diretamente aplicáveis a produtos (cimentos e concretos) álcali ativados;
- f) Melhor precisão e base técnica de avaliação ambiental de ativadores, precursores e misturas de concreto (PROVIS, 2018).

Por fim, na maioria dos casos, o aglomerante álcali-ativado é produzido em escala laboratorial com formulações empíricas. Um dos desafios encorajadores que necessitam de mais contribuições e esforços, consiste na produção e utilização destes aglomerantes em grande escala (ZHUANG *et al.*, 2016).

4

MATERIAIS DE REPARO

Os egípcios e romanos produziram concreto que é muito mais durável do que o concreto moderno. Também é notável que, embora os cimentos modernos tenham sido habitualmente usados para reparar estruturas antigas, os reparos modernos raramente provaram ser tão duráveis quanto os cimentos antigos sob as mesmas condições de exposição. Isso pode indicar que as estruturas ligantes formadas com menor teor de cálcio e aluminossilicato podem proporcionar vantagens em termos de estabilidade do aglomerante em períodos prolongados ou podem estar relacionadas à incompatibilidade de propriedades de materiais (químicos e mecânicos) entre materiais existentes e novos (PROVIS, 2014).

Nos concretos de cimento Portland, a principal razão para a falha prematura de estruturas de concreto armado é a corrosão do reforço. As estruturas de concreto armado exigem reparos dispendiosos ou mesmo uma demolição em um período de tempo muito curto, resultando em uma vida útil de 10 a 20 anos. Estes riscos são frequentemente associados a ambientes altamente agressivos ou são originários do uso incorreto do conhecimento das estruturas de concreto armado. A consequência disto é que aproximadamente 40-60% dos recursos no setor de construção são dedicados a manutenção e reparos (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2009).

Além dos problemas de procedimentos, o reforço das estruturas pode ser também exigido pela degradação de materiais estruturais, que estão intimamente ligados a durabilidade, ou até mesmo pelo aumento das cargas de projeto. Alguns tipos de estruturas precisam ser reparados para evitar os impactos sociais relacionados a demolição e a possível reconstrução de novas estruturas, com é o caso de túneis e pontes (MARTINOLA; MEDA; PLIZZARI, 2010).

Os principais problemas de durabilidade em concreto armado incluem questões como: reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e cloretos, corrosão do aço, dentre outros. O ataque por sulfato é um dos principais fatores que causam a deterioração de expansão da estrutura de concreto (TANG *et al.*, 2015). Por este motivo, as manifestações patológicas nas estruturas requerem atenção especial no reparo, já que as falhas nos serviços de reparo podem continuar prejudicando a estrutura, necessitando de retrabalhos (LUKOVIĆ, *et al.*, 2014; SOUZA; SOUZA, 2017).

A reparação de estruturas de concretos degradados é fundamental para garantir a segurança e manutenção. Uma reparação bem feita melhora a função e o desempenho de uma estrutura, evidenciando uma melhor aparência e permitindo uma melhor resistência, além de evitar a entrada de cloretos, CO₂, sulfatos e umidade garantindo a durabilidade do material (SHASH, 2005).

A necessidade de redução nas emissões de carbono por parte da indústria do cimento é algo que vem sendo amplamente discutido pela comunidade científica. Além disso, cabe destacar que a crescente infraestrutura em todo o mundo tem exigido, cada vez mais, grandes reparos (ZANOTTI *et al.*, 2017). A transformação da infraestrutura mundial é de elevada magnitude e valiosa. Por exemplo, os Estados Unidos gastaram US \$ 1,6 trilhão em consertos e alterações de pontes rodoviárias entre 2012 e 2017. O orçamento anual da União Europeia para fortalecer e reparar quase 84.000 pontes de concreto é de 2,15 trilhões de euros (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012).

O exército norte americano, em 1985, discutiu o potencial valor da tecnologia de ativação alcalina em situações militares, particularmente como material de reparo para o concreto de pistas de decolagem (MALONE; RANDALL, 1986). Devido às suas características, Wu *et al.* (2019) informam que o aglomerante álcali-ativado pode ser usado como material de reparo rápido para pista de aeroporto. Além disso, esse material possui potencial solução para preenchimento de lacunas de azulejos e uma variedade de excelentes propriedades físicas, como durabilidade, que podem ser obtidas por condições de cura e manipulação de sua formulação.

Embora, em geral, as aplicações de reparo não envolvam o uso de grandes volumes de concreto quanto às construções novas, quantidades significativas deste material são empregadas em algumas aplicações, tais como reparos de infraestrutura e especialmente reparos e sobreposições de pavimentos rodoviários. A possibilidade de empregar concreto ou argamassa álcali-ativada como um material de reparo mais sustentável comparado ao concreto de cimento Portland foi proposto em alguns estudos nas últimas duas décadas (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012) e a aplicação de diferentes tipos de materiais álcali-ativados para reforço externo de estruturas de concreto armado foi também investigada (BALAGURU *et al.*, 1997; MENNA *et al.*, 2013).

O trabalho de reparo nos concretos é amplamente desenvolvido utilizando material de reparo comercial. Frasson, Pelisser e Silva (2020) relatam que manifestações patológicas, como fissuras, são comuns em estruturas de concreto, possuindo diversas causas, modificando

a estética, comprometendo as propriedades mecânicas e durabilidade da construção. Nesse sentido, Mirza *et al.* (2014), Husein *et al.* (2017) e Wu *et al.* (2019) alertam para o fato de que, ainda que os materiais de reparo comerciais apresentem boas propriedades mecânicas e de aderência para estruturas de concreto, eles são materiais muito caros. Além disso, as manifestações patológicas nas estruturas requerem atenção especial no reparo, sobretudo na zona de ligação entre os materiais de reparo e o local a ser reparado. Possíveis falhas nas ações de reparo podem resultar em prejuízos para a estrutura, necessitando de retrabalhos (LUKOVIĆ *et al.*, 2014). Portanto, torna-se urgente o desenvolvimento de materiais de reparo com o mesmo elevado desempenho e baixo preço.

Apesar da ampla e crescente necessidade de reparação de estruturas de concreto, a falta de dados e diretrizes abrangentes deixa os profissionais envolvidos com algumas incertezas sobre como proceder com o projeto e a execução de reparos duráveis (CUSSON; MAILVAGANAM, 1996).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) iniciou em 1993 um projeto de normatização da argamassa de reparo. Porém, nenhum texto foi finalizado. A falta de normatização a respeito das características e propriedades a serem atendidas pelas argamassas de reparo no Brasil afeta toda a cadeia de interessados, desde o produtor que desconhece seu comportamento até os consumidores (MEDEIROS; SELMO, 2003). Existe uma grande variedade de materiais de reparo disponíveis no mercado da construção civil, sendo que essa variedade se dá, principalmente, em função do ambiente ao qual o reparo estará submetido (SILVA *et al.*, 2019). Dentre as argamassas de reparo disponíveis no mercado brasileiro e recomendadas para o mesmo propósito, existem produtos com características muito diferentes (BALAGURU; KURTZ, RUDOLPH, 1997). Por isso, sua caracterização deve ser analisada em conjunto com a norma de estrutura de concreto da estrutura a ser reparada (MEDEIROS; HELENE; SELMO, 2009).

Andrade (1992) relata que a classificação dos materiais de reparo se dá em função da família química dos produtos envolvidos, que podem ser de base inorgânica, orgânica ou mista. Os materiais de base inorgânica são compostos por cimento Portland, sendo caracterizados por argamassas e concretos. Estes materiais são compostos por aditivos que melhoram as propriedades de tempo de pega, consistência, retração e exsudação. Os materiais de base orgânica são compostos essencialmente por resinas e polímeros, como os termoplásticos e os termorrígidos. Sua composição é bastante variada, sendo os mais comuns os materiais a base de resinas epóxi, resinas poliéster e base acrílica. Os materiais de reparo

mistos são compostos por materiais de base inorgânica e orgânica que são formulados a base de resinas e combinadas com outros materiais e atendem as exigências de desempenho e durabilidade nas ocasiões em que o concreto precisa ser modificado ou que o seu uso seja inadequado (HELENE, 1992). Conforme elucidado, não há no Brasil uma normatização dos materiais de reparo, deixando uma lacuna bastante significativa em relação a caracterização desses materiais. Por isso, o trabalho de Cusson e Mailvaganam (1996), utilizado para apresentar a Tabela 4.1, é bastante útil para apresentar algumas características dos materiais de reparo.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos materiais para reparo

Propriedades mecânicas	Argamassa cimentícia	Argamassa cimentícia modificada com polímero	Argamassa a base de resina
Resistência à compressão (MPa)	20-50	30-60	50-100
Resistência à tração (MPa)	2-5	5-10	10 - 15
Módulo de elasticidade à compressão (GPa)	20-30	15-25	10 - 20
Coefficiente de expansão térmica (°C)	10	10 - 20	25-30
Absorção de água (% por massa)	5,0-15	0,1-0,5	1,0 - 2,0
Temperatura máxima de serviço	>300	100-300	40-80

Fonte: (CUSSON; MAILVAGANAM, 1996).

Complementarmente ao trabalho de Cusson e Mailvaganam (1996), diversos trabalhos foram publicados gerando dados sobre as características dos materiais de reparo.

De uma maneira geral, as principais características de um material de reparo de alto desempenho é a aderência e a resistência mecânica nas idades iniciais (AUSTIN; ROBINS; PAN, 1999; YUN; CHOI, 2014; PHOO-NGERNKHAM *et al.*, 2015; ZANOTTI *et al.*, 2017).

Diversas técnicas de reparo/reforço foram desenvolvidas, a exemplo do concreto com fibras de aço, poliméricas ou de carbono; argamassas reforçadas com resina epóxi, auxílio de chapas de aço, camisas de reforço, adições minerais, entre outros (VASKE, 2005). Dentre as técnicas citadas, Silva *et al.* (2019) destacam o método de adição mineral com a utilização do metacaulim, cujos benefícios trazidos às argamassas para reforço/reparo ainda não são totalmente conhecidos. Porém, completam os autores, esse tipo de técnica apresenta baixo custo e, principalmente, fácil execução, o que é fundamental, em virtude de ser este último fator ser um dos grandes causadores de patologias em construções no Brasil.

Conforme já mencionado, os aglomerantes álcali-ativados são materiais passíveis de utilização em uma ampla gama de aplicações na construção civil, no campo de transporte, metalurgia, revestimento, materiais de membrana, disposição de resíduos e reparos (VAN JAARSVELD; VAN DEVENTER, 1999; XU; VAN DEVENTER, 2000; VAN DEVENTER *et al.*, 2007; HE *et al.*, 2013 ZHANG *et al.*, 2015). Em geral, as argamassas de reparo são constituídas por cimento Portland, agregados finos, plastificantes, aditivos minerais (como calcário ou sílica) e polímeros, dentre outros (MEDEIROS; HELENE; SELMO, 2009)

Várias são as propriedades, além da compatibilidade, que devem ser destacadas quando se trata de reparos. As características dos aglomerantes álcali-ativados o tornam um material de reparo adequado e sustentável, que podem ser usados em diferentes formas, como pasta para injeção de trinca, argamassa para restauração de seção e reparos (ZAMANABADI *et al.*, 2019). Alguns requisitos para a compatibilidade dos materiais de reparo são sugeridos: resistência à compressão, resistência a tração na flexão, módulo de elasticidade, consistência e aderência. Outras avaliações também devem ser avaliadas, tais como: permeabilidade, porosidade e módulo de elasticidade (para conhecer sua rigidez) (MAZZA, 2010; ALANAZI *et al.*, 2016; ALBIDAH *et al.*, 2020).

Diversos trabalhos têm desenvolvido materiais de reparo objetivando sua aplicação. Alazani *et al.* (2016) compararam argamassas álcali-ativadas com materiais de reparo de pavimentos existentes no mercado, mostrando a elevada resistência a compressão do material à base de metacaulim em relação ao substrato estudado.

Na pesquisa de materiais de reparo de pavimentos, Li, Zhi e Yao (2014) prepararam argamassa de reparo com rápido tempo de pega, elevada resistência utilizando clínquer (de cimento) em conjunto com silicato de sódio como ativador. Coppola, Coffetti e Crotti (2018) prepararam argamassas como reparação para reparos existentes. No estudo, o pó sólido

composto por $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, KOH e Na_2CO_3 na proporção de 7:3:1 foi utilizado como ativador. A trabalhabilidade da mistura fresca foi de $160 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$.

Apesar da tecnologia de materiais de reparo estar se desenvolvendo com materiais já conhecidos no ramo da construção civil, os aglomerantes álcali-ativados têm tomado espaço em diversos estudos no sentido de se obter um material suficientemente aceitável para o uso como reparo. De acordo com Zamanabadi *et al.* (2019), os méritos dos aglomerantes álcali-ativados os tornaram um material de reparo adequado e sustentável, que pode ser usado em diferentes formas, como pasta para injeção de trincas, argamassa para restauração de seção e reparos de junções.

Phoo-ngernkham *et al.* (2015) estudaram um aglomerante álcali-ativado à base de cinza volante com alto teor de cálcio para uso como material de reparo, relatando que a zona de interface do concreto e da argamassa álcali-ativada era mais homogênea do que a do concreto e poderia ser usada como material de reparo alternativo. Além disso, Duan, Yan e Luo (2016) estudaram um novo material de reparo de pega rápida, alta resistência inicial e impermeável, tendo bons resultados para aplicação em atividades de reparo. Neste estudo foi preparado um material de reparação de concreto usando aglomerante álcali-ativado composto por metacaulim. O material apresentou propriedades como rápido tempo de pega, superfície hidrofóbica, alta resistência à compressão e alta aderência.

Zamanabadi *et al.* (2019) produziram uma pasta álcali-ativada com escória granulada de alto forno e micro sílica com tempo de pega final de 25-35 min e resistência à compressão, com 1 dia de cura, de 60-70 MPa, que pode ser usada para fins de reparo devido à sua configuração adequada e propriedades de resistência.

A pesquisa de Frasson, Pelisser e Silva (2020) analisou o desempenho mecânico de cimento álcali-ativado como material para recuperação de fissuras. Os resultados mostraram que é possível utilizar o cimento como material de preenchimento de fissuras em estruturas de concreto, com resistência à compressão de 38 MPa, cujo valor é maior ou equivalente à resistência do concreto de referência. As fraturas ocorreram nos substratos de concreto, devido a boa aderência na interface entre os materiais, e a resistência mecânica superior das pastas de preenchimento em relação ao substrato.

Portanto, tendo em vista que os aglomerantes álcali-ativados:

a) são materiais menos dispendiosos, cujas propriedades podem ser comparáveis aos materiais de reparo convencionais (HUSEIEN *et al.*, 2017);

b) apresentam elevado desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e proporcionam melhor durabilidade química e adesão em outros materiais (CASTEL; FOSTER, 2015), estes materiais representam uma alternativa viável ao concreto de cimento Portland como material de reparo alternativo, podendo ser utilizado em sistemas deteriorados.

Coppola, Coffetti e Crotti (2018) desenvolveram uma argamassa álcali-ativada com escória de alto forno para reparar edifícios de alvenaria e concreto. Colangelo *et al.* (2018) estudaram as propriedades mecânicas de um aglomerante álcali-ativado para aplicações não estruturais preparado com metacaulim. Os autores relataram melhor resistência à compressão e resistência a tração na flexão quando um epóxi orgânico e pó de mármore foram adicionados às misturas. Teixeira *et al.* (2019) propuseram, a partir dos dados de resistência mecânica e aderência, que uma argamassa álcali-ativada tem elevado potencial para reparar concreto. Os resultados de Albidah *et al.* (2020) fornecem orientação para a aplicação prática de argamassas álcali-ativadas como material de reparo sob a situação de longa exposição à temperatura elevada. Shah e Huseien (2020) concluem que devido aos seus vários atributos distintos em relação ao cimento Portland, as argamassas álcali-ativadas são vantajosas para fins de construção, especialmente para reparar o concreto danificado.

Alonso *et al.* (2017) estudaram a trabalhabilidade e o comportamento reológico de argamassas álcali-ativadas com silicato de sódio que apresentaram ótima trabalhabilidade. Zanotti *et al.* (2017) preparam e testaram um aglomerante álcali-ativado composto por metacaulim para usar como argamassa de reparo. Os autores verificaram que uma significativa resistência foi obtida por meio da cura dos corpos de prova em temperaturas elevadas e que a resistência à compressão aos 3 dias atingiu 80% da resistência à compressão alcançada aos 28 dias.

O trabalho de Husein *et al.* (2017) reuniu, a partir de diversos estudos, um conjunto de informações técnicas a respeito de materiais álcali-ativados utilizados como reparo:

a) A resistência à compressão é a propriedade física mais relevante do concreto, de maneira que a elevada resistência inicial é essencial para materiais de reparo. Outras propriedades, incluindo resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade são dependentes da resistência à compressão;

b) A aderência dos aglomerantes álcali-ativados depende principalmente dos materiais constituintes e das condições de cura.

c) Aglomerantes álcali-ativados contendo elevado teor de cálcio como aditivo são considerados como boa alternativa para materiais de reparo;

d) Os ganhos de resistência à compressão e o aprimoramento da microestrutura dos aglomerantes álcali-ativados, devido ao aumento no conteúdo da escória de alto forno, são atribuídos à formação de C-S-H adicional;

e) Aglomerantes álcali-ativados compostos por metacaulim e cinza volante curados em temperatura ambiente revelaram resistência de aderência ligeiramente menor do que a resina epóxi também curada em temperatura ambiente. Contudo, possui uma resistência de aderência muito maior dentro de uma faixa de temperatura de 100 °C a 300 °C, sendo considerada adequada para várias aplicações.

f) Os materiais de reparo álcali-ativados possuem melhores características de reparação do que os materiais de reparo feitos com em cimento Portland;

g) Os materiais de reparo álcali-ativados demonstraram uma melhor resistência à abrasão do que materiais de reparo preparados com cimento Portland;

h) Longos períodos de cura térmica podem diminuir a retração potencialmente devido à resistência força bem desenvolvida;

i) A argamassa álcali-ativada revelou maior durabilidade do que materiais de reparo comercial para resistência ao fogo e ataque de sulfato ácido;

j) As comparações de custos entre aglomerantes álcali-ativados e produtos de reparo comercial mostraram que os materiais álcali-ativados são, de longe, a solução mais rentável;

França *et al.* (2018) avaliaram o uso da argamassa álcali-ativada como material de reparo em vigas de concreto de 100 mm x 100 mm x 650 mm. O aglomerante álcali-ativado foi produzido com metacaulim, silicato de sódio, KOH, areia, água e cimento Portland. Os resultados mostraram que as vigas reparadas com a argamassa apresentaram maiores deflexões que as vigas de referência sem aumentar a carga final. O trabalho de Geraldo *et al.* (2018) identificou o uso de argamassa álcali-ativada como material de reparo em estrutura de concreto armado. Os resultados indicaram que a argamassa feita com solução de silicato de sódio e sílica ativa desenvolveu uma rápida e boa resistência (30 MPa após 24 h) e teve boa aderência a superfície do concreto, que são características essenciais para um eficiente material de reparação. Neste estudo, as argamassas apresentaram bom desempenho e real potencial para ser usado como material de reparo alternativo para concreto armado.

A resistência mecânica entre o substrato de concreto e as argamassas de reparo de um aglomerante álcali-ativado a base de metacaulim em temperaturas ambiente e elevadas (200 °C e 400 °C por 3 horas) foi investigada por Albidah *et al.* (2020). As argamassas curadas à temperatura ambiente exibiram excelentes potenciais de reparo e retrofit em termos de sua

aderência e resistência à compressão. Os resultados do teste indicaram que as argamassas álcali-ativadas consistem em alternativa promissora para reparos.

Songpiriyakij *et al.* (2011) também testaram a resistência da aderência entre um reforço de aço e o substrato de concreto utilizando uma pasta álcali-ativada como aderente e relataram a aderência das pastas álcali-ativadas com cinza da casca de arroz eram aproximadamente 1,5 vez maior do que as pastas de reparo compostas por resina epóxi. Portanto, concluem os autores, as forças de aderência dos materiais álcali-ativados são suficientemente altas e devem ser usadas como material de ligação alternativo para trabalhos de reparação.

Hu *et al.* (2008) estudaram a aderência entre um substrato e um aglomerante álcali-ativado por meio do método sanduíche e relataram que o aglomerante álcali-ativado exibiu melhor resistência de aderência do que a mistura com cimento Portland.

Pacheco-Torgal; Gomez; Jajali (2010) determinaram a resistência de aderência entre o substrato de concreto e a argamassa álcali-ativada produzida a partir de resíduos de minas de tungstênio contendo hidróxido de cálcio e descobriram que o aglomerante álcali-ativado possuía uma força de aderência muito alta, mesmo em idades precoces, em comparação com os produtos de reparo comercial. No estudo, as amostras reparadas com o aglomerante álcali-ativado com 1 dia de cura apresentaram maior aderência do que as amostras reparadas com produtos comerciais após 28 dias de cura.

Phoo-ngernkham *et al.* (2015) concluíram que o aglomerante álcali-ativado apresentou elevada aderência ao cisalhamento e resistência à flexão, indicando a possibilidade de sua utilização como elemento de reparo. As argamassas contendo altas concentrações de NaOH e alto teor de cimento Portland (utilizadas como aditivo) apresentaram melhor desempenho.

Kramar, Šajna e Ducman (2016) mostraram que o aglomerante álcali-ativado tem potencial para ser utilizado como reparo em estruturas de concreto. As argamassas produzidas apresentaram boa resistência mecânica e de aderência, mas foram observados problemas como alta absorção capilar e eflorescência. Huseien *et al.* (2016) identificaram um possível uso de aglomerante álcali-ativado com elevado conteúdo de cálcio como material de reparo em condições de cura em temperatura ambiente. Alanazi *et al.* (2016) observaram boa interface de ligação entre um aglomerante álcali-ativado e um substrato comum de argamassa de cimento Portland. O aglomerante álcali-ativado usado na produção de argamassa foi NaOH, silicato de sódio e metacaulim.

Portanto, tendo em vista que os aglomerantes álcali-ativados podem ser empregados com os mesmos equipamentos e práticas adotadas convencionalmente para os materiais de reparo de cimento Portland, e também, apresentam requisitos técnicos suficientes, conclui-se que este tipo de aglomerante pode ser utilizado como material de reparo, porém, questões como durabilidade como material de reparo precisam serem melhores entendidas (HUSEIEN *et al.*, 2017).

5

MATERIAIS E MÉTODOS

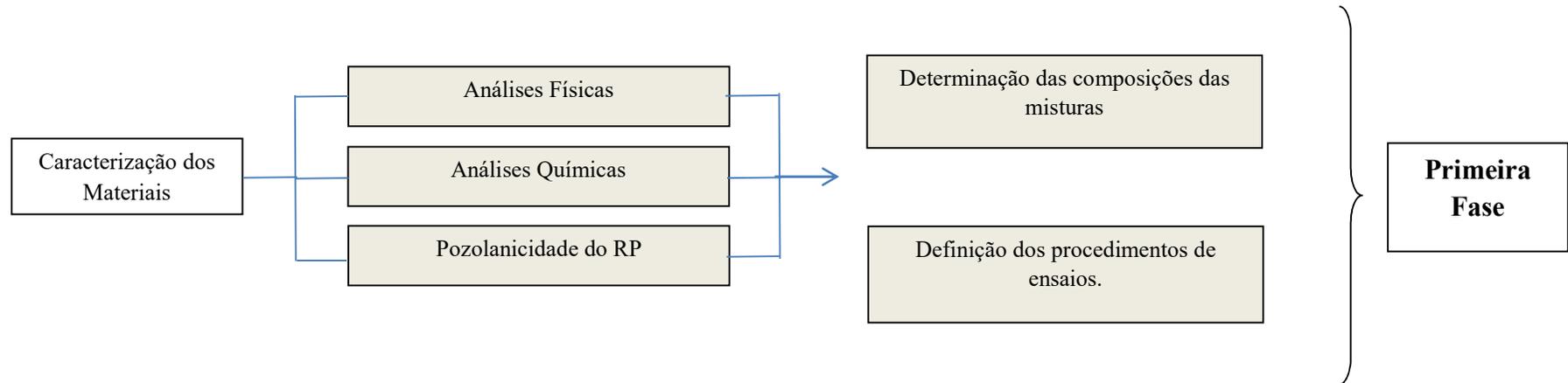
O procedimento experimental foi fundamentado na possibilidade de utilização do resíduo de porcelana (RP) em materiais álcali-ativados. Para determinar o desempenho do RP nas propriedades das pastas e argamassas, o trabalho foi dividido em três fases, descritas nos tópicos a seguir:

5.1 Primeira fase do programa experimental

As atividades relacionadas a primeira fase do programa experimental, apresentada na Figura 5.1, tiveram como objetivo a caracterização dos materiais constituintes: água, areia natural (AN), resíduo de porcelana (RP), sílica da casca de arroz (SCA), metacaulim, hidróxido de sódio, cimento Portland (CP) e brita. Tais caracterizações, feitas por meio de análises físicas: granulometria, finura e massa específica; e químicas: Fluorescência de Raio-X (FRX) e Difração de Raio-X (DRX), apresentam as propriedades dos materiais, permitindo definir as composições das misturas a serem preparadas e ensaiadas.

Para avaliar o comportamento do RP no processo de ativação alcalina, identificando um material substituto ao agregado miúdo convencional (AN), utilizou-se amostras de RP em pó (PRP) e em grão (areia de porcelana - ARP). Nesta fase, ainda foi identificado que o PRP apresenta potencial pozolânico, determinado pelo método da condutividade elétrica (FERNANDES *et al.*, 2017). Após a caracterização dos materiais ocorreu a Segunda Fase, descrita a seguir.

Figura 5.1 – Programa Experimental da Pesquisa – Primeira Fase



5.2 Segunda fase do programa experimental

A Segunda Fase, que é subdividida em 2 etapas (A e B), tem como premissa o estudo preliminar do aglomerante álcali-ativado com incorporação do RP.

5.2.1 Etapa A

Na etapa A, procedeu-se com a produção do Silicato de Sódio Alternativo (SS) (Apêndice A). Nesse sentido, para avaliar o melhor tempo de dissolução na produção do SS foram comparados resultados de resistência à compressão de argamassas álcali-ativadas. Avaliados os tempos de dissolução de 30 e 45 minutos, verificou-se que o período de 30 minutos, acompanhado do repouso de 48 horas, se mostrou mais eficiente, garantindo melhores resultados de resistência à compressão aos 7 dias de idade. Sendo assim, o tempo determinado para a sequência dos ensaios para a produção do SS, foi definido em 30 minutos acompanhado de um tempo de repouso de 48 h.

5.2.2 Etapa B

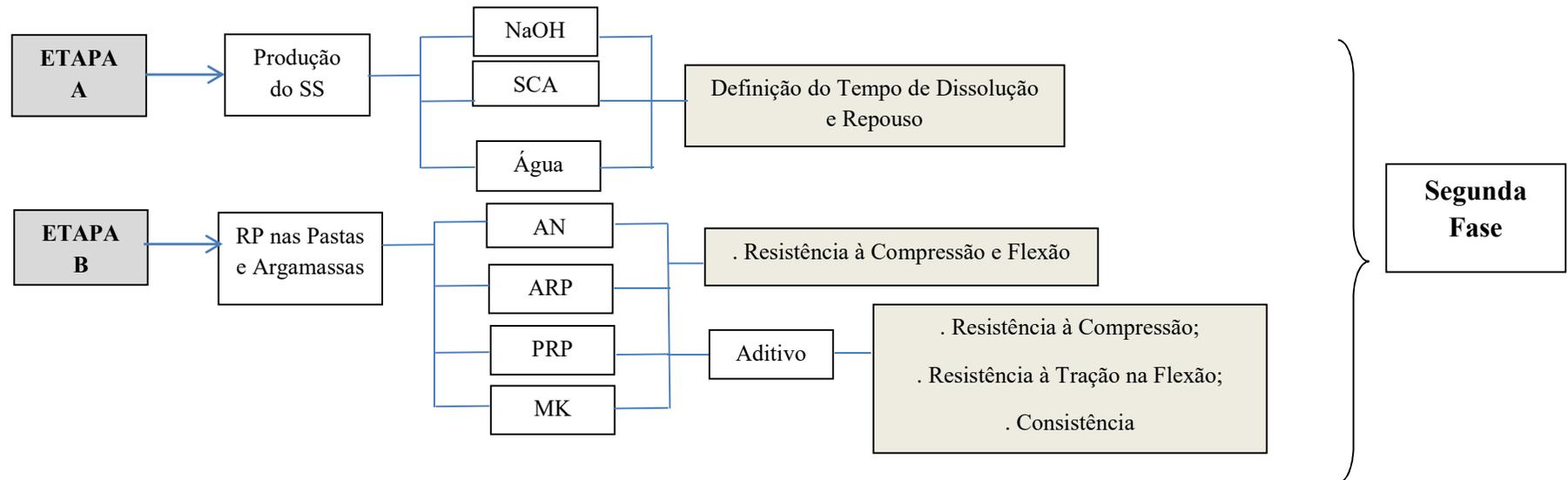
Definida a metodologia da produção do SS, iniciou-se a etapa B, cujo escopo é o estudo preliminar de argamassas álcali-ativadas com ARP substituindo a areia natural (Apêndice A). Concluiu-se a viabilidade da utilização da ARP nas argamassas álcali-ativadas tendo em vista bons resultados de resistência mecânica (até 35,6 MPa aos 7 dias).

Na mesma etapa, percebeu-se que a utilização do RP nas misturas provoca uma diminuição do índice de consistência das misturas estudadas até então. Portanto, avaliou-se a possibilidade da utilização de aditivo superplastificante nas argamassas álcali-ativadas para estudar o comportamento do material em termos de trabalhabilidade e seu uso prático na construção civil. Os valores de trabalhabilidade, não indicaram melhoras significativa nos resultados dos índices de consistência quando utilizados aditivos superplastificantes.

Ainda nesta fase, verificou-se que os resultados de resistência mecânica para as argamassas álcali-ativadas preparadas com aditivo superplastificante demonstraram que nenhuma das argamassas atingiu valores de resistência das mesmas misturas sem o material, ou seja, a utilização de aditivo superplastificante pouco influencia na resistência à compressão das argamassas álcali-ativadas.

Diante dos resultados encontrados na segunda fase observou-se a possibilidade da utilização do RP em substituição total e/ou parcial ao agregado miúdo convencional. Constatou-se também a inviabilidade de utilização do aditivo superplastificante devido aos baixos valores de resistência mecânica e trabalhabilidade obtidos com a utilização desse material. Portanto, a continuidade da pesquisa seguiu sem utilização de aditivos superplastificantes, com o tempo para a produção do SS definido em 30 minutos e repouso de 48 horas. A Figura 5.2 apresenta a segunda fase do programa experimental.

Figura 5.2 – Programa Experimental da Pesquisa – Segunda Fase



5.3 Terceira fase do programa experimental

A Terceira Fase, que também é subdividida em 2 etapas (A e B), consiste basicamente na análise do desempenho de 9 argamassas álcali-ativadas.

5.3.1 Etapa A

Para a preparação do SS, os materiais (água, SCA e NaOH) tiveram seus valores mantidos, não havendo alteração nas massas em cada pasta ou argamassa. A massa de metacaulim também foi a mesma para todas as amostras, variando, portanto, a quantidade dos agregados miúdos (AN e RP) e a adição de PRP, que por sua vez permite a análise da interação do PRP nas argamassas, tanto como filler quanto pozolana.

Nas argamassas, as variações (em massa) dos agregados miúdos foram definidas na faixa de 0 a 100% de AN e RP. O objetivo dessa diversidade de composições é analisar quais os melhores arranjos dos materiais, buscando a substituição, ainda que parcial, do RP por AN. Os resultados dos ensaios das misturas foram comparados com a argamassa álcali-ativada preparada exclusivamente com AN, que por sua vez é o produto referência.

Apesar de alguns materiais terem seus valores constantes, as relações molares das misturas são diferentes, tendo em vista a presença de SiO_2 (63,71%) e Al_2O_3 (17,94%) na composição do RP, que por sua vez se faz presente em diferentes proporções (em massa) nas misturas. A relação molar permite avaliar o desempenho das argamassas em termos de ganho de resistência e tempo de pega. Maiores conteúdos de Al_2O_3 (baixa relação $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) resultam em tempos de pega mais acelerados, ao passo que maiores conteúdos de SiO_2 (alta relação $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) influenciam na resistência mecânica, evidenciando a influência da alumina e da sílica nos tempos de pega e na resistência mecânica, respectivamente.

Na sequência, as misturas experimentais (3 pastas e 9 argamassas) foram submetidas aos ensaios dos materiais no estado fresco (tempo de pega e consistência) e posteriormente no estado endurecido (Resistência à Compressão, Resistência à Tração na Flexão) aos 1, 7, 28 e 90 dias, a fim de avaliar a viabilidade técnica das misturas produzidas com diferentes teores de substituição de agregado miúdo natural por RP.

5.3.2 Etapa B

Tendo os resultados dos ensaios dos materiais nos estados fresco e endurecido, foram escolhidas 4 argamassas para o prosseguimento da pesquisa, avaliadas em termos de: propriedades no estado endurecido (resistência à compressão e resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e aderência em substrato existente); durabilidade (absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao ar, absorção total de água e índice de vazios, eflorescência, ataque por clores e sulfatos), além da análise microestrutural por meio do ensaio de Microscopia

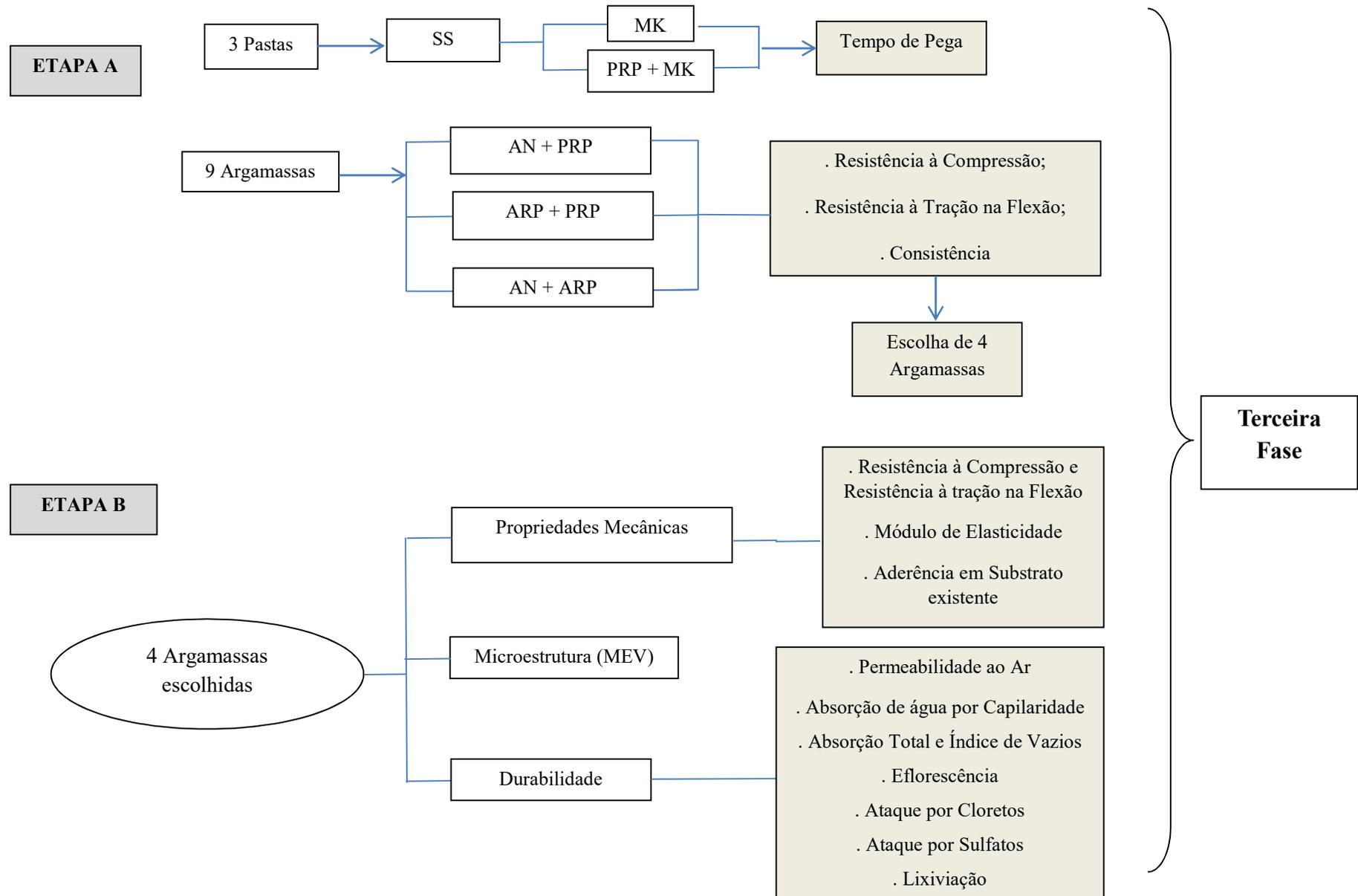
Eletrônica de Varredura (MEV). Finalizando a terceira fase, diante das características das argamassas álcali-ativadas estudadas, permitiu-se a comparação dos produtos ensaiados como material de reparo para a construção civil.

A Figura 5.3 ilustra as ações realizadas no programa experimental desta pesquisa e tópicos a seguir estão apresentadas as especificações dos materiais e dos ensaios realizados.

Todos os métodos de ensaio foram amparados pela normatização técnica (ABNT) e pela comunidade científica, além de que todos os equipamentos e ensaios laboratoriais estavam calibrados diante das especificações técnicas, validando os resultados obtidos.

A partir dos resultados do programa experimental foi possível obter informações mais completas sobre o desempenho dos materiais álcali-ativados ensaiados.

Figura 5.3 – Programa Experimental da Pesquisa – Terceira Fase



5.4 Materiais

Para a preparação das pastas e argamassas álcali-ativadas e o substrato de concreto, submetidos aos ensaios, foram selecionados diversos materiais, descritos nos tópicos a seguir, com funções específicas.

A Tabela 5.1 sintetiza os materiais e as suas respectivas funções no estudo.

Tabela 5.1 – Materiais e suas funções nas misturas

Material	Função
Água	Dissolução/Trabalhabilidade
Areia Natural	Agregado miúdo
Resíduo de Porcelana	Agregado miúdo/Fonte de Sílica e Alumina
Sílica da Casca de Arroz	Fonte de Sílica
Metacaulim	Fonte de Sílica e Alumina
Hidróxido de Sódio	Ativador Alcalino
Cimento Portland	Aglomerante (para o substrato)
Brita	Agregado graúdo (para o substrato)

Fonte: Autor

5.4.1 Água

A água empregada para a produção das pastas e argamassas foi fornecida pelo sistema de abastecimento público da cidade de Campinas/SP, considerada própria para o consumo na construção civil.

5.4.2 Areia Natural (AN)

Areia natural de rio comercializada na região de Campinas/SP foi empregada como agregado miúdo na produção das misturas experimentais. A Tabela 5.2 indica as características físicas do material. A curva granulométrica (Figura 5.4) e o aspecto da areia natural (Figura 5.5a) são apresentadas a seguir.

Tabela 5.2 - Características físicas da Areia Natural

Propriedade	Valor Obtido	Referência
Dimensão Máxima Característica (mm)	2,4	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de Finura	2,35	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Específica (kg/m ³)	2.640	NBR NM 7211 (ABNT, 2019)

Fonte: Autor

5.4.3 Resíduo de Porcelana (RP)

O RP utilizado na pesquisa foi obtido a partir da moagem de Isoladores Elétricos de Porcelana produzidos na cidade de Pedreira/SP. Na caracterização física (Tabela 5.3), é possível observar o formato irregular do material. Foi realizada a curva granulométrica da ARP (Figura 5.4).

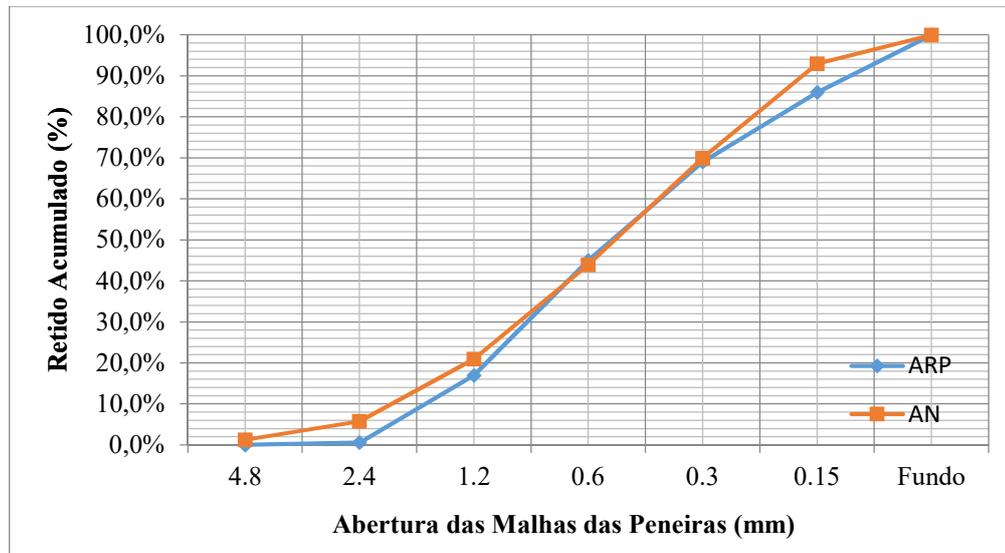
Tabela 5.3 - Características físicas da ARP

Propriedade	Valor Obtido	Referência
Dim. Máxima Característica (mm)	2,4	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de Finura	1,96	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Específica Areia (kg/m ³)	2.390	NBR NM 7211 (ABNT, 2019)
Massa Específica Pó (kg/m ³)	2.550	NBR NM 7211 (ABNT, 2019)
Área Específica BET – (g ² /h)	1,84	Método BET

Fonte: Autor

A dimensão máxima característica é a mesma para as duas areias (DMC = 2,4 mm). O módulo de finura e a massa específica da ARP são inferiores ao da areia natural, em 17% e 10% respectivamente. Nesse sentido, pode-se estimar que a quantidade de finos é maior, podendo influenciar na consistência da argamassa. A areia do resíduo de porcelana pode ser considerada como muito fina pelo valor do módulo de finura ser inferior a 2,0 (valor do módulo de finura entre 2,0 e 2,4, indicado na ABNT NBR 7211) (ABNT, 2019).

Figura 5.4 - Curva Granulométrica da AN e da ARP



Fonte: Autor

O beneficiamento do RP se deu em duas etapas de fragmentação, seguindo a metodologia adotada por Shiroma (2016), consistindo em britagem (primária e secundária) e moagem. Na britagem primária, o RP foi fragmentado por um britador-de-mandíbulas para posteriormente seguir até o britador-de-martelos (britagem secundária). Depois de britado, o material apresentava aspecto granular (Figura 5.5b), obtendo assim a ARP. Na sequência, o material foi transferido para um moinho de bolas, para que, após o período de 16 h contínuas, fosse finamente moído (SHIROMA, 2016), tendo como produto final o PRP (Figura 5.5c). Todo o material beneficiado foi acondicionado em tambores plásticos no Laboratório de Aglomerantes e Resíduos (LARES) da FECFAU/UNICAMP.

Figura 5.5 - Aspecto da AN e do RP



a) Areia Natural



b) RP como areia



c) RP em pó

Fonte: Autor

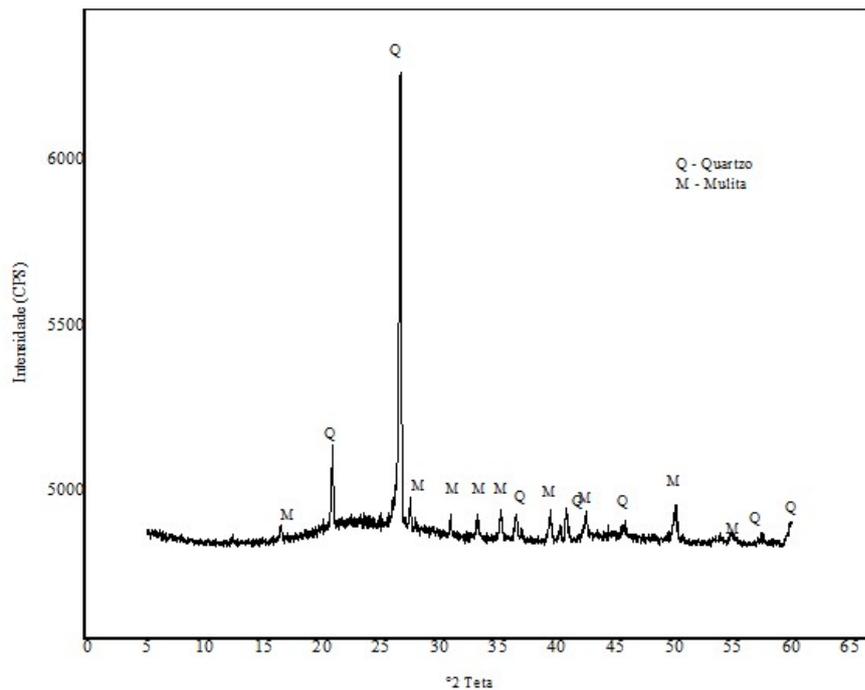
Para obter uma melhor caracterização do RP em pó, o material foi submetido aos ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX). O ensaio de caracterização por FRX foi feito por um espectrômetro EDX 720 da marca SHIMADZU em atmosfera a vácuo. Os resultados da composição química (Tabela 5.4) indicam a possibilidade de avaliar o potencial de reação pozolânica com o uso do RP, pois o somatório dos teores de SiO_2 e Al_2O_3 nas pozolanas é usualmente superior a 70%. Além disso, cabe destacar a presença de alguns óxidos de metais tóxicos presentes na amostra (CrO_3 , MnO , NiO , ZnO , SrO , ZrO_2 , TiO_2). A DRX foi feita pelo equipamento da marca Philips Analytical X Ray, Modelo: X'Pert-MPD. A radiação empregada foi de Cu ($\text{K}\alpha$) $\lambda=1.54060 \text{ \AA}$, 40 kV, corrente de 40 mA, 2 Teta: 5-60 graus, passo: $0,02^\circ$, velocidade $0,016 \text{ graus/s}$. Nos resultados da caracterização por DRX (Figura 5.6), os minerais identificados foram o quartzo e a mulita cujas composições são SiO_2 e $3(\text{Al}_2\text{O}_3).2(\text{SiO}_2)$, respectivamente, indicando as fases cristalinas do material. Os mesmos minerais foram identificados por alguns autores (IQBAL; LEE, 2000; ANUNCIACÃO 2013; SHIROMA, 2016). Após a etapa de sinterização tornou-se possível identificar picos correspondentes ao quartzo e à mulita, de maneira que a elevação da temperatura de sinterização ($1.100 \text{ }^\circ\text{C}$ para $1.300 \text{ }^\circ\text{C}$) aumentou a presença de mulita, cuja predominância de Al_2O_3 está na entre 70,5 a 74,0% (em massa) (XU *et al.*, 2015). A mulita exibe excelentes propriedades físicas e mecânicas com boa resistência à fratura e baixa densidade (MONTEIRO; SABIONI; DA COSTA, 2004).

Tabela 5.4 - Composição química do PRP por FRX.

Óxidos	Teor (%)
SiO_2	63,71
Al_2O_3	17,94
K_2O	7,21
Fe_2O_3	3,13
CaO	2,66
SO_3	2,58
Cl	1,42
P_2O_5	0,172
MgO	0,02
TiO_2	0,77
CrO_3	0,03
MnO	0,13
NiO	0,01
ZnO	0,04
SrO	0,02
ZrO_2	0,17

Fonte: Autor

Figura 5.6 - Difratoograma do PRP



Fonte: Autor

5.4.4 Sílica de Casca de Arroz (SCA)

Para o presente trabalho a SCA foi fornecida pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda., denominada comercialmente de Sílica Nobre ou sílica da casca de arroz. Este produto (Figura 5.7a) é oriundo de um processo de queima controlada da casca do arroz, visando obter um elevado teor de sílica amorfa com estabilidade e qualidade para a aplicação na construção civil (concretos, argamassas, fibrocimento e pré-fabricados). Segundo Zou e Yang (2019), existem dois tipos de SCA: a cinza da casca de arroz branca e a cinza da casca de arroz preta, de forma que irá depender da combustão completa ou incompleta para se obter determinado tipo de cinza. A massa específica da SCA utilizada neste estudo é de 2140 kg/m³, a massa unitária é de 472,6 kg/m³ e a área superficial de 6,5 m²/g, determinadas respectivamente por meio da NBR 23 (ABNT, 2001) e Método BET (GERALDO; AGUIAR; CAMARINI, 2020).

5.4.5 Metacaulim (MK)

O MK HP ULTRA, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil (Figura 5.7b), tem massa específica de 2570 kg/m³, massa unitária de 495,9 kg/m³ e área superficial de 22,3 m²/g, determinadas respectivamente por meio da NBR NM 23 (ABNT, 2001) e Método BET. A análise química quantitativa e qualitativa foi obtida por FRX para o MK e a SCA utilizando-se um espectrômetro da marca Shimadzu XRF 1800 (Tabela 5.5) (GERALDO, 2016).

Figura 5.7 - Sílica da Casca do Arroz e Metacaulim

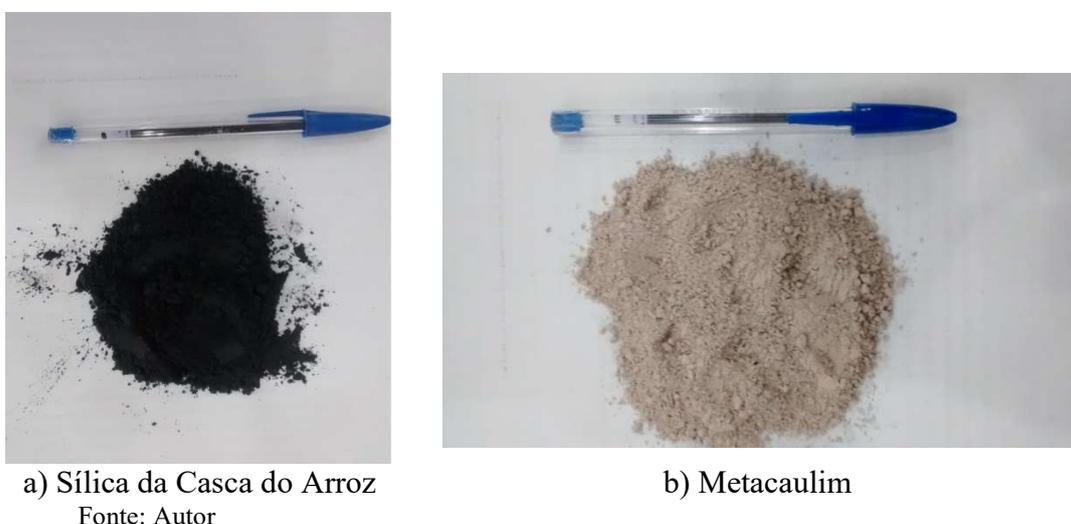


Tabela 5.5 – Composição química dos materiais por FRX

Óxidos	Materiais - Teor (%)	
	Metacaulim	Cinza Casca do Arroz
SiO ₂	58,56	96,20
Al ₂ O ₃	34,11	0,14
P ₂ O ₅	0,08	0,58
MgO	0,80	0,33
K ₂ O	2,84	1,81
CaO	0,05	0,55
TiO ₂	1,50	-
CrO ₃	0,03	-
MnO	-	0,28
Fe ₂ O ₃	1,98	0,06
Br	-	0,01
ZrO ₂	0,04	-

Fonte: Geraldo (2016)

5.4.6 Hidróxido de Sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio utilizado é comercializado na forma de escamas e possui uma composição de 95,5 a 100% de NaOH em massa. O pH está na faixa de 12,7 (solução 0,1 M) e o ponto de fusão é de 318 °C (BUFALO, 2016).

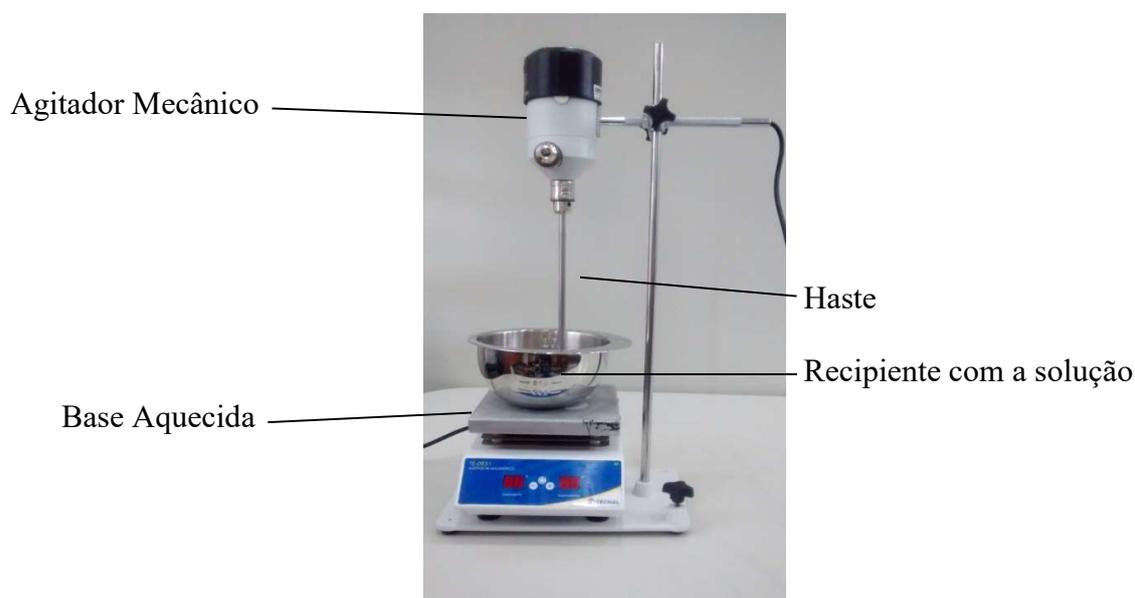
5.4.7 Silicato de Sódio Alternativo (SS)

Os silicatos de sódio convencionalmente utilizados, são produzidos por meio da fusão alcalina de carbonato de cálcio (CaCO_3) e sílica (SiO_2), em forno com temperatura elevada, em torno de 1.400°C. Por esse motivo, a produção do silicato de sódio requer grandes demandas de recursos energéticas e respectivas emissões gasosas, exigindo, dessa forma, que novos métodos sustentáveis sejam adotados.

Nesse sentido, o procedimento metodológico para obtenção do SS foi adotado de acordo com o trabalho de Geraldo (2016). O método consiste no desenvolvimento, em ambiente laboratorial, de um processo de dissolução da fonte de silício presente na SCA visando à obtenção de sílica dissolvida, ou seja, para a produção do SS, a SCA é a única fonte de SiO_2 . A SCA é adicionada à solução de NaOH, para garantir a característica alcalina do meio, já acondicionada em um recipiente de inox e então agitada por 30 min, com temperatura de 90 °C ($\pm 5^\circ\text{C}$) para garantir a dissolução da sílica.

Para essa mistura foram utilizados uma base aquecida com controle de temperatura da marca Tecnal, com rotação regulável entre 120 a 2000 rpm por microprocessador, e uma haste de aço inox $\varnothing 5/16''$ x 18 cm e hélice propulsora de $\varnothing 60$ mm, nível de ruído 55 a 65 dB (a 1m) (Figura 5.8). O SS assim produzido ficou em repouso por 48 h antes de se produzir as argamassas, finalizando a Primeira Fase do trabalho.

Figura 5.8 - Aparato para dissolução da sílica da SCA



Fonte: Autor

5.5 Misturas experimentais

As pastas e argamassas foram compostas por diferentes proporções de substituição de areia natural (AN) por areia de porcelana (ARP) e de RP em pó (PRP). Nessas misturas experimentais as nomenclaturas das pastas e argamassas estão apresentadas na Tabela 5.6.

Cabe destacar que as porcentagens apresentadas na tabela são alusivas à adição do PRP nas pastas e argamassas, cujos valores são referentes à massa total do agregado miúdo (1.065 g). Os valores referentes a 30%, 50% e 70% foram determinados por ensaios preliminares e também pelos trabalhos de (PORTELLA, 2006; CAMPOS, 2009; CAMPOS, 2011). A partir deste tópico, inicia-se a Segunda Fase do presente trabalho.

Todas as argamassas com RP (areia ou pó) foram comparadas com a argamassa álcali-ativada AN₁₀₀. As três pastas e as nove argamassas foram preparadas com o auxílio de um misturador mecânico da marca Perfecta Curitiba, com capacidade para 20 L (Figura 5.9).

As pastas foram produzidas colocando os materiais na seguinte ordem: SS, seguido do MK e do PRP com tempo de mistura de 4 min. Para a produção das argamassas foi adotado o mesmo procedimento, sendo a areia adicionada posteriormente e gradativamente com agitação ininterrupta, com uma duração aproximada de 4,5 min até a obtenção de um material homogêneo. As quantidades dos materiais utilizados nas pastas e argamassas estão detalhadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Nomenclatura e descrição das pastas e argamassas

Código	Material	Descrição
PRef		SS + MK
P ₃₀	Pastas	PRef + 30%PRP
P ₅₀		PRef + 50% PRP
AN ₁₀₀		PRef + 100% AN
AN ₇₀ PRP ₃₀		PRef + 70% AN + 30% PRP
AN ₅₀ PRP ₅₀		PRef + 50% AN + 50% PRP
ARP ₁₀₀	Argamassas	PRef + 100% ARP
ARP ₇₀ PRP ₃₀		PRef + 70% ARP + 30% PRP
ARP ₅₀ PRP ₅₀		PRef + 50% ARP + 50% PRP
AN ₇₀ ARP ₃₀		PRef + 70% AN + 30% ARP
AN ₅₀ ARP ₅₀		PRef + 50% AN + 50% ARP
AN ₃₀ ARP ₇₀		PRef + 30% AN + 70% ARP

Legenda: AN: areia natural; ARP: areia do res. de porcelana; PRP: res.de porcelana em pó

Figura 5.9 - Misturador Mecânico para preparação das misturas

Fonte: Autor

Tabela 5.7 - Misturas experimentais

Mistura	Água* (mg)	SCA* (g)	NaOH* (g)	Metacaulim (g)	Areia (g)	ARP (g)	PRP (g)
Pastas							
Ref	230	104	81	355	-	-	-
P ₃₀	230	104	81	355	-	-	319,5
P ₅₀	230	104	81	355	-	-	532,5
Argamassas							
AN ₁₀₀	230	104	81	355	1065	-	-
AN ₇₀ PRP ₃₀	230	104	81	355	745,5	-	319,5
AN ₅₀ PRP ₅₀	230	104	81	355	532,5	-	532,5
ARP ₁₀₀	230	104	81	355	-	1065	-
ARP ₇₀ PRP ₃₀	230	104	81	355	-	745,5	319,5
ARP ₅₀ PRP ₅₀	230	104	81	355	-	532,5	532,5
AN ₇₀ ARP ₃₀	230	104	81	355	745,5	319,5	-

Tabela 5.7 - Misturas experimentais (continua)

AN ₅₀ ARP ₅₀	230	104	81	355	532,5	532,5	-
AN ₃₀ ARP ₇₀	230	104	81	355	319,5	745,5	-

Legenda: AN: areia natural; ARP: areia de porcelana; PRP: porcelana em pó

*Materiais utilizados na preparação do SS

Fonte: Autor

5.5.1 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Foram preparados 252 corpos de prova, entre prismáticos e cilíndricos, para a realização dos ensaios. Na moldagem, o adensamento se deu com o auxílio de uma mesa vibratória, cujo tempo de duração foi de 1 min. Os moldes (fôrmas) foram protegidos com plástico filme nas paredes e na base para evitar avarias e manter o mesmo acabamento dos corpos de prova sem prejudicar os ensaios. Todos os corpos de prova eram desmoldados 24 h (± 2 h) após a moldagem e armazenados em uma caixa plástica com tampa. Todo o processo de cura transcorreu em temperatura ambiente (umidade relativa do ar de 60% e temperatura média de 25 °C).

A Tabela 5.8 sintetiza as informações relacionadas à estrutura metodológica do estudo

Tabela 5.8 – Características dos Ensaios

Ensaio	Norma/ Metodologia	Corpos de Prova (CPs)	Número de CPs	Repetições traço/idade
Resistência à Tração na Flexão	NBR 13279 (2018)	40 x 40 x 160 mm	108	3
Resistência à Compressão	NBR 13279 (2018)	40 x 40 x 160 mm		
Módulo de Elasticidade	NBR 8522 (2008)	Ø 50 × 100 cm	24	3
Aderência	EN 1052-3 (2004)	40 x 40 x 160 mm	36	3
Permeabilidade ao ar	Thenoz (1969)	Ø 50 × 100 cm	12	3
Absorção de água por capilaridade	NBR 9779 (2013)	40 x 40 x 160 mm	12	3
Abs. Total e Índice de Vazios	NBR 9778 (2005)	40 x 40 x 160 mm	12	3
Eflorescência	Kani <i>et al</i> (2012); Škvára <i>et al.</i> (2009)	40 x 40 x 160 mm	12	3

Tabela 5.8 – Características dos Ensaio (continua)

Ataque por Cloreto	Higashiyama <i>et al.</i> (2014)	Ø 50 × 100 cm	12	3
Ataque por Sulfato	Bakharev (2005); Mobili <i>et al.</i> , (2016)	Ø 50 × 100 cm	12	3
Lixiviação	Ogliari; Rocha; Cheriaf (2007); Ahmari; Zhang, (2013); Zhang <i>et al.</i> , (2016);	40 x 40 x 160 mm	12	3

Fonte: Autor

5.6 Relações Molares

As relações molares das principais composições químicas presentes nas misturas e suas respectivas variações estão apresentadas na Tabela 5.9. Cabe mencionar que as determinações das relações molares se deram em função da presença dos materiais que compõem a argamassa, excluindo, portanto os materiais componentes do SS.

Tabela 5.9 - Relações molares utilizadas nas misturas.

Mistura	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /Na ₂ O	Na ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/Na ₂ O
AN ₁₀₀	4,3	1,17	0,19	12,62
AN ₇₀ PRP ₃₀	4,8	1,72	0,11	12,62
AN ₅₀ PRP ₅₀	5,1	2,09	0,09	12,62
ARP ₁₀₀	4,3	1,17	0,19	12,62
ARP ₇₀ PRP ₃₀	4,8	1,72	0,11	12,62
ARP ₅₀ PRP ₅₀	5,1	2,09	0,09	12,62
AN ₇₀ ARP ₃₀	4,3	1,17	0,19	12,62
AN ₅₀ ARP ₅₀	4,3	1,17	0,19	12,62
AN ₃₀ ARP ₇₀	4,3	1,17	0,19	12,62

Fonte: Autor

5.7 Métodos

5.7.1 Ensaio no estado Fresco

a) Tempo de Pega das Pastas

O tempo de início e fim de pega foi determinado com o auxílio do aparelho de Vicat (Figura 5.10a), conforme prescrição da NBR NM 65 (ABNT, 2002).

b) Consistência das argamassas no estado fresco

A consistência, parâmetro indicativo da trabalhabilidade do produto no estado fresco, foi avaliada em todas as argamassas. Utilizou-se a mesa de consistência (*flow table*) (Figura 5.10b), seguindo as prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2002).

Figura 5.10 - Aparelho de Vicat e Mesa de Consistência



a) Aparelho de Vicat

b) Mesa de Consistência

Fonte: Autor

5.7.2 Estado Endurecido

a) Propriedades Mecânicas

a.1) Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão foi realizada de acordo com as determinações da NBR 13.279 (ABNT, 2018), utilizando-se a máquina universal de ensaios Versa Tester com capacidade de 150 kN e tempo médio de execução de 1 min (Figura 5.11a). Os resultados foram obtidos a 1, 7, 28 e 90 dias de idade.

a.2) Resistência à Compressão

A resistência à compressão foi realizada de acordo com as determinações da NBR 13.279 (ABNT, 2018). Utilizou-se a máquina universal de ensaios Versa Tester com capacidade de 150 kN e tempo médio de execução de 1 min (Figura 5.11b). Os resultados foram obtidos a 1, 7, 28 e 90 dias de idade. Na Figura 5.12 é possível observar os corpos de prova submetidos aos ensaios.

Os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão indicam os métodos propostos na Segunda Fase (estudo preliminar das argamassas álcali-ativadas com RP)

e parte da Terceira Fase (avaliação do desempenho das 3 pastas e 9 argamassas e posterior definição das 4 argamassas para a sequência do trabalho).

Sendo assim, os métodos apresentados a seguir são integrantes da Terceira Fase, avaliando as propriedades de 4 argamassas no estado endurecido, durabilidade e análise microestrutural.

Figura 5.11 - Versa Tester para aferição da Resistência Mecânica



a) Resistência à Tração na Flexão

b) Resistência à Compressão

Fonte: Autor

5.7.3 - Módulo de Elasticidade

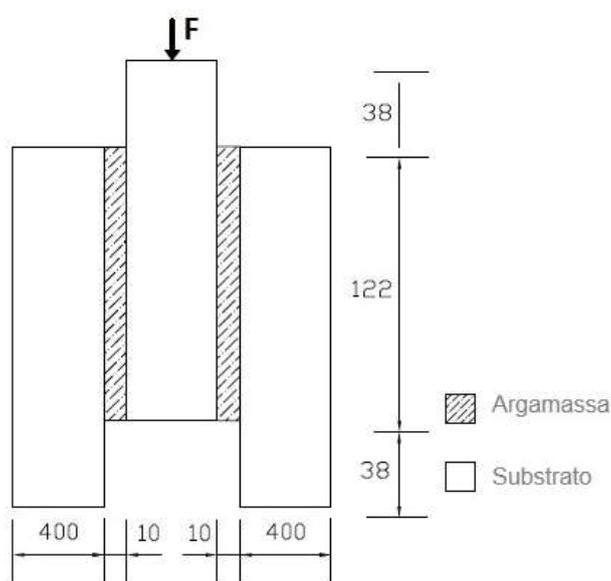
O ensaio do módulo de elasticidade, que afere a rigidez de um determinado material, foi determinado nas argamassas álcali-ativadas por meio das orientações da NBR 8522 (2008), adaptados para esse estudo, nas idades de 7 e 28 dias. Dois extensômetros elétricos (marca: Dinatest) com base de medida de 50 mm foram acoplados nos corpos de prova em lados diametralmente opostos. A deformação foi medida entre as cargas de 0,5 MPa (inicial) e 30% da carga de ruptura do corpo de prova em ensaio de resistência à compressão (final) e os valores obtidos foram registrados em um aquisitor de dados (modelo: 5100 Micro measurements). Os resultados compreendem a média entre os valores aferidos por esses extensômetros, sendo ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos (50 × 100 cm) para cada traço de argamassa.

5.7.4 - Aderência em substrato existente

O *Triplet Test* tem a finalidade de promover a comparação da resistência à aderência entre substrato e argamassas. No estudo em questão, tal metodologia foi aplicada para avaliar a resistência de aderência entre o substrato de concreto e as argamassas álcali-ativadas. O ensaio é derivado da norma Europeia EN 1052-3 (2004) e foi adotado para determinar a resistência de aderência desenvolvida durante o cisalhamento de uma base de concreto com uma camada de argamassa (CORINALDESI; MORICONI, 2008) e permite obter um indicativo a respeito da aderência das argamassas (KOU; POON, 2013).

O método de ensaio *Triplet Test*, que recebeu esse nome porque consiste em três corpos de prova ligados por argamassas, é compreendido por três amostras prismáticas de concreto (40 mm x 40 mm x 160 mm) ligados por duas camadas de 10 mm, cada uma, das argamassas álcali-ativadas (Figura 5.12).

Figura 5.12 – Esquema do *Triplet Test*



O concreto utilizado como substrato, foi preparado com cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), areia, brita e água, listados na caracterização dos materiais. O tamanho da brita utilizada como agregado graúdo foi de 9,5 mm. O concreto foi preparado com a dosagem igual a 1:1,45:2,15:0,45 (cimento:areia:brita:água) em massa. Além disso, os substratos foram curados em temperatura ambiente por 90 dias para evitar possíveis influências do processo de hidratação do cimento na aderência entre a argamassa e o substrato. A resistência

à compressão do substrato foi de 38,7 MPa aos 28 dias e 40,8 MPa aos 90 dias. Antes da aplicação da argamassa álcali-ativada, a superfície do substrato de concreto foi preparada, escarificada com escova de aço, para garantir ideais condições de aderência entre o substrato e a argamassa álcali-ativada, retirando-se todo o material deteriorado e desagregado.

Na dinâmica do ensaio, uma carga (F), oriunda da máquina universal de ensaios Versa Tester com capacidade de 150 kN, deve ser aplicada no corpo de prova do centro para que o deslocamento vertical do substrato seja medido e então a resistência de aderência calculada, dividindo-se a carga máxima por 2 vezes a área de aderência. O sistema deve apresentar simetria para que não haja decomposição da força (F).

A resistência de aderência é calculada de acordo com a equação 5.1 e o ensaio efetuado após 1 e 28 dias de cura.

$$BS = \frac{F}{2.A} \quad \text{Equação 5.1}$$

Sendo,

BS - Aderência (MPa)

F - Carga (N)

A – Área aderida (mm^2)

5.7.5 Permeabilidade ao ar

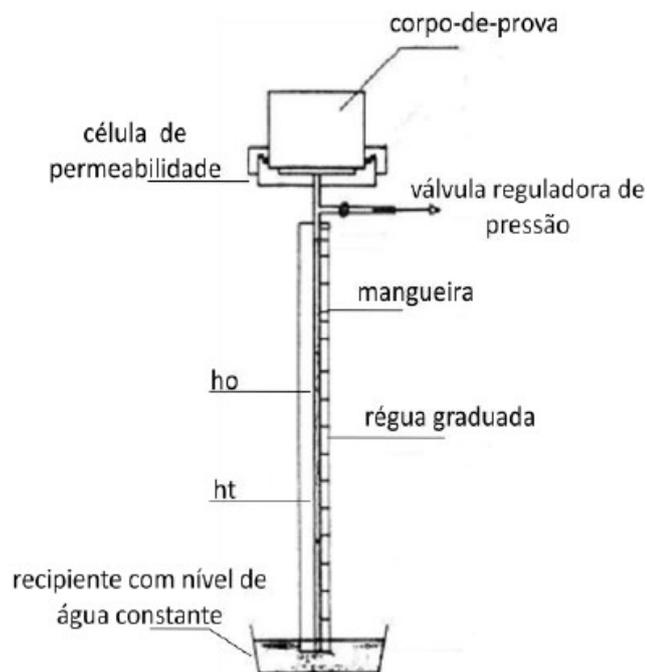
Para o ensaio de permeabilidade ao ar foram moldados, para cada mistura, três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A metodologia foi baseada naquela proposta por Thenoz (1969 *apud* Pereira 2011). As amostras foram mantidas em temperatura ambiente até 72 h antes da data do ensaio (28 dias). Em seguida, foram cortadas, utilizando-se para o ensaio a parte central do corpo de prova. Após o corte, os corpos de prova permaneceram em temperatura de 50 °C por 48 h. As amostras tiveram suas laterais impermeabilizadas previamente à realização do ensaio.

O procedimento de ensaio foi conduzido no Laboratório de Aglomerantes e Resíduos (LARES) da FECFAU/UNICAMP, utilizando-se um Permeômetro (MARTINS, 2001; PEREIRA, 2011 e GERALDO, 2016) (Figura 5.13).

Inicialmente a amostra é inserida no equipamento para que então o sistema seja submetido a uma pressão por meio de uma válvula reguladora de ar. Essa pressão promove o

deslocamento do fluido (água) para cima do nível h_0 (altura inicial) marcado na régua graduada. Posteriormente a válvula reguladora é liberada para que o fluxo de ar comece a passar pelo corpo de prova e, conseqüentemente, a água se mantenha entre os níveis h_0 e h_1 (altura final). O tempo é registrado no momento em que o nível de água, em movimento descendente, atinja os níveis h_0 e h_1 , marcados na régua graduada. O gradiente de pressão gerado força o ar a passar pelos poros existentes no interior da amostra (PEREIRA, 2011).

Figura 5.13 – Ilustração esquemática do ensaio de Permeabilidade ao ar



Fonte: BARDELLA; CAMARINI (2003).

A permeabilidade ao ar é determinada pela Equação 5.2.

$$k = \frac{\mu}{\rho \cdot g} \cdot \frac{s}{S} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{l}{t} \quad \text{Equação 5.2}$$

Sendo,

k = coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2);

μ = viscosidade do ar na temperatura ambiente ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);

s = área de seção transversal do tubo capilar (m^2);

l = altura do corpo de prova (m);

ρ = massa específica do fluido utilizado no tubo capilar (kg/m^3);

S = área da seção transversal da amostra (m^2);

h_0 = altura inicial (m);

h_1 = altura final (m);

t = tempo necessário para que o fluido se desloque da altura h_0 até h_1 (s); e

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

5.7.6 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi conduzido com as amostras aos 28 dias de idade. O ensaio é uma adaptação da NBR 9.779 (ABNT, 2013).

Para o ensaio, foram moldados corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Até a data de ensaio as amostras permaneceram em temperatura ambiente. Posteriormente, foram colocadas em estufa até a constância de massa e então as laterais foram impermeabilizadas. Para a averiguação da massa do corpo de prova seco, ocorreu a pesagem antes da imersão parcial na água. A absorção de água por capilaridade foi determinada nos tempos de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 480 e 1440 min. Para o cálculo da absorção de água por capilaridade foi utilizada a Equação 5.3.

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \text{Equação 5.3}$$

Sendo,

C = absorção de água por capilaridade (%);

M_{sat} = massa saturada do corpo de prova que permanece em contato com a água pelo tempo especificado (g);

M_s = massa do corpo de prova seco (g);

5.7.7 Absorção Total e Índice de Vazios

A absorção total de água e o índice de vazios foram determinados por meio das diretrizes da NBR 9778/2005. O ensaio foi desenvolvido utilizando corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm) aos 28 dias de idade. Foram adotados os valores médios de três resultados dos ensaios dos corpos de prova para cada argamassa álcali-ativada.

As amostras foram secas em estufa ($105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 72 h e, após serem retirados da estufa a massa seca foi obtida (m_s). Posteriormente, os corpos de prova foram imersos em água ($23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 72 h. Depois disso, eles foram colocados em um recipiente com água, que foi gradualmente aquecida, até a ebulição, que por sua vez foi mantida em fervura durante 5 h. Em seguida, a água foi arrefecida até à temperatura ambiente e a massa saturada dos corpos de prova imersos em água (m_i) foi obtida usando uma balança hidrostática. Finalmente, os corpos de prova foram removidos da água e suas superfícies foram secas com um pano, obtendo portanto, a massa saturada (m_{sat}).

A absorção total (A_t) e o índice de vazios (I_v) foram calculados de acordo com as equações 5.4 e 5.5 respectivamente:

$$A_t = \frac{100 (m_{sat} - m_s)}{m_s} \quad \text{Equação 5.4}$$

$$I_v = \frac{100 (m_{sat} - m_s)}{(m_{sat} - m_i)} \quad \text{Equação 5.5}$$

Sendo,

A_t - Absorção Total (%);

m_{sat} - massa saturada (kg);

m_s - massa seca (kg);

I_v - Índice de Vazios (%);

m_i - massa imersa após fervura (kg).

5.7.8 Eflorescência

O desenvolvimento do fenômeno da eflorescência foi avaliado em corpos de prova prismáticos aos 28 dias, os quais foram imersos parcialmente em água destilada.

No recipiente, que foi mantido sob pressão atmosférica, os corpos de prova foram conservados parcialmente imersos, limitados à metade inferior (8 cm), em água destilada pelo período de 15 dias em temperatura ambiente. A proposta de imergir corpos de prova em água destilada para a avaliação do desenvolvimento de eflorescência em aglomerantes alcali-ativados é uma adaptação da metodologia utilizada por Kani *et al.* (2012). O tempo de 15 dias de permanência foi estabelecido por ŠKVÁRA *et al.* (2009), que também se utilizaram da imersão em água para avaliar o surgimento desse fenômeno. Segundo os autores, a ligação do

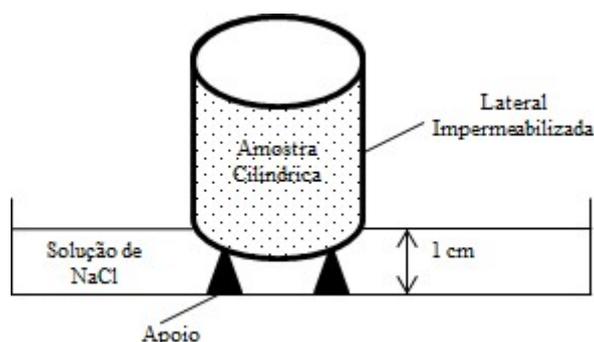
sódio na estrutura do polímero inorgânico aluminossilicato é fraca, o que explica a tendência de formação de eflorescência em ambientes úmidos. Portanto, a verificação do desenvolvimento ou não de eflorescência nos corpos de prova se deu por meio de análise visual das amostras após 15 dias imersos, nesse ambiente propício para o surgimento dessa patologia. Para comparação, avaliação e registro de tal patologia os corpos de prova foram fotografados antes e após o procedimento descrito.

5.7.9 Ataque por Cloreto

O ataque por cloreto nas argamassas álcali-ativadas foi determinado de acordo com o método proposto por Higashiyama *et al.* (2014). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Aos 7 dias de idade, as amostras tiveram suas extremidades cortadas (2 cm em cada extremidade), utilizando-se para o ensaio a parte central do corpo de prova (6 cm de altura) para eliminar a influência da segregação, descartando a parte segregada.

Os corpos de prova de 6 cm de altura foram secos em ambiente de laboratório durante 24 h sendo então impermeabilizados, deixando-se apenas uma superfície cortada livre. Posteriormente, eles foram parcialmente (1 cm) imersos em uma solução de NaCl a 5,0% (Figura 5.14). Após 90 dias de imersão, os corpos de prova foram cortados ao meio e então foi pulverizada uma solução nitrato de prata 0,1 N na superfície em contato com a solução de NaCl. Como resultado da reação química entre a prata (Ag^+) e o cloreto (Cl^-), uma precipitação branca de cloreto de prata deveria surgir na superfície onde o cloreto existia. Para determinar a penetração de cloretos, a profundidade da precipitação branca formada foi medida com o auxílio de uma régua.

Figura 5.14 - Esquema do ensaio de ataque por cloreto



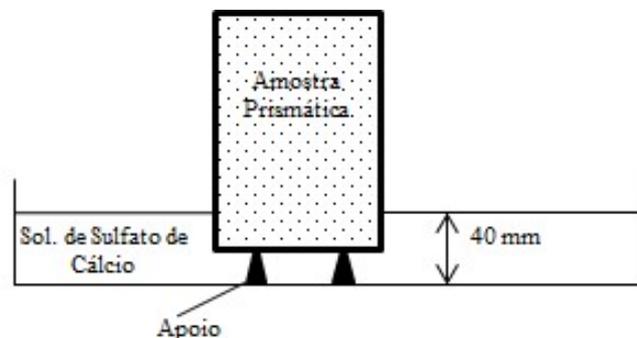
Fonte: Autor

5.7.10 Ataque por Sulfato

Para analisar a durabilidade contra-ataques por sulfato foram realizadas observações em termos de alteração de massa, resistência à compressão e formação de eflorescência (BAKHAREV, 2005; MOBILI *et al.*, 2016). Para a realização do ensaio, após 28 dias de cura, os corpos de prova prismáticos foram pesados e parcialmente imersos (40 mm) em uma solução de sulfato de cálcio (14% em massa) com 1.600 mL de água por 21 dias em condições ambientes (Figura 5.15).

Durante o ensaio, o nível da solução foi mantido constante, adicionando-se apenas água para completar a parcela evaporada. Antes da imersão, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante. Posteriormente os corpos de prova foram pesados novamente para verificação das alterações de massa. Finalmente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão para a verificação do desempenho mecânico devido ao ataque por sulfato. Cabe destacar que a massa seca foi obtida antes do ensaio de ataque por sulfato e a massa saturada por capilaridade foi determinada na pesagem após 28 dias, período em que as argamassas foram ensaiadas.

Figura 5.15 - Esquema do ensaio de ataque por sulfato



Fonte: Autor

5.7.11 Lixiviação

Para avaliar o fenômeno de lixiviação, foram moldados três corpos de prova prismáticos de dimensões 40 mm x 40 mm x 160mm por traço, totalizando 12. As amostras foram curadas em temperatura ambiente durante 28 dias para que, posteriormente, fossem imersas em um recipiente onde a solução pudesse cobrir totalmente as amostras. Os corpos de prova ficaram imersos separadamente por traço (composição das argamassas). A solução foi

preparada com água destilada numa relação líquido/sólido igual a 5 e pH próximo a 4. O pH foi monitorado durante o experimento e ajustado pela adição de ácido nítrico visando mantê-lo de acordo com o valor predefinido.

A escolha do ácido nítrico foi motivada pela necessidade de compensar o pH devido à liberação de NaOH não reagido, sem, portanto, alterar a capacidade de lixiviação de metais. As amostras foram conservadas imóveis, em recipientes plásticos, ao longo de 64 dias de ensaio, sendo divididos em quatro etapas, nas quais ocorria a renovação da água do tanque nos seguintes períodos: 1, 14, 28 e 64 dias.

Após os períodos específicos de imersão, uma amostra de 5 ml era extraída de cada solução e então filtrada em membrana de 0,45 micra, para posteriormente serem submetidas a análise de FRX. Os resultados foram dados em função dos seguintes metais: Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti, Zn, Zr.

Tal procedimento é amparado pelos métodos apresentados em outros estudos (OGLIARI; ROCHA; CHERIAF, 2007; AHMARI; ZHANG, 2013; ZHANG *et al.*, 2016;).

5.7.12 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O ensaio de MEV foi realizado para verificar a microestrutura interna do material, avaliando a influência do RP na morfologia das misturas, no arranjo dos cristais e sobretudo, na porosidade do material, tendo em vista que são produzidas imagens com alta resolução da superfície de uma amostra.

As amostras, aos 28 dias de idade, foram fragmentadas e tiveram deposição prévia com uma fina camada de ouro, por serem não-condutoras. O equipamento utilizado nesse processo foi um Fei Inspect S50 com 25 kV e os resultados de EDS foram obtidos por meio do equipamento Apollo X EDAX, kV:25.0, Tilt:0.0, Take-off:43.5.

5.8 Tratamento de Dados

Os dados obtidos nos ensaios foram tratados estatisticamente conforme critérios estabelecidos pelas normas brasileiras para cada propriedade estudada. Para isso, foi promovida a Análise de Variância (ANOVA) com o objetivo de avaliar se existem diferenças significativas entre os tratamentos. Para o teste, foi utilizado o software Microsoft Excel[®], considerando um nível de confiança de 95%. Para os casos em que o teste de indicou diferenças significativas foi

conduzido o teste de Scott-Knott, considerando um nível de confiança de 95%, utilizando-se o software SISVAR.

O teste de Scott-Knott é utilizado para comparar as médias dos grupos, que tem como vantagem separar as médias entre os grupos sem os sobrepor indicando quais são os tratamentos diferentes entre si.

A análise do teste se dá pela interpretação de que letras minúsculas indicam a evolução da mistura em relação à idade e as letras maiúsculas representam a diferença entre as misturas para uma mesma idade. Letras iguais indicam não haver diferença estatística entre os dados ao nível de 95% de confiança.

6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados, inicialmente, os resultados dos ensaios do programa experimental compreendidos pela Terceira Fase nas etapas A e B.

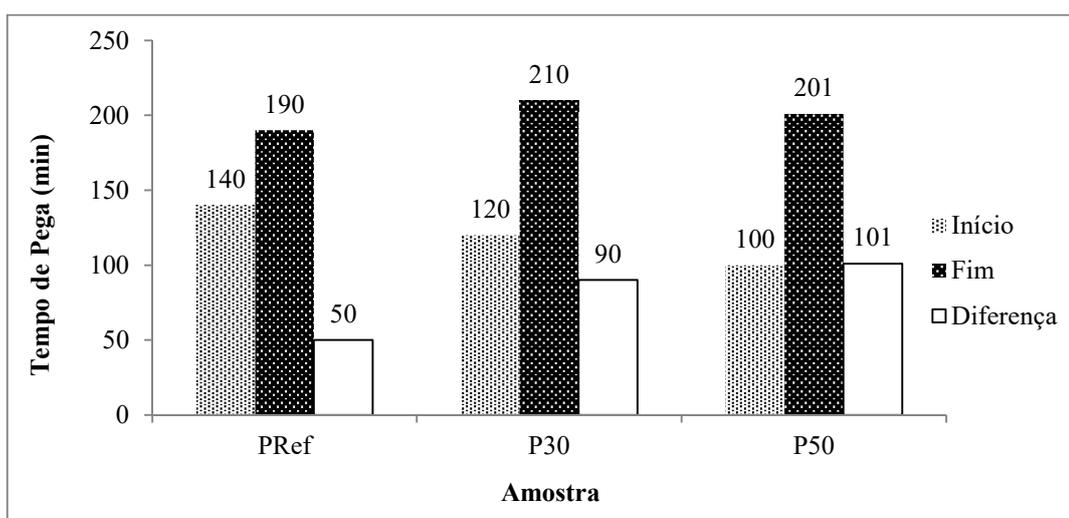
Inicialmente, na Etapa A, são apresentados os resultados referentes ao material no estado fresco (3 pastas) e no estado endurecido (9 argamassas) a fim de avaliar a viabilidade técnica das misturas produzidas com diferentes teores de substituição de agregado miúdo natural por agregado de RP (ARP) e pó de RP (PRP). Posteriormente, na Etapa B, são apresentados os resultados de 4 argamassas escolhidas a partir do desempenho observado na Etapa A.

6.1 Estado Fresco

6.1.1 Tempo de pega

Os resultados do ensaio de Vicat para obtenção dos tempos de pega, são dados em função dos tempos de início e fim de pega das pastas, em minutos (Figura 6.1).

Figura 6.1 - Tempos de Início e Fim de Pega e suas respectivas diferenças



Legenda: P_{ref}: Pasta sem PRP; P₃₀: argamassas com 30 de PRP; P₅₀: argamassas com 50% de PRP

Fonte: Autor

Observa-se que a presença do PRP retarda o início da pega e também aumenta o intervalo de início e fim de pega, indicando resultados similares a (CAMPOS, 2009; JUAN *et al.*, 2010). Por outro lado, o trabalho de Camarini e Soares (2018) avaliaram o desempenho de pastas e argamassas contendo resíduo de porcelana em substituição ao cimento Portland e areia natural e os resultados indicaram que o aumento do teor de RP provoca o aumento do tempo de pega.

O tempo de pega de um material álcali-ativado é um parâmetro de desempenho crítico que afeta sua aplicação prática. O controle do tempo de pega desses materiais pode determinar o intervalo de tempo entre a mistura, transporte e utilização do material, seja concreto ou argamassa (SHI; QU; PROVIS, 2019).

O tempo de início de pega das pastas P₃₀ e P₅₀ foi reduzido o equivalente a 14% e 29%, respectivamente, quando comparadas com a pasta sem RP, cujos processos iniciaram com antecedência de 20 e 40 min, respectivamente.

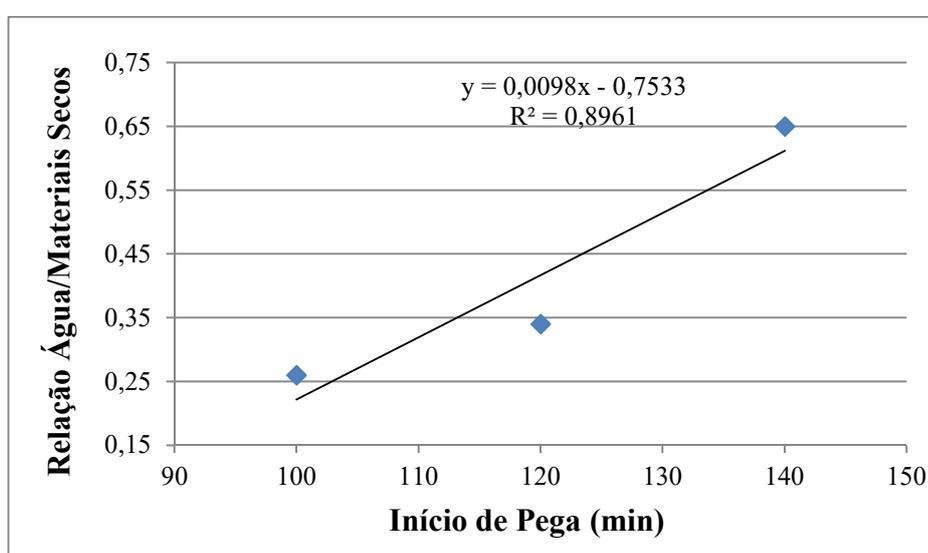
A pasta P₅₀ apresentou menor tempo de pega (100 min), sendo 17 % inferior em relação a P₃₀. Tal fato pode ser comprovado devido ao maior teor de silício, presente no RP, utilizado na mistura, pois a pasta P₅₀ foi preparada com 532,5 g de pó de resíduo de porcelana (63,71% de SiO₂), ao passo que a pasta P₃₀ foi composta por 319,5 g do mesmo material. Corrobora com tal informação os trabalhos de Reig *et al.* (2013) e Geraldo *et al.* (2017) ao relatarem que a pega rápida nas misturas ocorreu devido ao aumento da relação molar SiO₂/Al₂O₃.

Para o tempo transcorrido de fim de pega, o teor de 30% de PRP (pasta P₃₀) apresentou um valor superior a 11% em relação à pasta referência (PRef), enquanto para o teor de 50% de PRP (P₅₀) o aumento foi de 6%, ficando constatada uma pequena variação. A diferença entre o início e fim de pega aumentou à medida que o teor de PRP foi mais elevado nas pastas, atingindo um aumento de 100% para P₅₀. Os tempos finais de pega foram maiores daqueles obtidos no trabalho de Zhuang *et al.* (2016), que ao utilizarem aglomerantes álcali-ativados preparados com cinzas volantes e curados à temperatura ambiente, encontraram valores de pega final entre 60 min e 120 min.

Uma outra explicação para essa ocorrência nos resultados de tempo de pega inicial é a relação água/materiais secos (Apêndice B) das misturas, que variou entre as pastas estudadas, diminuindo à medida que o teor de PRP foi mais elevado. Tal afirmação é confirmada ao determinar o coeficiente de correlação 0,8961 (Figura 6.2). O gráfico, ajustado pela reta em que “y” significa a relação água/materiais secos (não contabilizados os

quantitativos de SCA) e “x” representa o início de pega, indica que os dados estão alinhados, demonstrando o aumento de ambas as variáveis (relação água/materiais secos e pega), indicando, portanto, uma correlação positiva entre o tempo de pega inicial e a relação água/materiais secos. A diminuição do tempo de pega pode se dar também em função do teor de CaO presente na mistura, de maneira que P₅₀ contém mais CaO do que P₃₀ e PRef. Li *et al.* (2017) identificaram uma tendência geral de que o tempo de pega diminui com o aumento do conteúdo de CaO nas misturas de aglomerantes álcali-ativados.

Figura 6.2 - Regressão linear Tempo de Pega Inicial x Relação Água/Materiais Secos



Fonte: Autor

Diversos são os motivos que afetam o tempo de pega: uso das matérias-primas, preparação de amostras e condições de processo, bem como o uso de aditivos (SHI; QU; PROVIS, 2019). A adição de PRP nas misturas aumenta a área superficial do aglomerante que por sua vez favorece a pega mais rápida (RAHEEM; ARUBIKE; AWOGBORO, 2015). Além disso, o aumento da demanda de água contribui para a diminuição do tempo de pega de sistemas álcali-ativados (MEJÍA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MONTES, 2016) e o aumento da quantidade de partículas por unidade de volume da suspensão forma uma rede porosa mais fechada durante o tempo de pega (FREITAS, 2008).

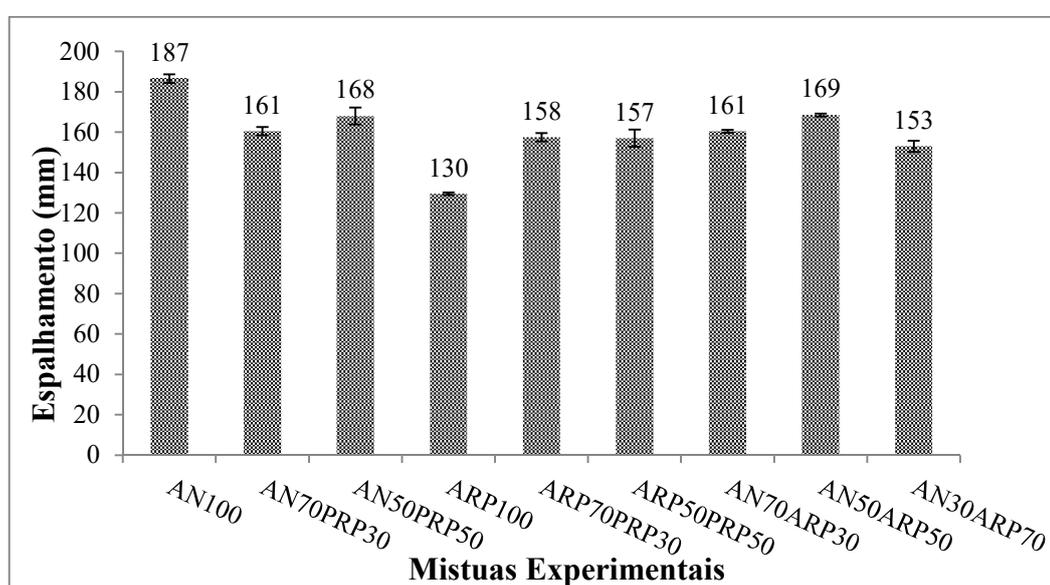
Os resultados de tempo de pega estão alinhados com a afirmação de Provis (2018) ao relatar que o tempo de pega de materiais álcali-ativados são, geralmente, semelhantes aos de materiais à base de cimento Portland. A este respeito, as características de resistência dos álcali-ativados são semelhantes àquelas do cimento de endurecido rápido, no entanto, as propriedades

físicas dos álcali-ativados são melhores do que as do cimento de endurecido rápido (VAN JAARSVELD; VAN DEVENTER, 1999).

6.1.2 Consistência das Argamassas

Os valores da consistência das argamassas, por meio do método do espalhamento (*Flow Table*), são apresentados na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Índice de Consistência das Argamassas



Fonte: Autor

Os resultados mostram que o RP, seja no formato pó ou grão, afeta negativamente a trabalhabilidade das argamassas álcali-ativadas. Todas as argamassas tiveram menor diâmetro de espalhamento do que a argamassa referência (AN₁₀₀), indicando uma forte influência do resíduo de porcelana na consistência das argamassas. O trabalho de Camarini e Soares (2018) também apresentou diminuição no índice de consistência das misturas com o aumento do resíduo de porcelana, utilizado como agregado. No trabalho citado, o índice de consistência variou de 180 mm a 217 mm.

O diâmetro de espalhamento de AN₁₀₀ foi maior, devido provavelmente a morfologia esférica dos grãos de areia, que possuem menor ângulo de atrito do que aqueles materiais constituídos por partículas alongadas (FABRO *et al.*, 2011; ABORA *et al.*, 2014). No mesmo sentido, o espalhamento de ARP₁₀₀, amostra composta exclusivamente por grãos de RP

como agregados, foi de 130 mm, valor 30% inferior à mistura composta exclusivamente por areia natural (AN₁₀₀).

Ao ser moído, o RP adquire formato lamelar, cuja espessura é pequena em relação às outras dimensões, e a forma dos grãos dos agregados é um fator que influencia fortemente a consistência das argamassas (CAMPOS, 2009). Tal informação é corroborada por Fabro *et al.* (2011) ao indicarem que os agregados processados por britadores do tipo martelo são mais lamelares, pois apresentam os menores coeficientes de forma.

O trabalho de Alves *et al.* (2014) mostrou que a água tende a migrar para os agregados reciclados, provavelmente devido à alta taxa de absorção, e ocorre uma diminuição da quantidade de água disponível para manter a trabalhabilidade, por isso, o teor de água precisa aumentar quando o RP substitui a areia natural, devido ao arranjo irregular das partículas nas argamassas. Em função de um arranjo ineficiente das partículas lamelares de louça sanitária e argamassas, observa-se a necessidade do aumento da quantidade de água para a mesma trabalhabilidade, ao substituir a areia pela porcelana (LUCAS *et al.* 2016). A morfologia esférica é preferível para misturas de baixo teor de água devido à maior trabalhabilidade (BERNAL *et al.* 2014a) e areias constituídas de partículas esféricas e arredondadas têm ângulo de atrito menor do que aquelas constituídas de partículas lamelares, que por sua vez proporcionam a perda de fluidez da mistura, provavelmente pela forma dos grãos menos arredondados do que a areia natural (CAMARINI; SOARES, 2018).

Os resultados de consistência obtidos nas argamassas álcali-ativadas com RP são semelhantes aos obtidos por Alves *et al.* (2014) e Lucas *et al.* (2016) que evidenciaram que a substituição da areia por resíduo cerâmico exigiu mais água do que argamassas com areia natural para manter a mesma trabalhabilidade. Pivak *et al.* (2020) prepararam argamassas com aumento gradual de isolador elétrico de porcelana, nas faixas de aumento de 5%, 10% e 15%, e obtiveram resultados entre 140 mm e 175 mm (± 5 mm), indicando resultados similares aos encontrados neste estudo.

Outro fator que explica a redução da trabalhabilidade nas argamassas compostas por RP é a presença do pó de resíduo nas amostras, pois uma estrutura porosa pode levar a uma perda na trabalhabilidade (DUAN *et al.* 2016). Resultado similar foi encontrado por Huseien e Shah (2020) ao verificarem que quando a quantidade de escória de alto forno foi aumentada nas misturas compostas com cinza volante, a plasticidade da mistura e a trabalhabilidade das argamassas foram reduzidas.

Quando combinados AN e RP nas argamassas álcali-ativadas, representadas pelos resultados de AN₇₀PRP₃₀, AN₅₀PRP₅₀, ARP₇₀PRP₃₀, ARP₅₀PRP₅₀, os quais foram 161 mm, 169 mm, 158 mm e 157 mm, respectivamente, evidencia-se menor trabalhabilidade. Nesse sentido, também é possível observar resultados similares quando há a combinação de AN com RP e RP no formato grão com RP pó, evidenciando uma sutil melhora no espalhamento quando há a combinação de AN e PRP. Esses resultados indicam que, para uma mesma trabalhabilidade, dependendo da finalidade de utilização do material, é possível incorporar o RP na mistura seja no formato areia ou pó, reduzindo o consumo de areia natural.

A relação água/materiais secos é um parâmetro que influencia diretamente a trabalhabilidade das argamassas. Apesar de o aumento desta relação garantir maior trabalhabilidade e uma reduzida relação diminuir a trabalhabilidade, esse parâmetro não entra na discussão do presente resultado tendo em vista que essa relação é a mesma para todas as argamassas moldadas.

A partir da tecnologia de moagem da porcelana é possível uma granulometria controlada e semelhante aos agregados convencionais (FRANCK *et al.* 2004), atestando assim a viabilidade de incorporação em argamassas álcali-ativadas.

6.2 - Estado Endurecido

6.2.1 Resistência à Compressão

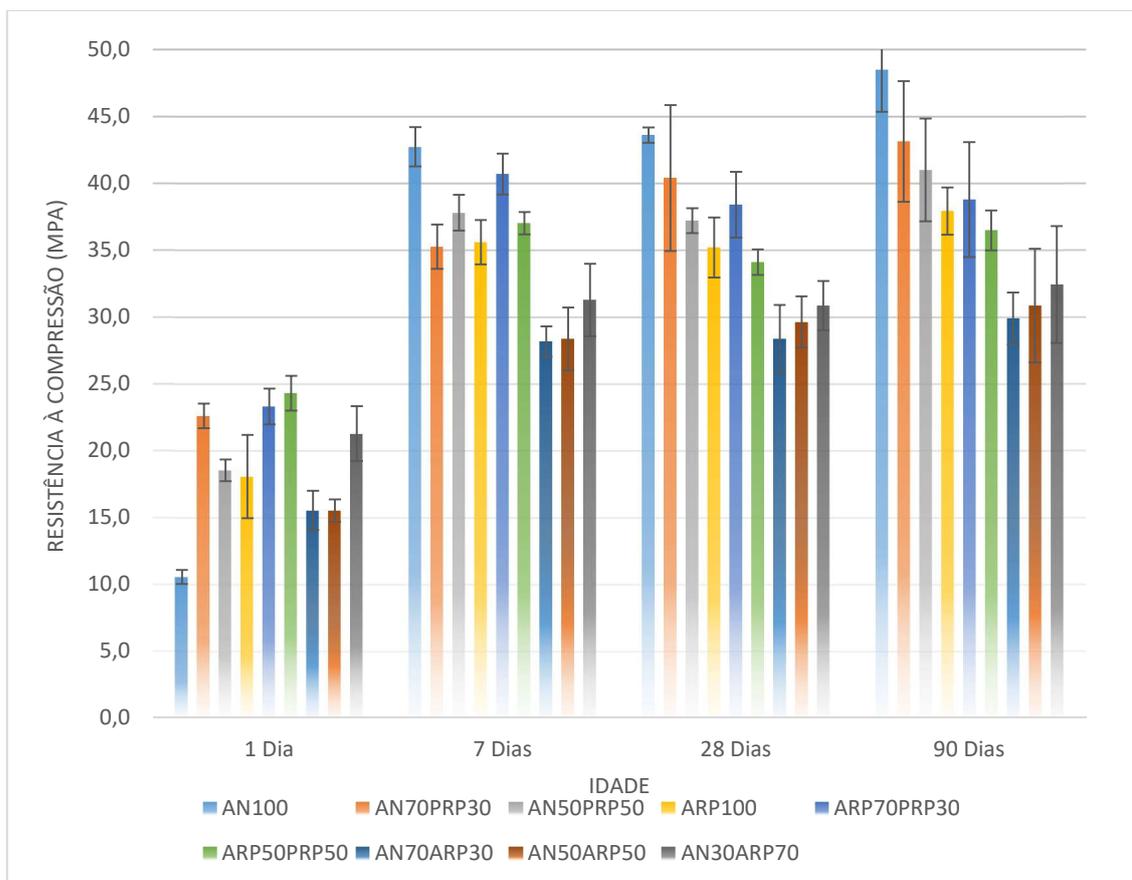
Os resultados de resistência à compressão das nove misturas experimentais, nas idades de 1, 7, 28 e 90 dias, são apresentados na Figura 6.4. Tendo em vista a perspectiva da distribuição do delineamento experimental, no qual se esperava que as misturas apresentassem resultados diferentes, foi aplicada a Análise de Variância para os dados e foi observado que houve diferença entre os tratamentos, pois $F > F$ crítico; valor $P < 0,05$ (Tabela 6.1). Sendo assim, rejeita-se a hipótese de que as médias são estatisticamente iguais.

Tabela 6.1 - Análise de Variância da Resistência à Compressão

F	Valor P	F crítico
21,86538	1,69E-07	2,946685

Fonte: Autor

Figura 6.4 - Resistência à Compressão das Argamassas álcali-ativadas



Fonte: Autor

Os resultados de resistência à compressão mostram que a adição de RP melhora significativamente a resistência à compressão na idade de 1 dia quando comparados com a mistura de referência (AN₁₀₀). Por outro lado, embora os melhores resultados sejam observados aos 90 dias, quanto mais elevado foi o teor de PRP, menor foi o valor de resistência à compressão, observando-se uma diminuição 10% e 14,5%, para as misturas AN₇₀PRP₃₀ e AN₅₀PRP₅₀, respectivamente. Além disso, o tratamento estatístico (Apêndice C) indicou não existir diferença entre os valores de AN₇₀PRP₃₀ e AN₅₀PRP₅₀ aos 90 dias, sendo possível admitir a substituição de AN por PRP para a obtenção de valores similares de resistência à compressão. Corrobora com tal informação, os menores valores de resistência das argamassas compostas por AN e ARP (AN₇₀ARP₃₀, AN₅₀ARP₅₀ e AN₃₀ARP₇₀).

Resultados semelhantes são identificados para argamassas compostas por AN e ARP para 7, 28 e 90 dias. Todas as misturas, nas três idades, atingiram valores em torno de 30 MPa, indicando que, para uma mesma resistência à compressão, é possível utilizar uma maior quantidade de ARP, substituindo parcialmente a AN com menor período de cura.

Evidencia-se que a presença de ARP diminui a resistência à compressão das argamassas e quando adicionado o PRP nota-se uma melhora nos resultados. Aos 7 dias o valor referente à resistência à compressão de ARP₁₀₀ foi de 45,6 MPa, enquanto para ARP₇₀PRP₃₀ o valor foi de 40,7 MPa, representando um ganho de 11%, sendo estatisticamente o mesmo valor de AN₁₀₀. Aos 90 dias, o valor mais elevado de resistência das misturas com ARP também foi obtido com a mistura ARP₇₀PRP₃₀, atingindo valores de 38,8 MPa.

Torna-se interessante mencionar que, exceto em AN₇₀PRP₃₀, todas as amostras contendo PRP (AN₅₀PRP₅₀, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀) apresentaram valores semelhantes estatisticamente aos 7 e 90 dias, indicando que o RP não apresenta ganho de resistência ao longo do tempo de cura ou que o período de observação não foi ainda suficiente para detectar tal variação.

Admite-se assim que os valores de resistência à compressão são aceitáveis do ponto de vista científico, já que a resistência à compressão de um concreto preparado com RP como agregado miúdo atingiu 30 MPa, sendo compatível com um concreto convencional, que por sua vez atingiu 31 MPa sobre as mesmas condições de preparo e cura (BINICI, 2007).

No trabalho de Senthamarai, Manoharan e Gobinath (2011), o RP foi usado como agregado graúdo na produção de um concreto que atingiu os critérios mínimos estabelecidos pelas normas padronizadas em termos de índice de vazios, absorção de água e ataque por cloretos.

A possibilidade de utilizar RP em aglomerante álcali-ativado foi investigada por Reig *et al.* (2013), e as argamassas produzidas atingiram resistência à compressão na faixa de 30 MPa aos 7 dias com cura a 65 °C.

He *et al.* (2013) combinaram SCA com um subproduto da produção de bauxita para desenvolver um material álcali-ativado obtendo resistência à compressão de 20,5 MPa aos 45 dias de cura ambiente.

A produção do mesmo material composto por lodo de ETA e SCA, com cura em temperatura ambiente, também foi analisado por Waijarean *et al.* (2014), obtendo resistência à compressão de 18,74 MPa aos 60 dias.

Um aglomerante álcali-ativado composto por MK e SCA atingiu valores de resistência à compressão entre 27 e 36 MPa (MEJÍA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MONTES, 2016).

Nimwinya *et al.* (2016) produziram um aglomerante álcali-ativado com lodo de ETA calcinado e SCA e observaram que a resistência à compressão máxima encontrada foi na relação molar de 4,9 com cura em temperatura ambiente, atingindo o valor de 16 MPa.

A possibilidade de empregar o lodo de ETA como substituto parcial ao MK, utilizando um ativador alcalino alternativo contendo SCA em argamassas álcali-ativadas, se mostrou viável na condição de substituição de 15%, com resistência à compressão aos 90 dias de 36 MPa (GERALDO; FERNANDES; CAMARINI, 2017).

Apesar das variações dos traços e materiais dos estudos apresentados, observam-se bons valores de resistência à compressão das argamassas produzidas no presente estudo. Além disso, os resultados encontrados pela presente pesquisa merecem destaque por se tratar de uma argamassa produzida com material alternativo ao cimento Portland. Os valores de resistência à compressão das misturas compostas por AN e/ou RP atingiram o valor mínimo de 8 MPa, na idade de 28 dias, valor esse recomendado pela NBR 13.281 (ABNT, 2005) que estabelece parâmetros para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. O material também atende aos requisitos de resistência à compressão para aplicação como argamassas de reparo, cujas condições são os valores mínimos de 15 MPa e 35 MPa de resistência à compressão para 1 dia e 7 dias de cura, respectivamente, conforme estipulado por fabricantes.

6.2.2 Resistência à Tração na Flexão

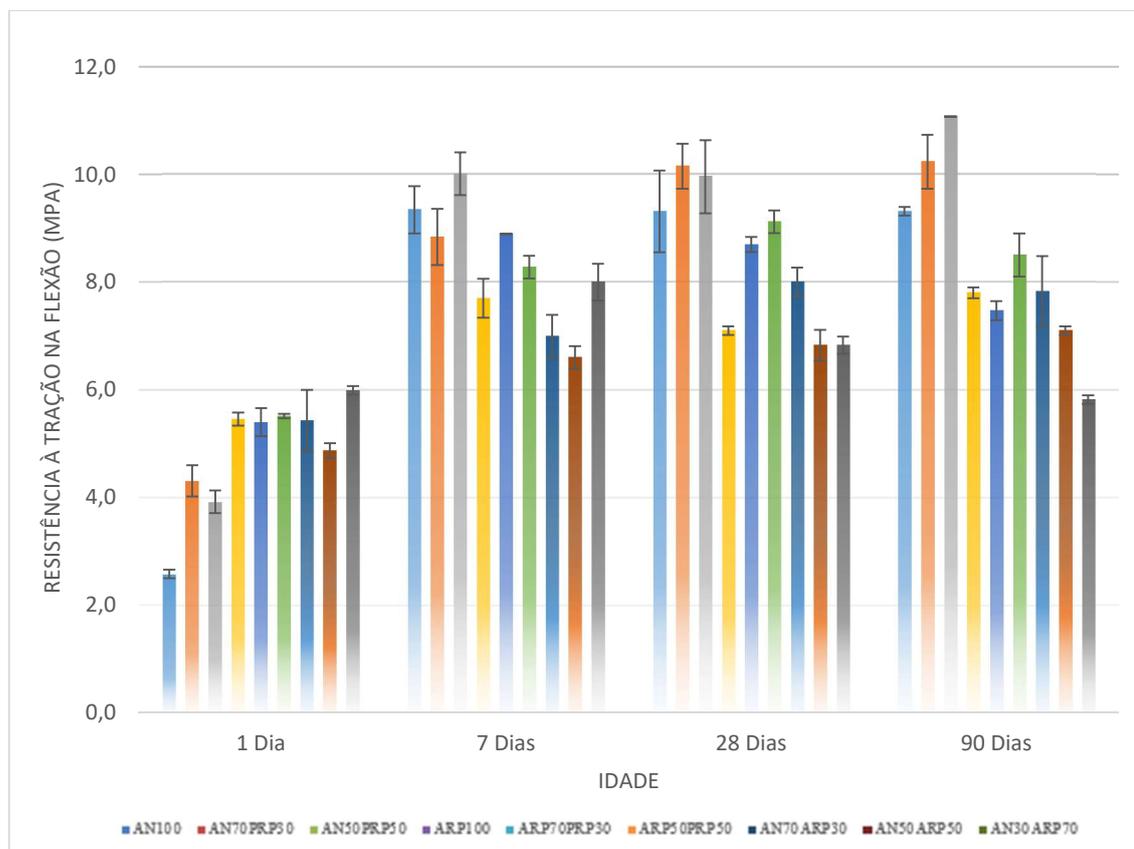
Os resultados de resistência à tração na flexão das diferentes misturas experimentais, nas idades de 1, 7, 28 e 90 dias, são apresentados na Figura 6.5. Tendo em vista a perspectiva da distribuição do delineamento experimental, em que se esperava que as misturas apresentassem resultados diferentes, foi aplicada a Análise de Variância para os dados e foi observado que houve diferença entre os tratamentos, pois $F > F$ crítico; valor $P < 0,05$ (Tabela 6.2). Sendo assim, rejeita-se a hipótese que as médias são estatisticamente iguais.

Tabela 6.2 - Análise de Variância da Resistência à Tração na Flexão

F	Valor-P	F crítico
7,952263	0,000546	2,946685

Fonte: Autor

Figura 6.5 - Resistência à Tração na Flexão das Argamassas álcali-ativadas



Fonte: Autor

Os valores de resistência à tração na flexão das argamassas álcali-ativadas apresentaram crescimento em função da idade, merecendo destaque a aplicação do PRP em misturas cujo agregado miúdo é a areia natural (AN₇₀PRP₃₀ e AN₅₀PRP₅₀). Em todas as idades observam-se melhores resultados dessas argamassas, merecendo destaque para AN₅₀PRP₅₀ cujo ganho foi de 7,5% e 20% para 28 e 90 dias, respectivamente. O tratamento estatístico (Apêndice C) indica que não existe diferença entre os resultados referentes aos 28 e 90 dias para a mistura AN₇₀PRP₃₀, evidenciando a possibilidade de obter um material resistente em um menor tempo, porém com o mesmo desempenho em flexão. Esses dados permitem concluir que a adição do PRP promove um ganho de resistência em flexão, permitindo, portanto, reduzir a quantidade de areia nas misturas.

A utilização de ARP como agregado miúdo (ARP₁₀₀) não melhorou a resistência à tração na flexão nas idades mais avançadas. O melhor resultado foi obtido aos 7 dias, sendo que para as idades de 28 e 90 dias, os valores são estatisticamente iguais aos da idade de 1 dia. Porém, quando foi adicionado o PRP (ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀), houve um ganho de resistência à tração na flexão em todas as idades, destacando o desempenho da mistura

ARP₅₀PRP₅₀ aos 28 dias, cuja evolução de resistência à tração na flexão foi de 78,4%. Novamente nota-se a melhora no desempenho da resistência à tração na flexão das argamassas com PRP substituindo parcialmente o agregado miúdo.

Melhores desempenhos são observados quando o PRP é adicionado às misturas, merecendo destaque aquelas combinadas com AN.

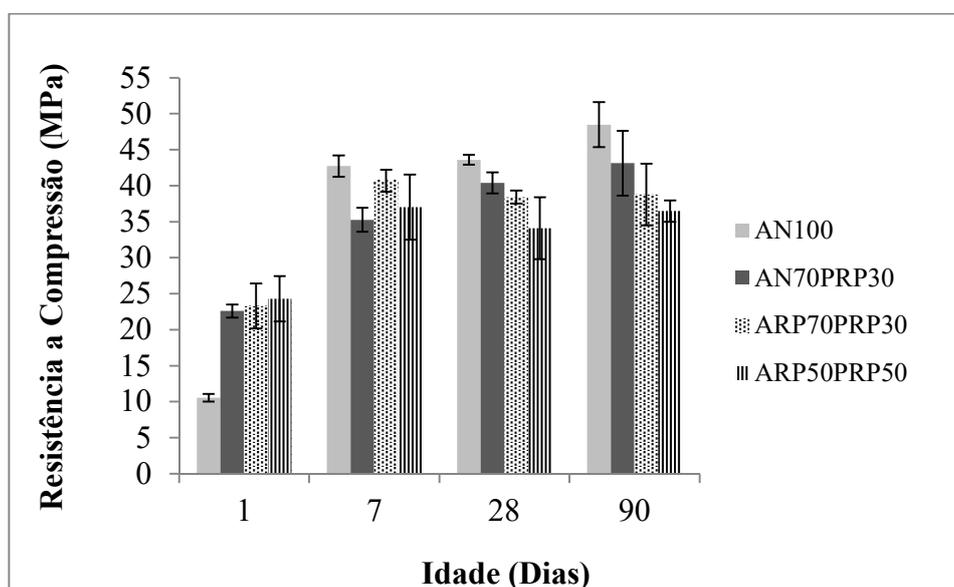
A partir dos resultados obtidos na Etapa A, anteriormente descrita, foram escolhidas 4 argamassas (AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀) para o prosseguimento da pesquisa. A partir de então, estas misturas foram avaliadas em termos de: propriedades no estado endurecido (resistência à compressão e resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e aderência em substrato existente); durabilidade (absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao ar, absorção total de água e índice de vazios, eflorescência, ataque por clores e sulfatos), além da análise microestrutural (MEV).

Os resultados e as suas respectivas discussões doravante apresentadas são partes integrantes da Etapa B, pertencente a Terceira Fase do delineamento experimental.

6.3 - Resistência à Compressão e Flexão das argamassas

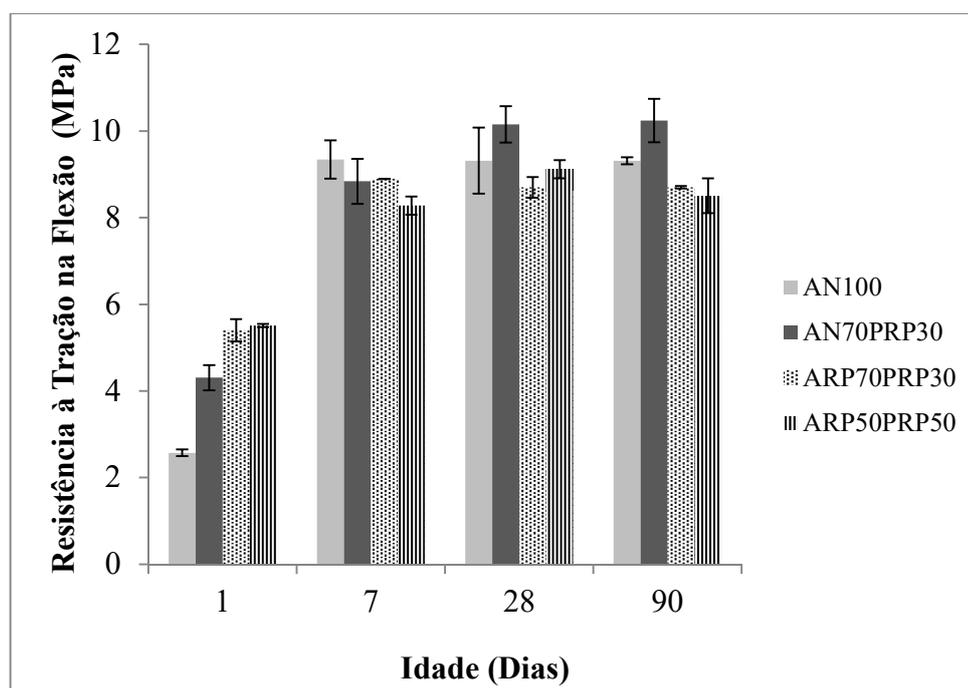
As Figuras 6.6 e 6.7 e as Tabelas 6.3 e 6.4 mostram os resultados do teste de análise de variância (ANOVA) e Scott-Knott, respectivamente, apresentam os dados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão das 4 argamassas escolhidas para a sequência da pesquisa.

Figura 6.6 - Resistência à Compressão das argamassas álcali-ativadas



Fonte: Autor

Figura 6.7 - Resistência à Tração na Flexão das argamassas álcali-ativadas



Fonte: Autor

Tabela 6.3 - ANOVA para os testes de compressão e flexão

ANOVA para os testes de compressão e flexão			
Grupo testado	<i>F</i>	Valor-P	<i>F crit</i>
Resistência à Compressão	16,2686	0,000158	3,490295
Resistência à tração na Flexão	28,5318	9,58E-06	3,490295

Fonte: Autor

Tabela 6.4 - Teste estatístico de Scott-Knott com 5% de significância

Argamassas	Idade (Dias)			
	1	7	28	90
Resistência à compressão				
AN ₁₀₀	10,6 A a	42,7 A b	43,6 A b	48,5 A c
AN ₇₀ PRP ₃₀	22,6 B a	35,2 B b	40,4 B c	43,1 B c
ARP ₇₀ PRP ₃₀	23,3 B a	40,7 A b	38,4 C b	38,8 C b
ARP ₅₀ PRP ₅₀	24,3 B a	37,0 B b	34,1 D b	36,5 C b
Resistência à tração na Flexão				
AN ₁₀₀	2,6 A a	9,3 A b	9,3 A b	9,3 A b
AN ₇₀ PRP ₃₀	4,3 B a	8,8 A b	10,2 B c	10,2 B c
ARP ₇₀ PRP ₃₀	5,4 C a	8,9 A b	8,7 A b	7,4 C b
ARP ₅₀ PRP ₅₀	5,5 C a	8,3 A b	9,1 A b	8,5 C b

Dados das linhas: letras minúsculas iguais indicam não haver diferença estatística (evolução da resistência ao longo do tempo de cura).

Dados das colunas: letras maiúsculas iguais indicam não haver diferença estatística (valores de resistência entre os grupos).

Fonte: Autor

O teste de ANOVA indica que existe uma diferença significativa entre os conjuntos de dados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão (valor $p \leq 0,05$ e $F > F_{crit}$). O teste de Scott- Knott foi então aplicado para comparar as médias dos grupos. Os dados do teste de Scott-Knott são os valores médios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão obtidos a partir de corpos de prova em diferentes idades e os resultados do referido teste significam que letra igual em caixa em linha indica resultados semelhantes (resistência à compressão e flexão ao longo do tempo), e a mesma letra maiúscula na coluna indica resultados similares.

A resistência à compressão aumentou ao longo do tempo para todas as argamassas álcali-ativadas estudadas, com valores variando de 10,6 MPa a 48,5 MPa para a argamassa AN₁₀₀ e 22,6 MPa até 43,1 MPa para as outras misturas com RP. As argamassas com RP apresentaram maior resistência a compressão do que a amostra referência quando a análise se dá a 1 dia de cura em função dos teores de sílica disponíveis. Aos 28 e 90 dias, a resistência a compressão das argamassas com RP foi menor do que a argamassa referência.

Para efeitos de comparação, Reig *et al.* (2017) apresentaram resultados de uma argamassa álcali-ativada composta exclusivamente por RP como agregado, curada a uma temperatura de 65 °C, por 3 dias, que alcançou resistência à compressão de 18 MPa, enquanto no presente estudo, a argamassa ARP₅₀PRP₅₀ atingiu 24,3 MPa a 1 dia e curada em temperatura ambiente.

Utilizando uma argamassa análoga, porém composta por AN, Teixeira *et al.* (2019) obtiveram resultados de resistência a compressão de 12 MPa e 41, 6 MPa a 1 e 7 dias, respectivamente. Esses resultados são similares àqueles alcançados pela argamassa AN₁₀₀ com um considerável aumento de resistência de 1 para 7 dias, variando de 10,6 MPa para 42, 7 MPa.

Geraldo *et al.* (2017) também estudaram uma argamassa álcali-ativada similar, e evidenciaram que a resistência a compressão não apresentou um significativo aumento de resistência de 1 para 7 dias (na faixa de 20 MPa). Esses resultados sugerem um efeito positivo do tempo de repouso de 48 h da solução alcalina alternativa, tendo em vista que foi a única diferença entre os procedimentos de produção da argamassa álcali-ativada. É bastante difundido e conhecido que a relação SiO₂/Al₂O₃ influencia na resistência à compressão (SILVA *et al.*, 2007; NIMWINYA *et al.*, 2016), assim, o aumento de resistência observado nas idades iniciais pode estar relacionado a um maior grau de sílica dissolvida. De acordo com Pontes, Camarini e Geraldo (2016), a quantidade de sílica dissolvida pode aumentar, na faixa de 30%, com o

período de repouso de 48 horas, quando comparados os resultados do mesmo material sem o período de repouso.

Milhomem, Silva e Costa (2017) observaram um aumento na resistência à compressão do concreto com a substituição da areia natural por RP. Os resultados de Campos *et al.* (2020) mostraram um aumento na resistência à compressão do concreto contendo RP ao longo do tempo devido à reação pozolânica do material. No presente estudo, observou-se que os corpos-de-prova contendo RP desenvolveram maior resistência mecânica com 1 dia, mas a argamassa AN₁₀₀ ganhou resistência com a idade.

ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ não apresentaram significantes ganhos na resistência mecânica analisando os dados dos 7 aos 90 dias. Os dados indicaram que o RP atua somente como filler/agregado nas misturas. Ainda nesse sentido, cabe mencionar que o RP não apresenta reação pozolânica, pois as misturas são compostas por baixo teor de cálcio, que por sua vez é elemento necessário para a ocorrência da reação pozolânica.

Huseien *et al.* (2019) observaram que com altos teores de agregados (resíduo cerâmico), não houve ganho de resistência considerável de 7 a 28 dias, o que está relacionado à zona de interface mais fraca. No Brasil, a NBR 13.281 estabelece parâmetros para assentamento e revestimento de argamassas em paredes e tetos, orientando valores superiores a 8 MPa em 28 dias.

Os resultados da resistência à tração na flexão situaram-se entre 2,6 MPa e 10,2 MPa. Após 7 dias, AN₁₀₀, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ não mostraram um aumento significativo na resistência à tração na flexão. Os resultados indicam bom desempenho mecânico das argamassas álcali-ativadas contendo RP. A resistência à compressão de uma argamassa álcali-ativada composta por silicato de sódio comercial como ativador alcalino e RP como agregado alcançou 49,9 MPa quando curado a temperatura ambiente (ZUDA *et al.*, 2008). No presente estudo, utilizando silicato de sódio alternativo, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ apresentaram 38,4 MPa e 34,1 MPa, respectivamente, aos 28 dias.

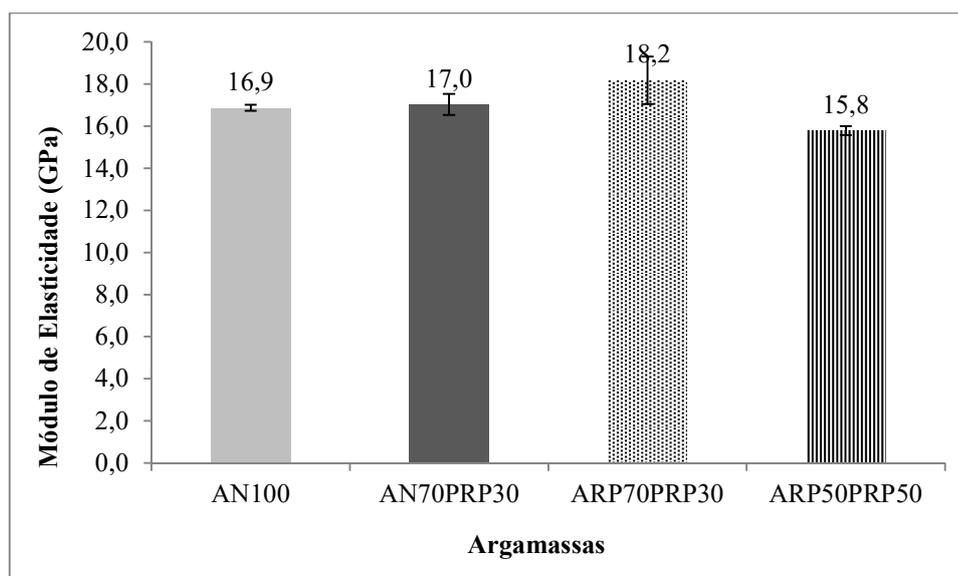
6.4 - Módulo de Elasticidade

A Figura 6.8 representa os valores médios do módulo de elasticidade das argamassas álcali-ativadas submetidas ao ensaio aos 28 dias.

Os valores do módulo de elasticidade das amostras variaram de 15,8 GPa a 18,2 GPa. Comparando os resultados de AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀ e ARP₇₀PRP₃₀, a adição de RP não

afetou o módulo de elasticidade das argamassas. A mistura ARP₇₀PRP₃₀ apresentou o maior módulo de elasticidade, que foi um pouco maior que AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀. No trabalho de Anderson, Smith e Au (2016), a adição de RP em substituição ao agregado graúdo natural promoveu uma mínima influência no módulo de elasticidade.

Figura 6.8 - Módulo de Elasticidade



Fonte: Autor

Um aumento de 7%, foi observado quando comparados os valores das argamassas ARP₅₀PRP₅₀ e ARP₇₀PRP₃₀ respectivamente. O maior valor observado no módulo de elasticidade se dá em função da maior proporção de partículas mais angulares utilizadas como agregados em ARP₇₀PRP₃₀ (TEMUJIN; VAN RIESEN; MACKENZIE, 2010).

Na argamassa ARP₅₀PRP₅₀ a substituição de resíduo de porcelana em pó, pelo RP grão, diminuiu o módulo de elasticidade, atingindo o valor de 15,8 GPa. O trabalho de Pivak *et al.* (2020) também encontrou uma variação nos resultados do módulo de elasticidade para os materiais compostos com resíduo de porcelana como agregados. Neste estudo, os autores identificaram que o maior valor foi de 42,5 GPa ($\pm 1,0$) para uma argamassa composta com 10% a mais de RP em relação a argamassa referência, sem RP. Nas argamassas com 15% de adição de RP, o valor do módulo de elasticidade foi de 41,3 GPa $\pm (1,0)$, indicando também que o aumento do conteúdo de porcelana em pó tende a diminuir o módulo de elasticidade.

Nunes, Borges e Zanotti (2019) identificaram valores entre 15 GPa e 18 GPa para o módulo de elasticidade de argamassas álcali ativadas preparadas com metacaulim e escória de alto forno. Resultados semelhantes para o módulo de elasticidade de argamassas álcali-

ativadas também são encontrados (NEĆMECĚK; ŠMILAUER; KOPECKY', 2011; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

O tipo, o arranjo e o conteúdo de agregado influenciam o módulo de elasticidade dos materiais. Concretos produzidos com partículas irregulares de agregados tendem a apresentar um maior módulo de elasticidade (ROCCO; ELICES, 2009). Alguns autores consideram que os agregados, devido ao seu tipo e formato, é o fator mais importante na determinação do módulo de elasticidade (ZHOU; LYDON; BARR, 1995; RASHID; MANSUR; PARAMASIVAM, 2002). Joseph e Mathew (2012) obtiveram um concreto álcali ativado com um módulo de elasticidade 14,4% maior que um concreto convencional devido ao teor ideal de agregado inserido na mistura. O módulo de elasticidade de um concreto convencional composto por resíduo cerâmico como agregado graúdo variou de 16,1 GPa a 22,2 GPa aos 28 dias (SENTHAMARAI; MANOHARAN, 2005).

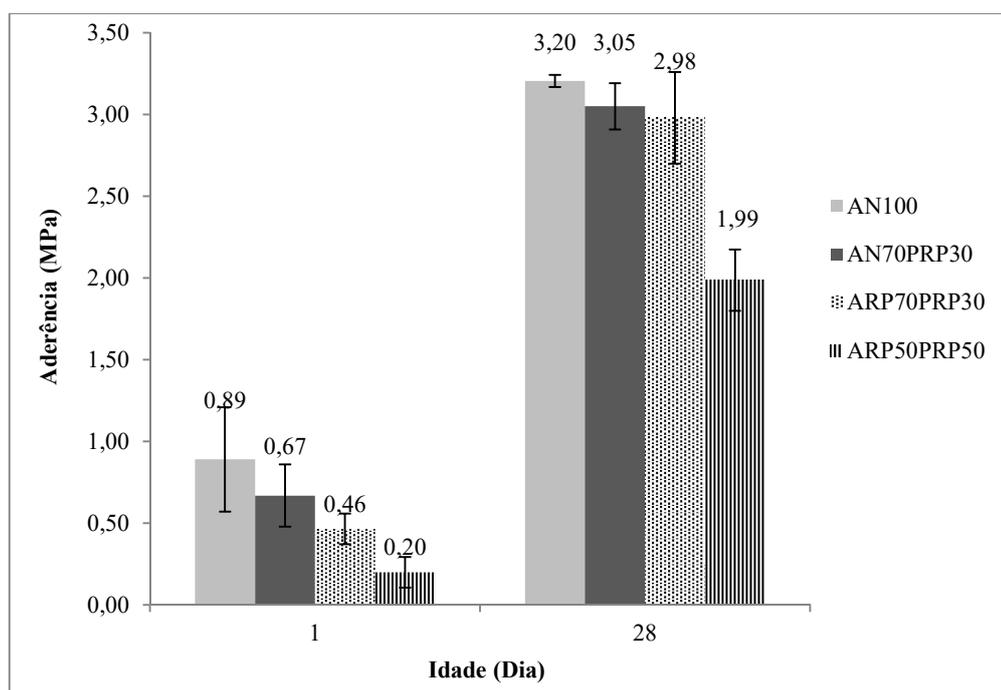
Sendo assim, apesar de que, no presente estudo o valor do módulo de elasticidade da argamassa álcali-ativada compostas por ARP ter sido maior do que os demais, o resultado de 18,2 GPa está de acordo com os resultados de concretos e argamassas encontrados na literatura relacionada ao assunto.

6.5 – Aderência em substrato existente

A capacidade de aderência ao substrato é uma das principais características das argamassas. A Figura 6.9 mostra o resultado do ensaio de aderência pelo *Triplet Test* das argamassas álcali-ativadas. Os resultados de aderência foram avaliados a 1 e 28 dias de idade, atingindo valores de 0,20 MPa 0,89 MPa e 1,99 MPa a 3,20 MPa respectivamente.

Conforme esperado, os valores da aderência aumentaram de acordo com a idade, tendo em vista o aumento da resistência a compressão ao longo do tempo. Considerando o desvio padrão, as amostras AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀ e ARP₇₀PRP₃₀ apresentaram praticamente o mesmo desempenho. A mistura ARP₅₀PRP₅₀ apresentou uma aderência 37,8% menor do que a argamassa referência, por possuir uma zona interfacial mais fraca e maior permeabilidade do ar e vazios, que também ocasionaram menor resistência a compressão. Shah e Huseien (2020) também observaram que uma argamassa álcali-ativada com menor resistência a compressão e elevada porosidade desenvolveram menor aderência.

Figura 6.9 - Resultados do ensaio de aderência das argamassas



Fonte: Autor

Aos 28 dias, diante da metodologia utilizada, todas as argamassas atingiram o valor mínimo indicado para argamassas de revestimento, cuja normatização da Associação Brasileira de Normas técnicas, NBR 13.749 indica ser superior a 0,3 MPa (ABNT, 2013).

A partir dos resultados de aderência em substrato existente, a utilização de resíduo de porcelana, seja no formato grão e/ou pó, diminui a aderência da argamassa e esse desempenho é mantido ao longo do tempo. Em uma argamassa álcali-ativada, contendo RP, o trabalho de Zuda *et al.* (2008) encontrou o valor de 3,7 MPa, um valor 0,8 MPa maior do que aquele atingido por ARP₇₀PRP₃₀.

Teixeira *et al.* (2019) demonstraram que a aderência em substrato existente de um argamassa álcali-ativada produzida com composição similar a AN₁₀₀ apresentou valores maiores do que argamassas poliméricas comerciais, normalmente usadas para reparar concretos deteriorados.

Com base no trabalho referência de Springkel e Ozyildirim (2000), também utilizado por Alanazi *et al.* (2016), os resultados do ensaio de aderência podem ser classificados com base na qualidade da resistência definida na Tabela 6.5.

Tabela 6.5. Conceitos Qualitativos de Aderência

Aderência (MPa)	Conceito
$\geq 2,1$	Excelente
1,7 a 2,1	Muito bom
1,4 a 1,7	Bom
0,7 a 1,4	Razoável
0 a 0,7	Ruim

Fonte: Springkel e Ozyildirim (2000)

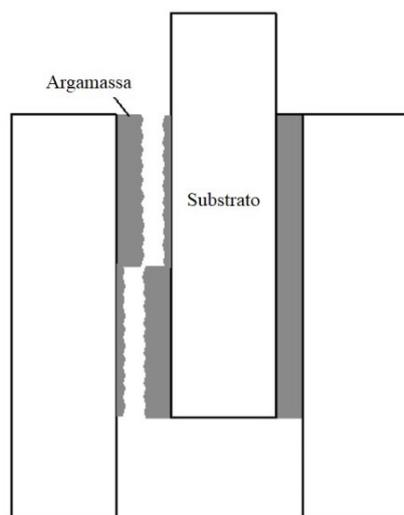
Considerando esta classificação, as argamassas AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀ e ARP₇₀PRP₃₀ apresentaram um excelente desempenho, uma vez que os resultados foram superiores a 2,1 MPa. ARP₅₀PRP₅₀ apresentou um desempenho muito bom, pois os resultados são iguais a 1,99 MPa, estando muito próximo do limite inferior ao conceito excelente.

As diferenças entre os valores de aderência são devidas à composição da argamassa. É importante notar que a ligação argamassa-substrato não é controlada apenas pelo substrato, mas também pela composição da argamassa. Os fatores que interferem na aderência estão relacionados aos materiais que compõem a argamassa, a proporção da mistura utilizada e a distribuição dos grãos (IOPPI; PRUDÊNCIO; IRIYAMA, 1995). Além disso, a aderência é fortemente influenciada pelas características superficiais do substrato, pelo tipo e quantidade de materiais, pela espessura do revestimento, dentre outras características. Neste caso, as superfícies eram únicas: concreto escarificado.

Analisando o tipo de ruptura nas argamassas, apresentado nas Figuras 6.10a e 6.10b, a ruptura indica uma aceitável aderência em substrato, conforme ALECCI *et al.* (2013), que orienta que este tipo de ruptura (na argamassa) indica uma aceitável resistência de aderência para as argamassas. De acordo com Alanazi *et al.* (2016), quando a ruptura começa no substrato de argamassa, tem-se uma excelente interface.

Por outro lado, nas Figuras 6.10c são mostradas as rupturas da argamassa AN₁₀₀, aos 28 dias, que ocorreram no substrato.

Figura 6.10 - Rupturas das argamassas álcali-ativadas após ensaio de aderência



a) Ruptura ideal (ALECCI *et al.*, 2013)



b) Tipo de ruptura das argamassas



c) Ruptura no substrato em AN₁₀₀

Fonte: Autor

Conforme apresentado no capítulo 5, o ensaio Triplet Test foi adotado para determinar a resistência de aderência desenvolvida durante o cisalhamento. O Triplet Test é um ensaio de aderência sendo o modo de ruptura por cisalhamento. Não se trata de um ensaio de tração direta, pois a tensão principal está no sentido longitudinal (paralelo) em relação a área de atuação da força, sendo o esforço cortante predominante na estrutura. Dessa forma, é possível observar que a amostra rompida, apresenta a ruptura no cisalhamento, corroborando com o trabalho de Phoo-ngernkham *et al.* (2015).

Os resultados de aderência vão ao encontro do que foi estudado por Kramar, Sajna e Ducman (2016) ao definir que aglomerantes álcali-ativados têm potencial para serem usados como material de reparo. No referido estudo as argamassas obtiveram boas aderência aos 28

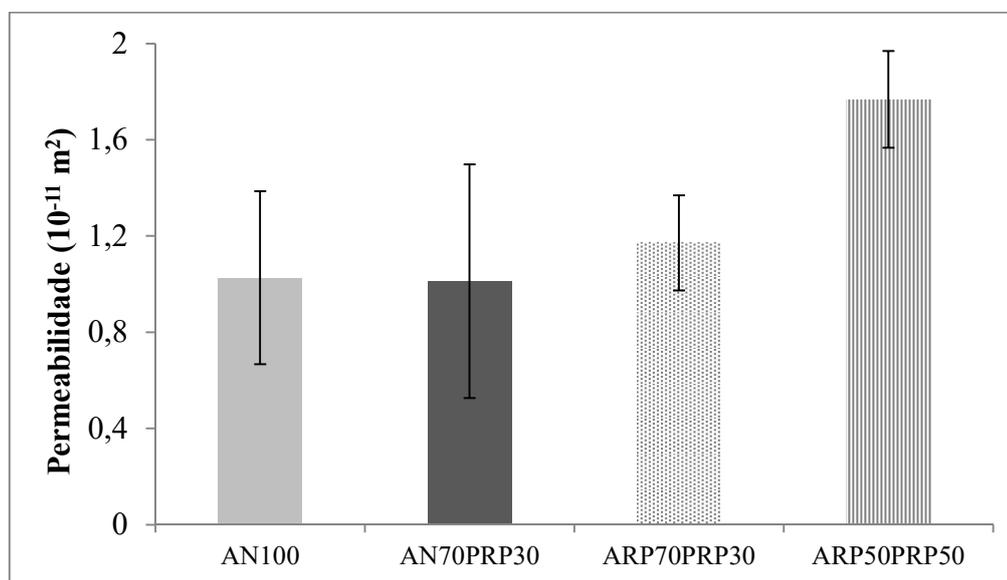
dias, além de apresentar boa resistência mecânica, porém problemas como alta absorção capilar e eflorescência foram observados.

O uso de RP como agregado promoveu uma boa aderência entre a argamassa e o substrato de concreto. Pode-se considerar que as argamassas ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ mostraram boa aderência, principalmente pelo fato de as mesmas serem constituídas somente por agregados reciclados. Similarmente, o trabalho de Kou e Poon (2013) informa que a aderência entre a argamassa e o substrato foi maior quando as argamassas foram preparadas com agregados reciclados. No referido estudo, o resultado indicado pelo *Triplet Test* mostrou um aumento de 3 vezes, aos 28 dias, nas argamassas contendo agregados reciclados (concreto, tijolos, telhas etc.). Para os autores, o ganho de aderência foi devido a um maior intertravamento físico entre a argamassa e o substrato, já que esse tipo de agregado facilita a penetração da argamassa no substrato.

6.6 - Permeabilidade ao ar

Os resultados da permeabilidade ao ar das argamassas álcali-ativadas, aos 28 dias de idade são apresentados na Figura 6.11.

Figura 6.11 - Permeabilidade ao ar das argamassas



Fonte: Autor

A permeabilidade é uma maneira eficiente de avaliar a durabilidade dos materiais tendo em vista que elementos prejudiciais, como cloretos e sulfatos, podem causar efeitos

negativos que podem comprometer a microestrutura do material e a diminuição da sua vida útil (PEREIRA; CAMARINI, 2011)

A quantidade do RP influencia diretamente na permeabilidade ao ar das argamassas. Quando comparadas com a amostra preparada com areia natural, as argamassas AN₇₀PRP₃₀ e ARP₇₀PRP₃₀, do ponto de vista estatístico, não apresentaram resultados diferentes. Isso pode ser um indicativo de que a quantidade de resíduo de porcelana em pó, na fração de 30%, garante o mesmo desempenho, independente do agregado miúdo, seja areia natural ou resíduo de porcelana. Por outro lado, quando há a combinação de 50% de pó de porcelana com areia de porcelana (ARP₅₀PRP₅₀) o resultado de permeabilidade aumenta significativamente.

Nas argamassas AN₁₀₀ e AN₇₀PRP₃₀, os valores de permeabilidade ao ar foram $1,026 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ e $1,011 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ respectivamente, revelando pouca influência do PRP quando o agregado utilizado é a areia natural. Por outro lado, ao se comparar os valores da argamassa com a maior quantidade de PRP (ARP₅₀PRP₅₀ - $1,76 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$) com a argamassa referência (AN₁₀₀), observa-se um aumento de 72% da permeabilidade ao ar.

Isso se deve ao fato de a consistência das argamassas produzidas com RP ser maior do que aquelas preparadas com AN, resultando em maior aprisionamento de ar nas misturas. Resultado semelhante foi identificado por Geraldo *et al.* (2017), ao concluírem que a presença de lodo de estação de tratamento de água e sílica da casca do arroz, em aglomerante álcali-ativado, tornou as argamassas mais consistentes e difíceis de misturar e moldar, e por isso, o ar permaneceu aprisionado nas argamassas.

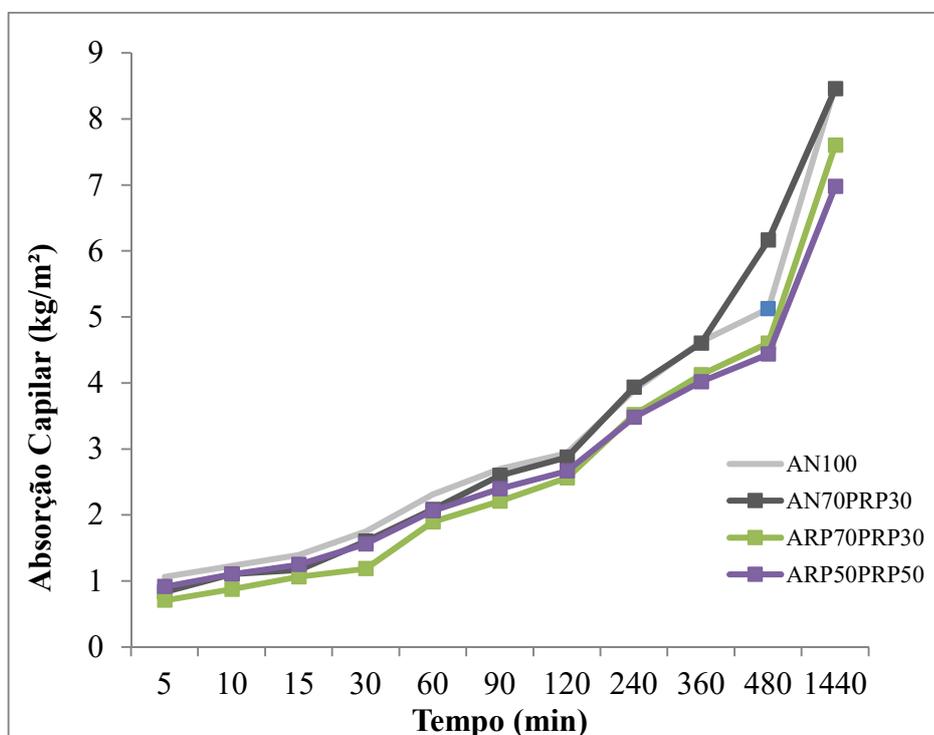
6.7 - Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade das argamassas álcali-ativadas, dada em função do tempo de imersão parcial em água, é mostrada na Figura 6.12.

A argamassa AN₁₀₀ apresentou o maior valor de absorção de água por capilaridade após 24 horas de ensaio ($8,5 \text{ kg/m}^2$), enquanto as argamassas AN₇₀PRP₃₀, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ atingiram $8,5 \text{ kg/m}^2$, $7,6 \text{ kg/m}^2$ e $7,0 \text{ kg/m}^2$, respectivamente. Os resultados indicam que a presença do RP diminui a absorção capilar. Os resultados também demonstram que o aumento no conteúdo de RP tende a diminuir absorção de água por capilaridade. Resultados semelhantes foram encontrados por Campos (2009) que verificou que ao final de 24 horas de ensaio, a quantidade de água absorvida nas argamassas, foram menores à medida que a quantidade de areia natural era substituída por RP como agregado. Estas quedas nas

quantidades de água absorvida em comparação ao traço referência, foram de cerca de 19%, para a mistura cuja proporção de substituição foi de 50%.

Figura 6.12. Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor

Geraldo *et al.* (2017) orientam que poros menores e mais conectados desenvolvem maior efeito na capilaridade, sendo assim, analisando as argamassas compostas por RP no presente estudo, pode-se afirmar que as mesmas apresentam poros maiores e não conectados, prejudicando o efeito da capilaridade, pois nas misturas ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ foram observadas menores absorções capilares após as 24 horas de ensaio. Silva *et al.* (2010) e Lintz *et al.* (2008) afirmaram que o aumento na substituição de areia natural por agregado artificial resultou em uma menor absorção de água por capilaridade, que é devido as mudanças na rede interna de poros. Ao promover a substituição de cinza volante por escória de alto forno, o trabalho de Huseien *et al.* (2019) encontrou valores entre 7,3 % e 10,1% para argamassas curadas aos 28 dias. Os autores concluem que a absorção de água foi influenciada pela estrutura dos poros das amostras.

A partir das curvas representativas da variação da quantidade de água absorvida por unidade de tempo, foi possível obter as retas de ajustamento às curvas (Figura 6.13) para

determinar o coeficiente de correlação e o declive de cada uma das retas, identificando assim, o coeficiente de absorção capilar (kg/m^2), apresentados na Tabela 6.6.

Os coeficientes de capilaridade das argamassas AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ foram 0,6125, 0,6741, 0,5811, e 0,5127 kg/m^2 , respectivamente. ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ têm os menores coeficiente de capilaridade, indicando que o aumento do conteúdo de RP provoca a diminuição na absorção da argamassa. O coeficiente de correlação das argamassas ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ foram 84%, 87%, 85%, 87%, respectivamente.

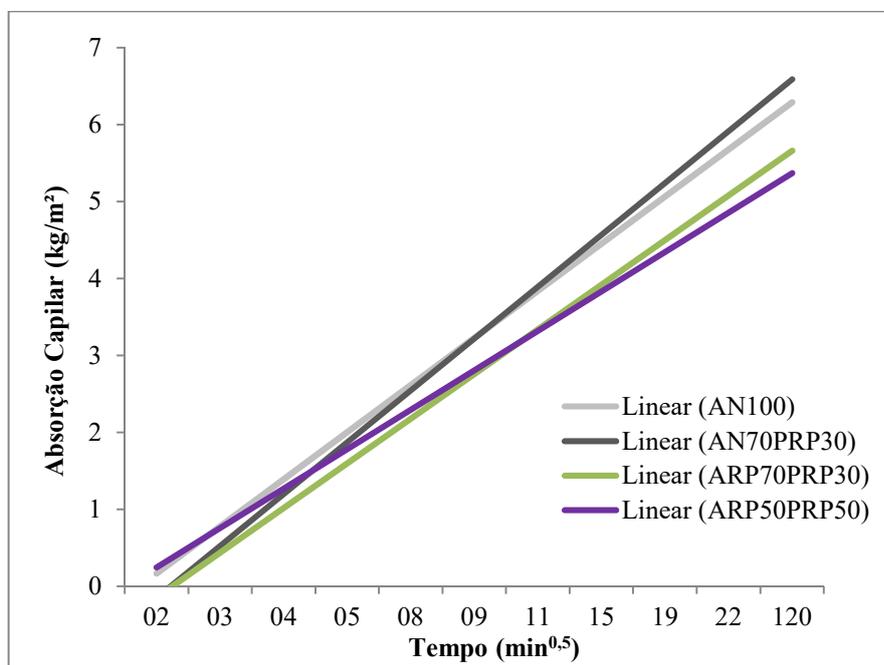
Tabela 6.6. Equação da Reta, Coeficientes de Correlação e Capilaridade

Argamassa	Equação da Reta	Coeficiente de Correlação (R^2)	Coeficiente de Capilaridade (kg/m^2)
AN ₁₀₀	$ac = 0,6125t - 0,4447$	84%	0,6125
AN ₇₀ PRP ₃₀	$ac = 0,6741t - 0,8231$	87%	0,6741
ARP ₇₀ PRP ₃₀	$ac = 0,5811t - 0,7267$	85%	0,5811
ARP ₅₀ PRP ₅₀	$ac = 0,5127t - 0,2689$	87%	0,5127

ac: absorção capilar (kg/m^2) e tempo (min)

Fonte: Autor

Figura 6.13 – Coeficiente de Capilaridade

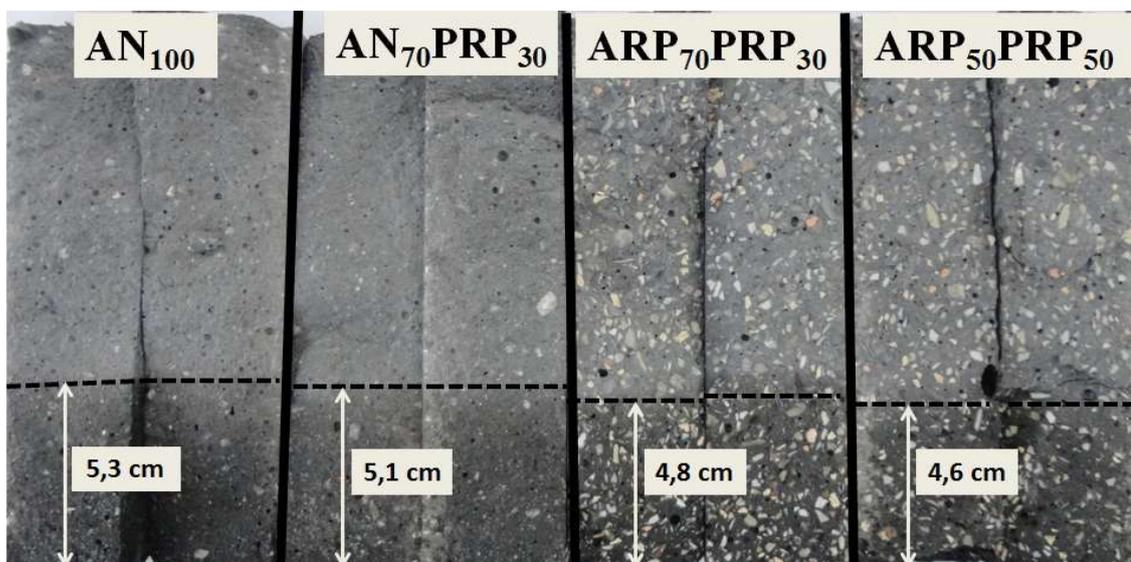


Fonte: Autor

Os coeficientes de correlação para as quatro argamassas são elevados, identificando uma boa correlação entre os dados, revelando, portanto, uma boa confiabilidade estatística.

A Figura 6.14 apresenta as faces internas dos corpos de prova ao final de ensaio de absorção de água por capilaridade (24 h). Na imagem observa-se a altura da ascensão capilar (em cm).

Figura 6.14 – Amostras submetidas ao ensaio de absorção por capilaridade

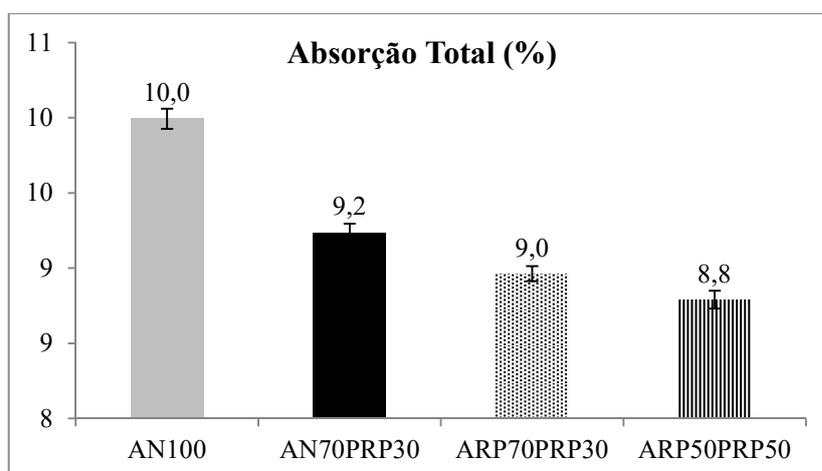


Fonte: Autor

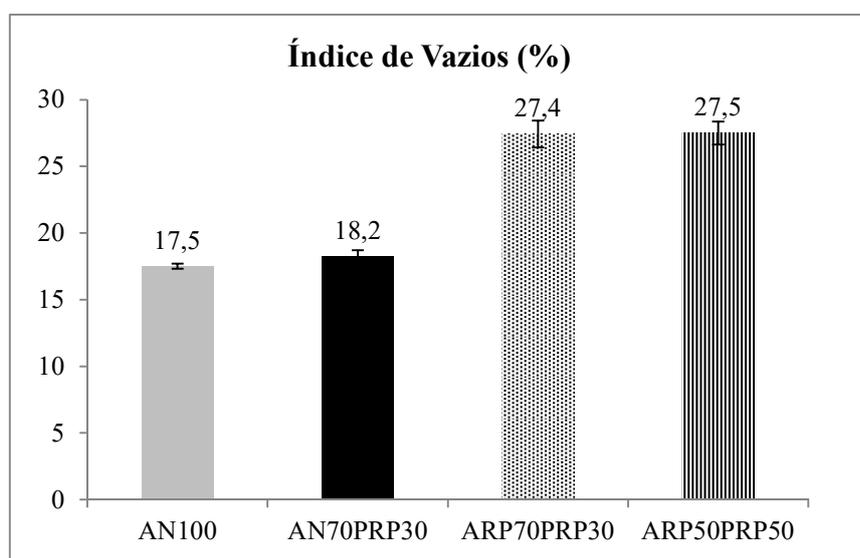
A imagem evidencia que quanto maior o teor de RP nas argamassas, menor a elevação da água, de modo que houve uma diferença de 0,7 cm entre a maior (AN₁₀₀) e a menor ascensão capilar (ARP₅₀PRP₅₀).

6.8 - Absorção Total de Água e Índice de Vazios

Os resultados dos ensaios de Absorção Total de Água e Índice de Vazios são apresentados nas Figura 6.15 e 6.16, respectivamente. Ambos os ensaios estão diretamente relacionados à porosidade das argamassas (MEDINA *et al.*, 2016).

Figura 6.15 - Absorção Total de Água

Fonte: Autor

Figura 6.16 - Índice de Vazios

Fonte: Autor

A absorção de água das argamassas álcali-ativadas variou entre 8,8% e 10,0%, sendo o menor valor pertencente a mistura composta exclusivamente por resíduo de porcelana (ARP₅₀PRP₅₀) ou seja, sem AN.

Os valores do índice de vazios variaram entre 17,51% e 27,5%. Sata, Wongsa e Chindapasirt (2013) utilizaram agregado cerâmico reciclado na produção de concreto álcali-ativado e encontraram um índice de vazios variando entre 21,7% e 26,9%, sendo similar aos resultados obtidos com agregado natural (24,2% a 27,4%). O trabalho de Mesgari, Akbarnezhad e Xiao (2020) concluiu que à medida que a proporção de agregados reciclados aumentava nas amostras álcali-ativadas, o índice de vazios também aumentava.

Quanto maior o teor de RP, menor é a absorção total de água. Entretanto, o número de vazios foi maior nas argamassas contendo RP. Resultados semelhantes foram obtidos nos ensaios realizados por Lintz *et al.* (2008), em que os traços com maiores quantidades de porcelana apresentaram diminuição na absorção de água em comparação à referência.

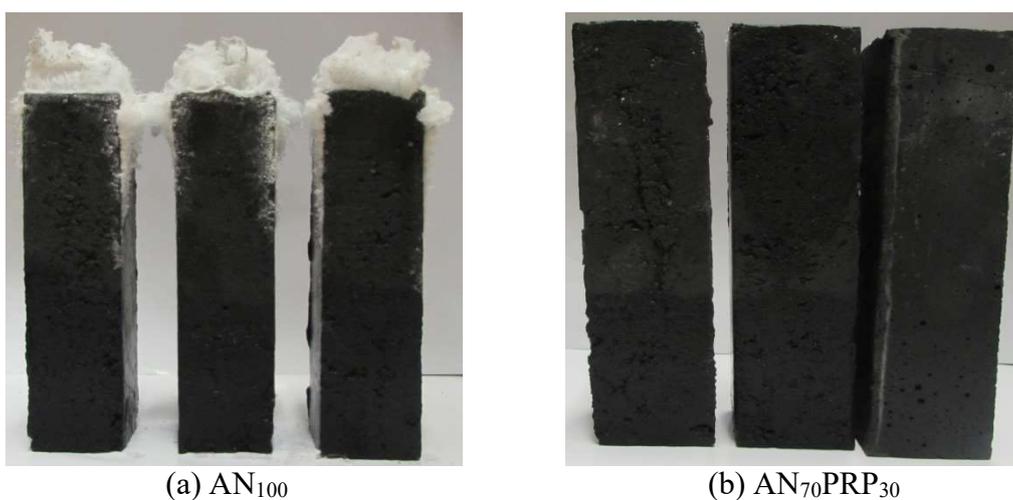
Da mesma forma citada no tópico Absorção de Água por capilaridade, cabe citar Geraldo *et al.* (2017) para justificar os dados de Absorção Total e Índice de Vazios. Os autores afirmam que nas misturas compostas por poros de menores dimensões e mais conectados, mais evidentes são os efeitos capilares, sendo possível afirmar, portanto, que no presente estudo as argamassas compostas por RP apresentam poros maiores e não conectados, prejudicando o efeito da capilaridade

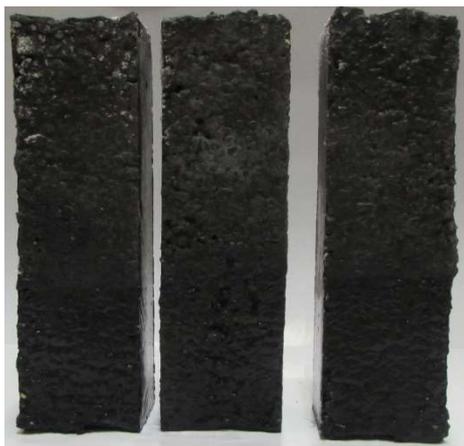
O ensaio de absorção de água por capilaridade (Tópico 6.7) indicou que quanto maior foi o teor de RP, menor a capilaridade, permitindo concluir que, os poros das misturas compostas com RP são não capilares, podendo o RP atuar como filler, já que preenche os espaços vazios, reduzindo a interconexão dos poros.

6.9 - Eflorescência

Na Figura 6.17 são apresentadas as imagens dos corpos de prova das quatro argamassas álcali-ativadas para avaliação do surgimento da eflorescência.

Figura 6.17. Imagens das Argamassas submetidas ao ensaio de eflorescência



(c) ARP₇₀PRP₃₀

Fonte: Autor

(d) ARP₅₀PRP₅₀

Por meio das imagens é possível observar que a eflorescência ocorreu significativamente, com mais intensidade, na argamassa composta exclusivamente por AN como agregado miúdo (AN₁₀₀), ou seja, sem RP. Uma tímida formação dos cristais pode ser visualizada nas demais misturas, porém, pouco significativa, em comparação com a argamassa AN₁₀₀. Dentro da rede de poros, o excesso de óxido de sódio é móvel e é propenso a formar cristais brancos quando em contato com o CO₂ atmosférico (PACHECO-TORGAL; GOMEZ; JAJALI, 2010; KANI *et al.*, 2012). Relevante destacar que a eflorescência se constitui principalmente por compostos de sódio independentemente do tipo de aglomerante, sendo geralmente, mais evidente a presença de Na⁺ do que K⁺ em materiais ativados por hidróxidos (DUXSON; FERNÁNDEZ-JIMENEZ; PROVIS, 2006; PROVIS *et al.*, 2014; KANG; KWON, 2017;).

Uma elevada concentração de álcali na solução e a ligação fraca de Na⁺ na estrutura são os motivos da formação da eflorescência em aglomerantes álcali-ativados por NaOH (BORTNOVSKY *et al.*, 2008).

Um dos principais problemas de argamassas curadas em temperatura ambiente é o desenvolvimento da eflorescência, o que justifica a formação do fenômeno na argamassas.

É possível admitir que a presença do RP inibe a ocorrência da eflorescência. Possivelmente, a ocorrência deste fato se dá em função da diminuição da mobilidade do sódio livre devido à presença do RP, preenchendo os poros. De acordo com Provis (2018), o fenômeno da eflorescência, em concretos e argamassas álcali-ativadas, é melhor controlado por meio da implementação de condições de cura ou adição de materiais de refino de poros para reduzir a taxa de mobilidade de umidade nos cimentos endurecidos. A eflorescência não é apenas um problema superficial nas argamassas, mas pode ser responsável por mudanças

estruturais que levam à diminuição da resistência. O fenômeno pode ser reduzido pelo método de cura selada, podendo, no entanto, diminuir a resistência à compressão nas idades iniciais (XIE; OZBAKKALOGLU, 2015; SINGH; MIDDENDORF, 2020).

A eflorescência apresenta efeitos de ordem estética, exibindo, em alguns casos, uma aparência desagradável devido à formação dos cristais brancos na superfície. Neste aspecto concentra-se a principal diferença entre carbonatação e eflorescência, de maneira que a carbonatação geralmente resulta na degradação do aglomerante e na redução do pH, que pode ou não ser visível a olho nu, enquanto a eflorescência provoca a formação de depósitos de superfície visíveis (PROVIS *et al.*, 2014), sendo necessária uma mobilidade suficiente dos componentes dissolvidos na solução por meio dos poros para que esses produtos alcancem a superfície do material para se tornarem visíveis.

O estudo de KANI *et al.* (2012) mostrou que a cura acima de 65 °C reduziu a formação de eflorescência em um material álcali-ativado, demonstrando o caráter positivo da cura conduzida em altas temperaturas. Zhang *et al.* (2014) produziram um aglomerante álcali-ativado composto por cinzas volantes e ativado por NaOH. O material foi curado em temperaturas de 23° C e 80 °C. Os autores identificaram menor quantidade de eflorescência quando o material foi sintetizado em temperatura elevada, sendo a cura benéfica para reorganização e cristalização de géis e diminuição da taxa de eflorescência.

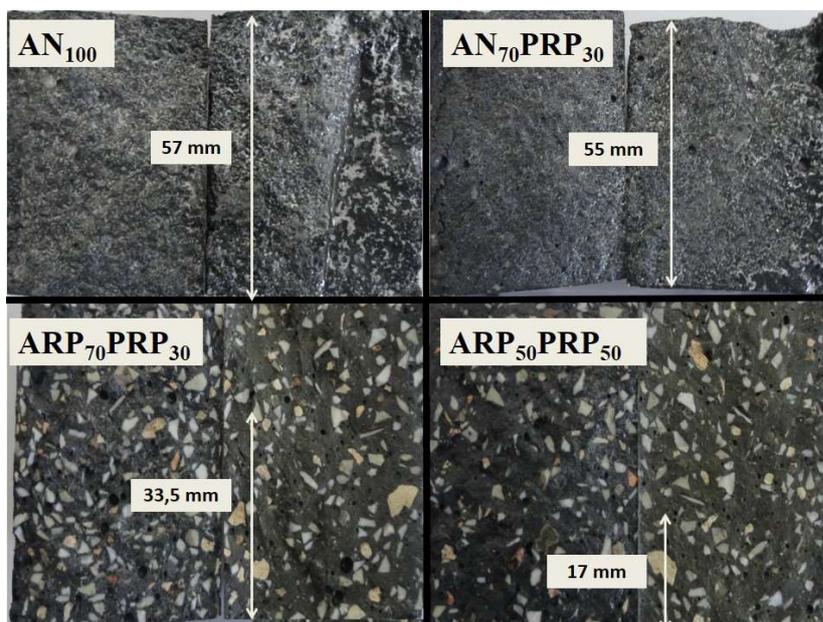
A absorção capilar muito elevada de aglomerantes álcali-ativados a base de metacaulim pode levar à eflorescência se o movimento de álcalis não for devidamente controlado (KANI *et al.*, 2012), podendo ser feito por meio de adições minerais, como é o caso do RP, ou pelas condições de cura (PROVIS, 2017).

Neste sentido, tendo em vista que a molaridade e as condições de cura são as mesmas para as quatro argamassas, é possível verificar que a eflorescência foi controlada pela presença do RP nas misturas.

6.10 - Ataque por cloretos

Os resultados das médias da profundidade do ataque por cloreto, medido aos 90 dias, após a pulverização de nitrato de prata são apresentados na Figura 6.18.

Figura 6.18 – Amostras submetidas ao ensaio de ataque por cloretos



Fonte: Autor

A resistência ao ataque por cloreto é um dos principais parâmetros a ser avaliado na durabilidade de cimentos e concretos. Os cloretos são considerados mais prejudiciais por seus efeitos sobre a estrutura de concreto, mais especificamente ao aço embutido, do que sobre a química do aglomerante (ABORA *et al.*, 2014).

Tendo em vista que os íons cloreto podem atacar rapidamente o concreto e atingir a armadura em um curto período de tempo, torna-se necessário avaliar a resistência das argamassas ao ataque por cloreto.

Os resultados demonstram que a profundidade de íons cloretos diminuiu gradualmente de 57 mm, 55 mm, 33,5 mm a 17 mm, AN₁₀₀, AN₇₀PRP₃₀, ARP₇₀PRP₃₀ e ARP₅₀PRP₅₀ respectivamente. A argamassa AN₁₀₀ apresentou pior desempenho, sendo mais susceptível ao ataque por cloreto quando comparada com as demais argamassas.

Merecem destaque as misturas compostas por RP. A argamassa ARP₅₀PRP₅₀ apresentou melhor resultado, indicando que quanto maior o teor de PRP menos sujeito ao ataque a cloreto são os materiais. Quando se compara a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado em AN₇₀PRP₃₀ (55 mm) e ARP₇₀PRP₃₀ (33,5 mm) respectivamente, observa-se uma considerável melhora na resistência ao ataque por cloreto na mistura composta exclusivamente por RP.

Resultado semelhante foi obtido por Higashiyama *et al.* (2014), ao avaliarem o ataque por cloreto pelo método de aspersão de nitrato de prata. Os autores identificaram que a

profundidade de penetração do íon cloreto nas argamassas compostas por agregado cerâmico apresentaram maior resistência a penetração do íon.

Um concreto composto por material cerâmico, utilizado como agregado miúdo, apresentou maior resistência ao ataque por cloreto quando comparado com um concreto referência, sendo considerado de baixo risco de corrosão (GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2014)

No trabalho de Medina *et al.* (2016), a penetração de cloreto foi ligeiramente superior a 4% e 8% nos concretos contendo 20% e 25% de agregados de cerâmica sanitária, respectivamente, quando comparados com concreto convencional.

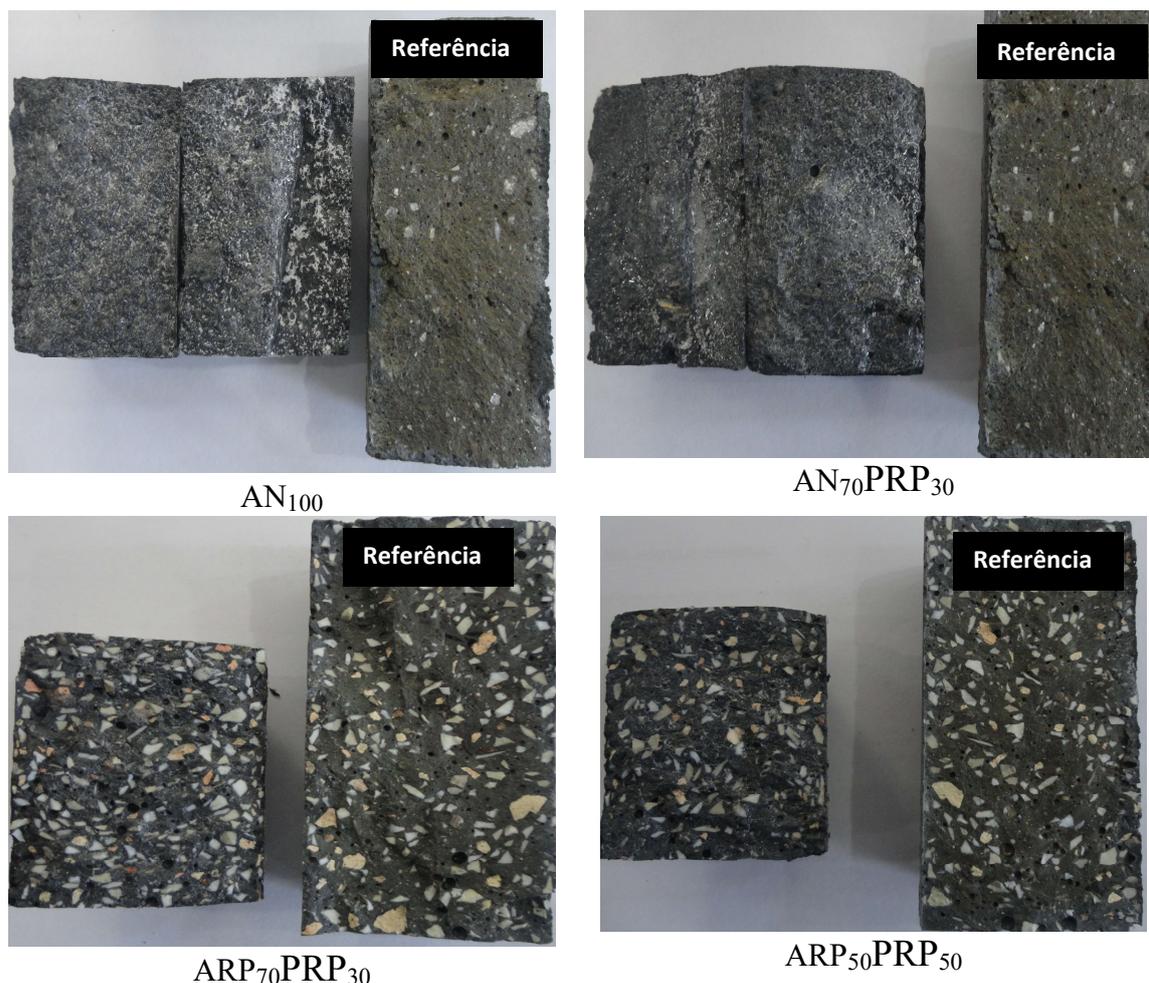
Siddique *et al.* (2019) utilizaram agregado cerâmico na produção de concretos e identificaram que a profundidade de penetração do cloreto no concreto com o resíduo foi menor que o concreto controle, evidenciando também a positividade da utilização de materiais cerâmicos como agregados no combate ao ataque por cloreto.

Diante dos resultados é possível admitir que o ataque por cloreto está diretamente relacionado à capilaridade da argamassa, que por sua vez está relacionada a presença do resíduo de porcelana. Conforme os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade (tópico 6.7), a argamassa AN₁₀₀ apresentou maior capilaridade em relação as outras, estando, portanto, mais sujeita ao ataque por cloreto. Poros capilares são importantes no transporte de íons e podem levar a algumas diferenças importantes nos mecanismos pelos quais elementos como cloreto, sulfato e carbonato são transportadas através das estruturas destes materiais (BERNAL *et al.*, 2014b). A taxa de penetração de cloretos depende da porosidade, que é, dentre outros aspectos, influenciada pela relação água/materiais secos (ZHU *et al.*, 2014). Uma argamassa durável e quase isenta de porosidade revela forte resistência ao ataque de sulfatos e cloretos, abrasão e alta tolerância às agressivas condições ambientais (FODIL; MOHAMED, 2018)

Um aglomerante álcali-ativado composto por cinza volante, cuja concentração de NaOH (ativador) variou de 8 a 18 mol/L apresentou diminuição da penetração de cloretos à medida que se aumentou a concentração do ativador, devido ao refinamento das estruturas dos poros como resultado da reação de policondensação no processo de ativação alcalina (CHINDAPRASIRT; CHALEE, 2014).

A Figura 6.19 apresenta as imagens das argamassas expostas ao ensaio de ataque por cloretos sendo comparadas com a mesma mistura não submetida ao ensaio. Ou seja, as amostras não sujeitas ao ensaio não apresentam a superfície esbranquiçada devido a reação do nitrato de prata com o cloreto.

Figura 6.19 - Comparação entre as argamassas submetidas ao ataque por cloretos



Fonte: Autor

Nas imagens é possível confirmar que o ataque por cloreto é mais intenso na mistura AN₁₀₀ e que quanto maior o teor de PRP, mais resistente ao ataque por cloreto é o material.

6.11 - Ataque por Sulfatos

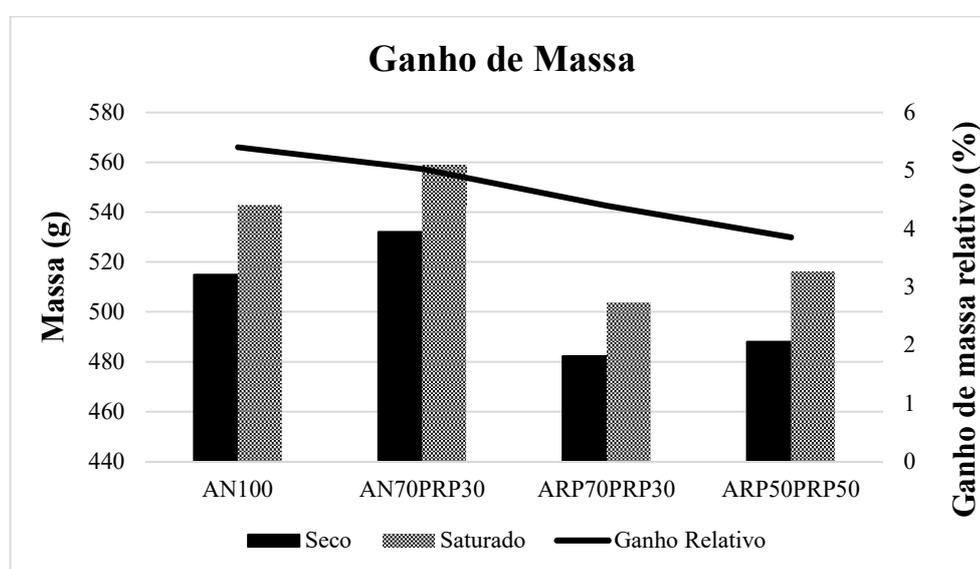
Os resultados do ensaio de ataque por sulfato são representados pela alteração de massa, resistência à compressão e eflorescência das argamassas, conforme detalhado no Capítulo 6, Materiais e Métodos.

Em geral, a resistência dos aglomerantes álcali-ativados aos agentes químicos (de ambientes ácidos ou sulfatos) é alta, reduzindo a intensidade dos danos originados pelo sulfato e apresentando melhor desempenho do que aqueles materiais compostos de cimento Portland (AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018; LUUKKONEN *et al.*, 2018; PROVIS, 2018; AMRAN *et al.*, 2020; LAN *et al.*, 2020).

6.11.1 Alteração de Massa

A Figura 6.20 representa o ganho de massa das argamassas submetidas ao ensaio. Cabe destacar que a massa seca foi obtida antes do ensaio de ataque por sulfato e a massa saturada por capilaridade foi determinada na pesagem após 28 dias, período em que as argamassas foram ensaiadas.

Figura 6.20 - Alteração de massa das argamassas



Fonte: Autor

Todas as argamassas apresentaram aumento de massa. Em termos relativos, o maior ganho de massa foi da argamassa AN₁₀₀, cujo aumento foi de 5,4%, correspondente a 28 g. A mistura com menor ganho de massa foi ARP₅₀PRP₅₀, com aumento de 3,9%, o equivalente a 18,8 g. Este menor ganho de massa em ARP₅₀PRP₅₀ ocorre devido ao maior teor de RP presente na mistura. Quando se analisa a substituição de AN por ARP em AN₇₀PRP₃₀ e ARP₇₀PRP₃₀, observa-se uma influência da porcelana utilizada como agregado, observando uma redução de 5,0% (26,8 g) para 4,4% (21,4 g) respectivamente. Huseien *et al.* (2019) observaram que todas as argamassas estudadas apresentaram uma variação de massa muito baixa quando influenciada pela solução de sulfato. As amostras das argamassas álcali-ativadas, preparadas com cinza volante, mostraram um aumento na massa de 0,12, 0,09 e 0,04%.

Os dados permitem concluir que, nas condições estabelecidas pelo presente estudo, a presença da ARP juntamente com o PRP, utilizado como agregado miúdo, dentre das

características de um material álcali-ativado, promove menor ganho de massa quando as argamassas estão sujeitas ao ataque por sulfato.

6.11.2 Resistência à Compressão - Ataque por sulfato

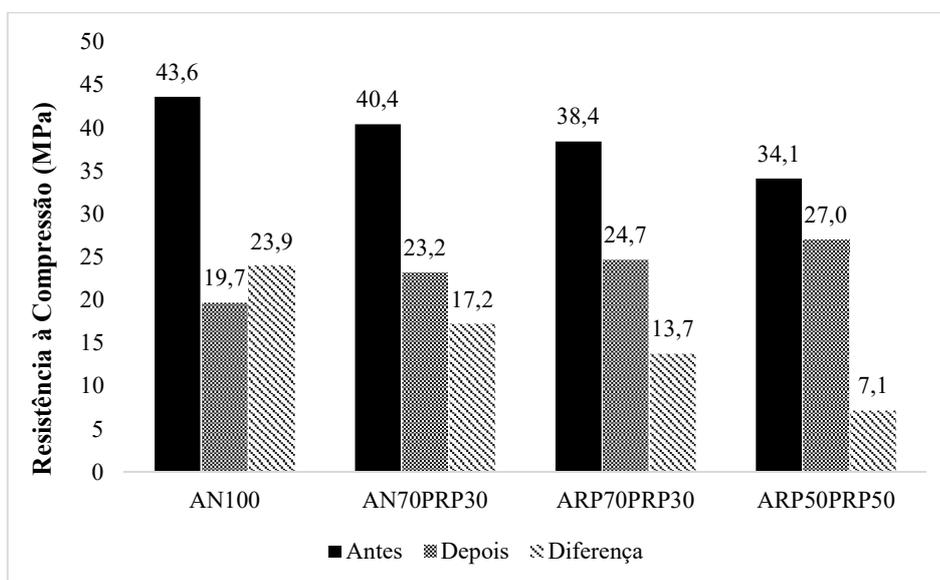
A Figura 6.21 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas submetidas ao ensaio de ataque por sulfato aos 28 dias. Os valores obtidos são comparados com os resultados de resistência à compressão, determinados nas condições estabelecidas pela presente pesquisa, ou seja, sem a exposição ao ataque por sulfato, anteriormente apresentados no tópico 6.2.1.

A mistura AN₁₀₀, cuja resistência à compressão chegou a diminuir cerca de 55%, foi a que sofreu maior perda de resistência à compressão devido ao ataque por sulfato. Esta redução de resistência se dá devido a maior capilaridade apresentada pela referida argamassa conforme discutido no Tópico 6.7. Esse efeito pode ser explicado pela migração do sódio, que está presente no ativador alcalino, para a solução de sulfato, que causa a perda de resistência e, também, pelo fato de que normalmente a solução de sulfato promove a quebra das ligações Si-O-Si na matriz álcali-ativada (BAŠČAREVIĆ *et al.*, 2015). Por outro lado, a argamassa ARP₅₀PRP₅₀ foi a que menos sofreu influência do ataque por sulfato, tendo uma diminuição de 21% da resistência à compressão, estando novamente vinculado ao resultado de capilaridade. Juntamente com a penetração de cloretos, o ataque por sulfato são fatores críticos relacionado a durabilidade do material e estão diretamente relacionados a absorção de água e permeabilidade (ZHANG *et al.*, 2017b).

A mistura AN₇₀PRP₃₀ obteve resistência à compressão 42,6% menor do que a resistência à compressão obtida para a mesma mistura quando não submetida ao ataque por sulfato. Da mesma forma, a mistura ARP₇₀PRP₃₀ obteve uma perda 35,8%. Desta forma, admite-se que a substituição de ARP por AN promove uma menor perda de resistência à compressão nas argamassas.

Após a exposição à solução de sulfato, as argamassas álcali-ativadas preparadas por Huseien *et al.* (2019) apresentaram aumento contínuo da resistência à compressão de acordo com o avançar das idades. De acordo com os autores, esses resultados foram inesperados, tendo em vista que normalmente a resistência diminui após a imersão na solução de sulfato, corroborando com os resultados encontrados na presente pesquisa.

Figura 6.21 - Resistência à compressão das 4 argamassas



Fonte: Autor

O ataque por sulfatos é conhecido por produzir significativa degradação em estruturas de concreto. Sistemas álcali-ativados com baixo teor de cálcio geralmente mostram excelentes resistências ao ataque por sulfatos. Na maioria dos casos, a resistência ao ataque por sulfato de sistemas álcali-ativados é melhor do que de sistemas com cimento Portland (PROVIS, 2017; ZHANG *et al.*, 2017a).

Uma argamassa álcali-ativada composta por cinza volante não apresentou degradação após 1 ano de exposição a uma solução de Na_2SO_4 . (FERNANDEZ-JIMENEZ; GARCÍA-LODEIRO; PALOMO, 2007)

O estudo de Rodríguez *et al.* (2008) comparou o desempenho de um concreto álcali-ativado com um concreto convencional e concluiu que a resistência à compressão no material álcali-ativado foi praticamente constante por 90 dias imersos em uma solução de Na_2SO_4 , ao contrário do concreto convencional que teve uma redução de resistência à compressão maior que 43%.

Sukmak *et al.* (2015) examinaram a resistência à compressão de um material álcali-ativado submetido ao ataque por sulfato. Os autores observaram uma diminuição na resistência à compressão, após 240 dias de exposição, na ordem de 10,8% e 21,6%.

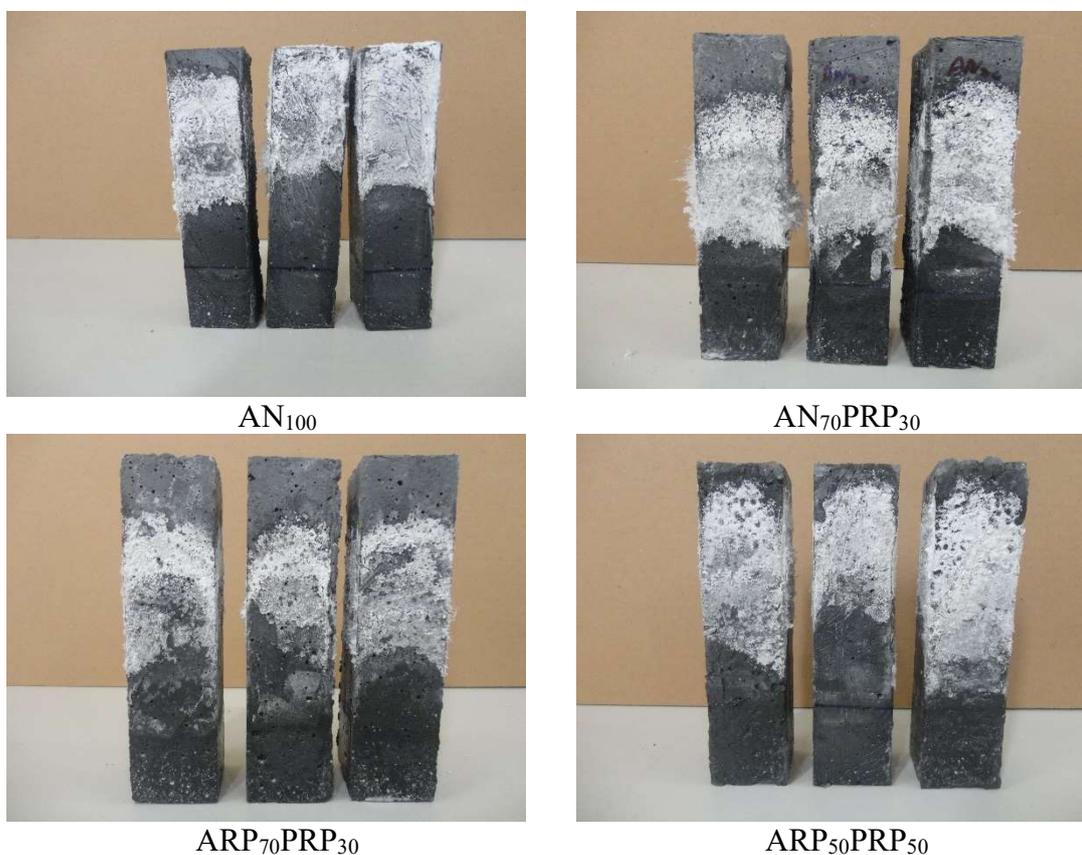
Portanto, a partir dos resultados de resistência à compressão, é possível admitir que a presença de RP nas argamassas reduz consideravelmente os efeitos do ataque por sulfatos, protegendo o concreto em contato com íons sulfato. Além disso, os resultados vão ao encontro

do que preconizam Hassan, Arif e Shariq, (2019) ao citarem que os materiais álcali-ativados são adequados para suportar os rigores de um ambiente de sulfato e oferecem uma alternativa econômica aos materiais atualmente empregados e aos problemas associados ao reparo regular das redes de tubulação.

6.11.3 Eflorescência - Ataque por sulfato

A Figura 6.22, apresenta a eflorescência formada nas argamassas após imersão parcial aos 28 dias decorrente do ensaio de ataque por sulfato.

Figura 6.22 - Eflorescências das argamassas submetidas ao ataque por sulfato



Fonte: Autor

Todas as argamassas demonstraram desenvolvimento de eflorescência. O surgimento dos cristais brancos na superfície das argamassas pode ser explicado pela cura ter ocorrido em temperatura ambiente, que favorece o surgimento do fenômeno.

Pouca diferença foi observada entre as argamassas, destacando apenas a imagem da argamassa ARP₇₀PRP₃₀, que, aparentemente apresentou menor formação de cristais brancos, compostos por sódio. Apesar da subjetividade na identificação da eflorescência, pelo fato de o

método ser apenas visual, é possível admitir que a presença de RP inibe o surgimento da eflorescência. Os resultados acompanham a mesma tendência dos resultados obtidos no ensaio de eflorescência (Tópico 6.9).

O fato de todas as amostras terem apresentado cristais brancos na superfície, diferentemente do ensaio de eflorescência, é justificado pelo tempo de ensaio. O ensaio de ataque por sulfato exigiu que os corpos de prova ficassem imersos na solução por 28 dias, enquanto no ensaio de eflorescência, as amostras ficaram imersas por apenas 15 dias.

Sendo assim, é possível concluir que as argamassas compostas por RP mostraram maior resistência ao ataque por sulfato, apresentando menor perda de resistência à compressão e menor formação de eflorescência.

Avaliando os resultados dos ensaios anteriores, observa-se uma coerência com os resultados dos ensaios de eflorescência (Tópico 6.9), ataque por cloreto (Tópico 6.10) e ataque por sulfato (Tópico 6.11), que indicam que as argamassas compostas por RP são menos susceptíveis aos ataques químicos e à eflorescência devido a menor capilaridade.

6.12 – Lixiviação

A Tabela 6.7 (Partes 1 e 2) mostra a concentração de diferentes elementos, dentre eles, os metais pesados lixiviados após a imersão das argamassas em pH 4 por 1, 14, 28 e 64 dias. Os limites de concentrações regulados pelas normas NBR 10.004/2004 e EU 98/83/EC também são apresentadas nesta Tabela.

O uso de resíduos em materiais álcali-ativados, que contêm não somente componentes inertes, mas também, em alguns casos, elementos tóxicos (metais tóxicos, compostos orgânicos, materiais radioativos, entre outros), evidencia a necessidade de se avaliar o processo de lixiviação, pois as características dos materiais podem colocar em risco a saúde humana e o meio ambiente. Devido à composição química dos materiais que compõem as argamassas, torna-se viável analisar o potencial de lixiviação dos elementos como forma de adotar eventuais medidas para reduzir o risco de contaminação ambiental.

Tabela 6.7. Concentrações dos elementos lixiviados (mg/L). Parte 1.

Elemento	Limite ¹	Limite ²	AN ₁₀₀				AN ₇₀ PRP ₃₀			
			1	14	28	64	1	14	28	64
Silício	NC	NC	18,26	17,96	17,82	17,22	18,01	18,22	17,55	14,60
Alumínio	NC	0,20	2,94	2,99	3,09	3,18	3,00	3,01	3,27	3,66
Európio	NC	NC	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Cloro	NC	NC	ND	ND	ND	0,12	ND	ND	0,14	0,71
Zircônio	NC	NC	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Enxofre	NC	NC	0,16	0,16	0,20	0,18	0,17	0,18	0,20	0,20
Fósforo	NC	NC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,17	1,50
Potássio	NC	NC	2,36	2,46	2,42	2,45	2,45	2,47	2,00	2,54
Cálcio	NC	NC	1,24	1,26	1,26	1,25	1,10	1,24	1,18	1,24
Bário	70,00	NC	3,87	3,63	3,82	4,10	3,83	3,75	3,43	3,51
Cobre	NC	2,00	ND	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Cromo	5,00	0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02
Ferro	NC	NC	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04	0,04
Magnésio	NC	NC	0,13	0,14	0,14	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10
Manganês	NC	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Níquel	NC	0,02	ND	ND	ND	ND	0,00	0,00	0,00	0,00
Chumbo	1,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estrôncio	NC	NC	ND	ND	ND	ND	0,01	0,01	0,01	0,01
Titânio	NC	NC	0,65	0,64	0,68	0,67	0,63	0,63	0,64	0,66
Zinco	NC	NC	1,13	1,17	1,12	1,32	1,11	1,10	1,13	1,12

Legenda: ¹: NBR 10.004 (2004); ²: 98/83/EC; **1, 14, 28 e 90**: Idade; **NC**: Não consta; **ND**: Não detectado.

Fonte: Autor

Tabela 6.7. Concentrações dos elementos lixiviados (mg/L). Parte 2.

Elemento	Limite ¹	Limite ²	ARP ₇₀ PRP ₃₀				ARP ₅₀ PRP ₅₀			
			1	14	28	64	1	14	28	64
Silício	NC	NC	18,22	18,22	16,73	18,14	18,10	18,16	17,61	17,49
Alumínio	NC	0,20	3,03	3,02	3,02	3,13	2,99	2,97	3,25	3,10
Európio	NC	NC	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06
Cloro	NC	NC	ND	ND	0,20	ND	ND	ND	0,12	ND
Zircônio	NC	NC	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Enxofre	NC	NC	0,16	0,17	0,33	0,16	0,17	0,18	0,26	0,20
Fósforo	NC	NC	ND	ND	0,22	0,05	ND	ND	0,15	0,36
Potássio	NC	NC	2,36	2,38	2,39	2,33	2,13	2,41	2,37	2,18
Cálcio	NC	NC	1,23	1,23	1,21	1,25	1,20	1,27	1,18	1,11
Bário	70,00	NC	3,81	3,78	3,78	3,76	3,60	3,82	3,83	3,71
Cobre	NC	2,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cromo	5,00	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Ferro	NC	NC	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05
Magnésio	NC	NC	0,12	0,15	0,13	0,11	0,13	0,17	0,10	0,07
Manganês	NC	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabela 6.7. Concentrações dos elementos lixiviados (mg/L). Parte 2. (continua)

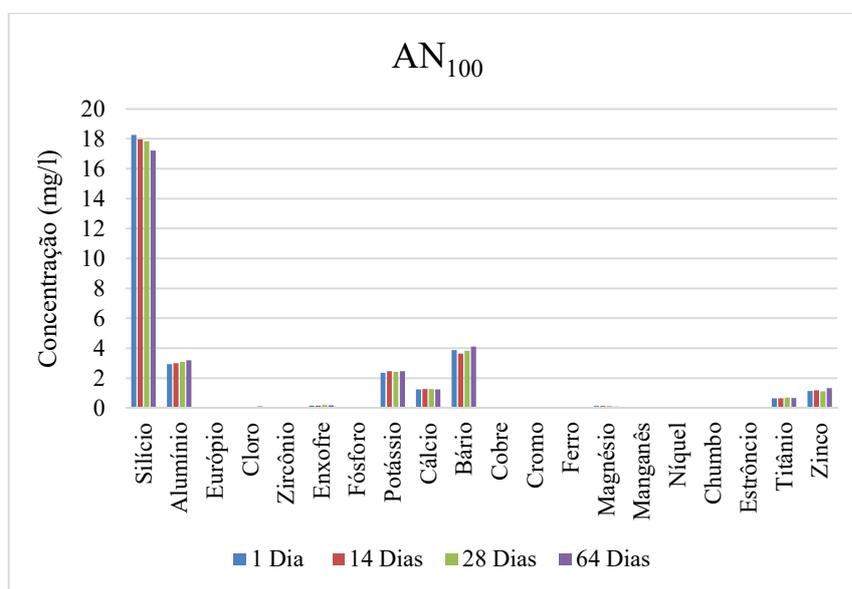
Níquel	NC	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chumbo	1,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estrôncio	NC	NC	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Titânio	NC	NC	0,66	0,66	0,68	0,70	0,65	0,79	0,69	0,68
Zinco	NC	NC	1,15	1,16	1,18	1,13	1,16	1,15	1,19	1,18

Legenda: ¹: NBR 10.004 (2004); ²: 98/83/EC; **1, 14, 28 e 90**: Idade; **NC**: Não consta; **ND**: Não detectado.

Fonte: Autor

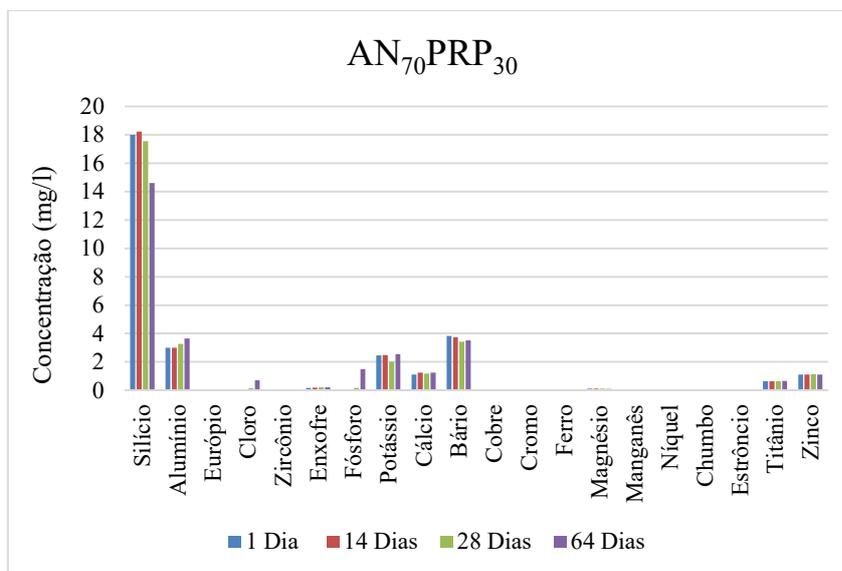
O processo de ativação alcalina é promissor para efetivamente estabilizar metais pesados de forma econômica e ecológica (BAKHAREV, 2005; YUSHENG *et al.*, 2007; AHMARI; ZHANG, 2013). Nas Figuras 6.23 a 6.26 são representados graficamente os resultados das concentrações dos elementos lixiviados para cada argamassa.

A concentração dos elementos Si, Al, K, Ca, Ti, Sr e Ni lixiviados é consistente com a composição química e o conteúdo de cada elemento, conforme demonstrado na análise de FRX do RP (Tabela 5 – Tópico Materiais e Métodos).

Figura 6.23 - Elementos lixiviados da argamassa AN₁₀₀

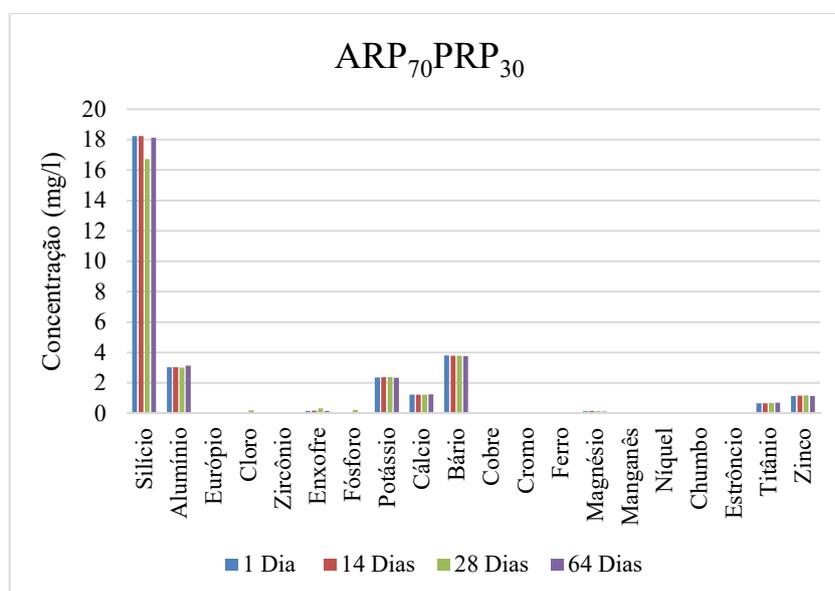
Fonte: Autor

Figura 6.24 - Elementos lixiviados da argamassa AN₇₀PRP₃₀



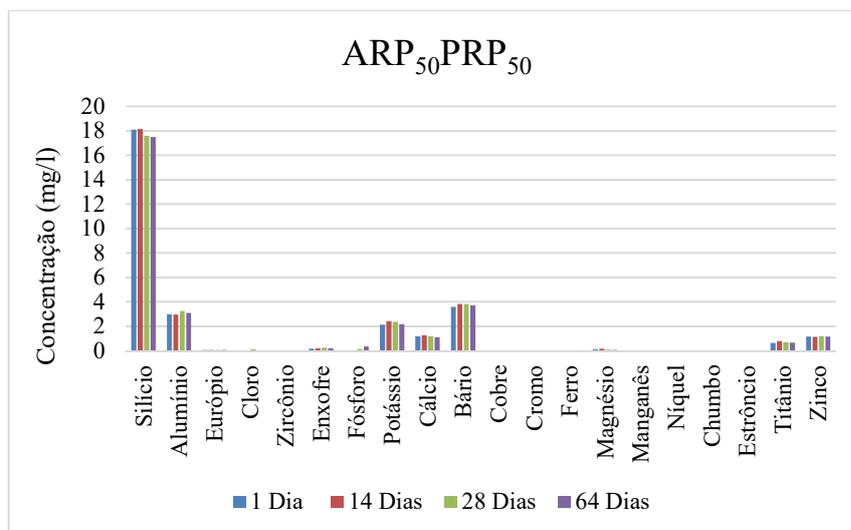
Fonte: Autor

Figura 6.25 - Elementos lixiviados da argamassa ARP₇₀PRP₃₀



Fonte: Autor

Figura 6.26 - Elementos lixiviados da argamassa ARP₅₀PRP₃₀



Fonte: Autor

A elevada concentração de Si e Al lixiviados pode ser justificada também pelas elevadas concentrações destes elementos na SCA e no MK. A taxa de lixiviação de Si e Al decide a real relação Si/Al disponível em uma série de reações para formar o aglomerante álcali-ativado e, posteriormente, desempenha um papel fundamental na estrutura do material álcali-ativado (ZHUANG *et al.*, 2016).

Tem-se ainda que SCA e MK contêm alguns traços de K e Ti, o que faz com que a presença destes dois elementos seja notada no lixiviado. Cabe destacar que, conforme esperado, devido à ausência na composição da SCA e do MK, os elementos P, Ni e Sr não foram detectados pelo ensaio de lixiviação da argamassa AN₁₀₀.

Não houve considerável lixiviação do Fe nas quatro argamassas, apesar da relativa representatividade da concentração deste elemento no RP, indicando que o processo de ativação alcalina inibe a lixiviação dele.

Não foi observada lixiviação do Na, um cátion bastante solúvel, que poderia ter ocorrido devido a utilização de uma solução composta por NaOH na preparação do silicato de sódio alternativo.

Aly *et al.* (2008) examinaram a capacidade de lixiviação de Cs, Sr, Na e Al a partir de um pó de aglomerante álcali-ativado à base de metacaulim em água deionizada, de maneira que uma pequena quantidade de Cs e Sr foram adicionados na mistura. Os autores concluíram que a capacidade de lixiviação do Na foi muito maior do que o Al, que foi lixiviado a partir do gel formado na estrutura álcali-ativada e também da solução ativadora, sendo o Na um álcali residual.

Embora tenha sido identificado um patamar de lixiviação dos materiais, é possível notar que existe um comportamento similar dos elementos presentes nas quatro argamassas para as 4 idades analisadas, o que permite concluir que a concentração dos elementos lixiviados foi praticamente inalterada ao longo do tempo, independentemente da quantidade de RP na amostra. Porém, excluem-se desta tendência os materiais Cl e S, que apresentaram uma pequena concentração no lixiviado. Possivelmente, a presença destes elementos se dá em função da composição da água utilizada na preparação das argamassas, pois o relatório de qualidade da água da SANASA, de 15 de agosto de 2017 indica que a presença de cloretos e sulfatos estão na faixa de 42 mg/L e 4,13 mg/L respectivamente. Cabe destacar que nos sistemas de tratamento de água para abastecimento, a adição do cloro acontece para promover a redução de matéria-orgânica e oxidação de metais, na pré-cloração e para a desinfecção na pós-cloração. Além disso, os sulfatos são produtos químicos adicionados à água bruta para auxiliar a floculação, afim de transformar as impurezas em suspensão, em partículas maiores (flocos) para que possam ser removidas por decantação e ou filtração.

A NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos: Classificação estabelece limites para os elementos, presentes em extrato lixiviado, descritos a seguir: As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Ag e Se. Comparando os resultados com os padrões estabelecidos pela norma ABNT 10.004/2004, observa-se que nenhum dos elementos extrapolou os limites estabelecidos.

Ao avaliar os resultados de lixiviação pela diretiva europeia 98/83/EC – *The quality of water intended for human consumption.*, mais restrita do que a norma brasileira, observa-se que apenas o alumínio lixiviou, apresentando resultados em torno de 3,0 mg/L enquanto o limite estabelecido é de 0,20 mg/L. A lixiviação do Al pode ter ocorrido devido a uma parcela de Al não ter reagido na formação dos géis de NA-S-H, no processo de ativação alcalina.

Os resultados de lixiviação indicaram que as argamassas álcali-ativadas, nas condições produzidas, apresentam ótimo desempenho de imobilização dos elementos químicos, dentre eles os metais pesados.

As condições alcalinas de um aglomerante álcali-ativado sintetizado a partir de cinzas volantes inibem a mobilidade de metal, sendo retidos vários poluentes como Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Sr, Sn, Th, U, Y e Zr (IZQUIERDO *et al.*, 2009)

Além de apresentarem problemas no solo e na água, os metais pesados podem ter algumas propriedades alteradas quando incorporados a materiais cimentícios e, por isso, podem produzir efeitos negativos na resistência e na durabilidade dos materiais (MINOCHA; JAIN; VERMA, 2003).

Por este motivo, diversas pesquisas têm se dedicado a avaliar o desempenho de aglomerantes álcali-ativados na imobilização de metais pesados (ZHENG *et al.*, 2010; GAO *et al.*, 2017; XIYILI; ÇETINTAS; BIGOL, 2017; ZHANG *et al.*, 2017a).

O comportamento de lixiviação de metais pesados em amostras álcali-ativadas foi avaliado por Zhang *et al.* (2016), após imersão de 14 dias, e complementada com espectroscopia de absorção atômica. As maiores concentrações de metais pesados lixiviados foram muito inferiores aos limites recomendados pela Agência Norte americana de Proteção Ambiental (USEPA) para a contaminação do solo.

Preocupados com as possíveis consequências para a saúde humana e ao meio ambiente, devido à presença de chumbo presente em aglomerantes álcali-ativados preparados com resíduo de indústria siderúrgica, Chen, Han e Wu (2015) investigaram a taxa de lixiviação do referido metal por meio da mistura de ácido sulfúrico e ácido nítrico. Os resultados indicaram que o chumbo pode ser bem solidificado no aglomerante álcali-ativado tornando-o, portanto, inerte.

Para a estabilização química, produtos químicos ou materiais de cimento são adicionados para imobilizar os metais pesados por meio de encapsulamento físico e/ou reações químicas (AHMARI; ZHANG, 2013). Materiais pozolânicos, como cimento e cal, são comumente usados para estabilizar rejeitos de mineração (CHOI; LEE; PARK, 2009; DESOGUS *et al.*, 2013; FALCIGLIA; ROMANO; VAGLIASINDI, 2017).

Os ensaios de lixiviação de ARIOZ *et al.* (2012) mostraram que metais pesados como As e Hg imobilizaram efetivamente na estrutura química do material álcali-ativado à base de cinza volante.

Ahmari e Zhang (2013) descobriram que os metais pesados podem ser imobilizados de forma eficiente por aglomerantes álcali-ativados, atribuindo a ocorrência da lixiviação por causa do meio ácido e parcialmente ao processo de dissolução.

A capacidade de lixiviação dos metais de um aglomerante álcali-ativado à base de cinzas volantes depende do tipo de elementos químicos, das características das amostras (composto ou monolítico) e da fonte de cinzas volantes (ÁLVAREZ-AYUSO *et al.*, 2008)

Pacheco-Torgal; Gomez; Jajali (2010) avaliaram o desempenho ambiental de aglomerante álcali-ativado composto por rejeito de mineração com concentração de tungstênio e relataram que o material apresentou uma melhor durabilidade do que o aglomerante de cimento Portland; e as concentrações de metais pesados liberados estiveram abaixo dos limites estabelecidos pelas normas.

Ao realizar os ensaios de lixiviação em aglomerantes álcali-ativados à base de escória com cinzas volantes em água deionizada, IZQUIERDO *et al.* (2009) revelaram que os aglomerantes álcali-ativados podem fornecer um encapsulamento eficiente para metais pesados, uma vez que as condições de dosagem, síntese e cura foram bem adaptadas para o processo de ativação alcalina.

Sendo assim, pode-se concluir que as argamassas álcali-ativadas produzidas pelo presente estudo apresentam bom desempenho na imobilização dos metais pesados. Estes resultados podem garantir um material viável do ponto de vista ambiental, pois, além de ser processado em temperatura ambiente, apresenta a possibilidade de utilização resíduos, o material em questão revelou que as concentrações dos elementos lixiviados são significativamente menores do que os padrões estabelecidos.

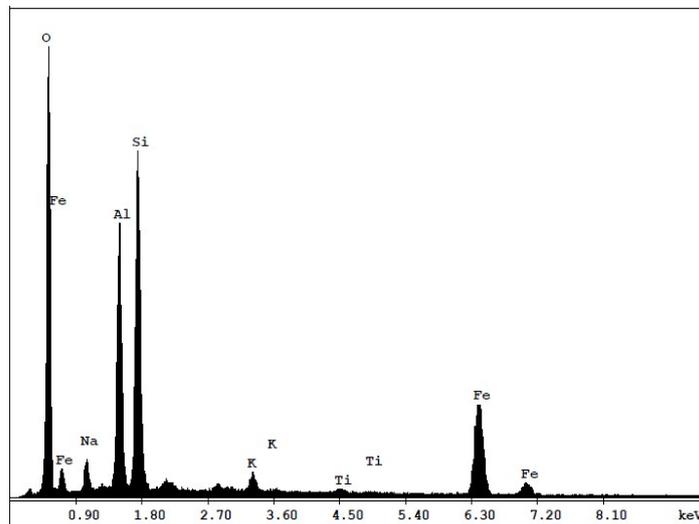
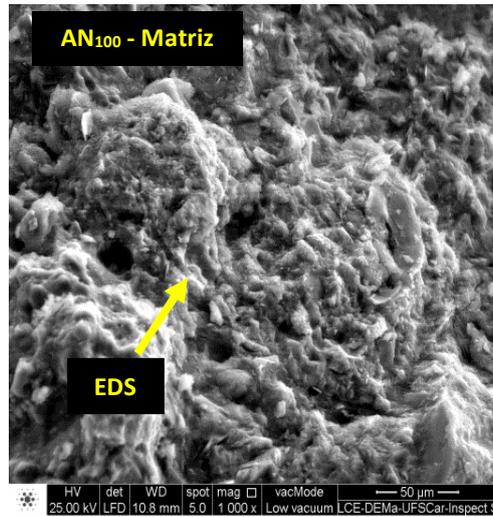
6.13 – Microestrutura Eletrônica de Varredura

As Figuras 6.27 a 6.30 mostram as imagens obtidas em MEV das argamassas AN₁₀₀ e AN₅₀PRP₅₀.

A Fig. 6.27 mostra a argamassa AN₁₀₀, de superfície densa e rugosa. O EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva) na matriz permitiu determinar as relações Na/Al, Na/Si e Si/Al, que foram respectivamente iguais a 0,66, 0,24 e 2,80. Os valores estão de acordo com os intervalos orientados por diferentes autores como adequados para a produção de aglomerantes álcali-ativados (DUXSON *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2014).

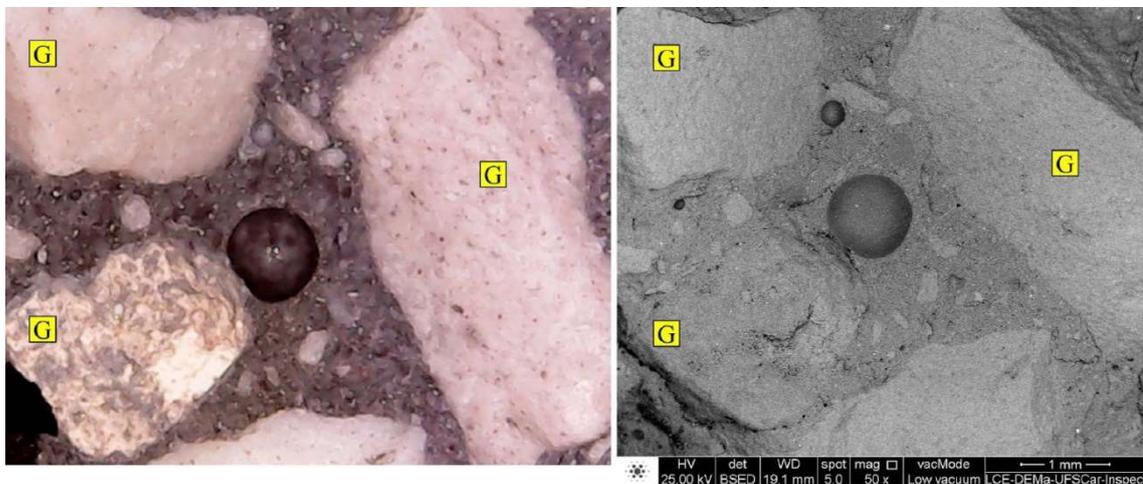
A Fig. 6.28 mostra a zona de transição interfacial na argamassa ARP₅₀PRP₅₀. É possível identificar a forma lamelar (alongada) do RP. A ligação entre a matriz e os agregados afeta as propriedades mecânicas do material (GUINEA *et al.*, 2002). Algumas microfissuras ao longo das bordas das partículas, demonstradas pela letra G, apresentadas na zona de transição interfacial são pontos de fragilidade que contribuem para o menor desempenho mecânico da argamassa ARP₅₀PRP₅₀ (REN; ZHANG, 2018). Na Figura 6.29a fica evidenciada uma superfície lisa e plana (indicada pela seta) que indica uma partícula de agregado de areia natural. É observada uma forte ligação entre o aglomerante álcali-ativado e o agregado (areia natural).

Figura 6.27 - MEV da matriz da argamassa AN₁₀₀



Fonte: Autor

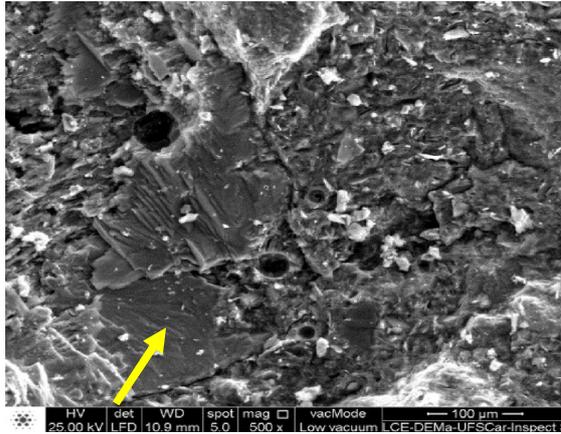
Figura 6.28 - MEV da matriz da argamassa ARP₅₀PRP₅₀



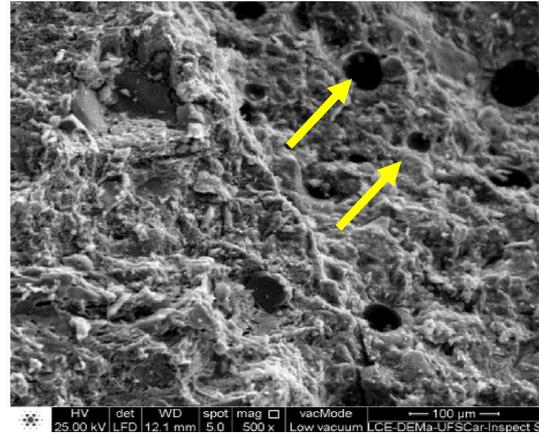
(a) Imagem Colorida
Fonte: Autor

(b) Imagem Original

Figura 6.29 - MEV da matriz da argamassa AN₁₀₀ e ARP₅₀PRP₅₀



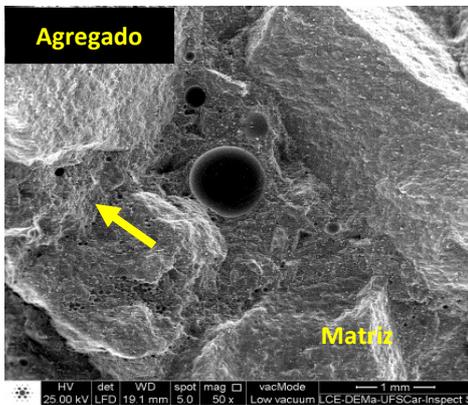
(a) AN₁₀₀



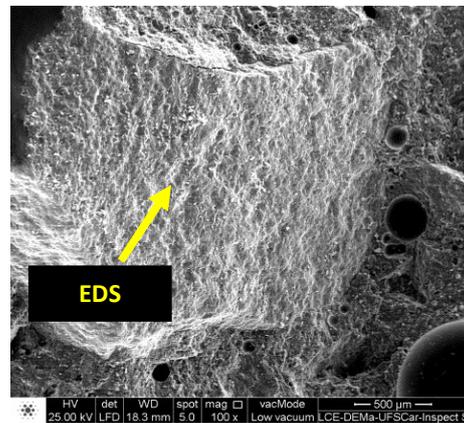
(b) ARP₅₀PRP₅₀

Fonte: Autor

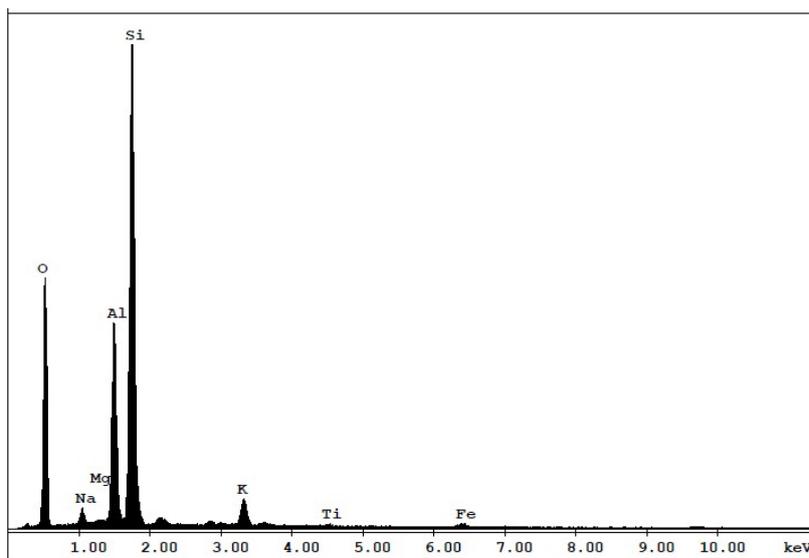
Figura 6.30 - MEV da matriz da argamassa ARP₇₀PRP₃₀



(a) Interface matriz/agregado



(b) Agregado



(c) EDS

Fonte: Autor

O tamanho e a distribuição de alguns poros (indicados pelas setas) também são observados na Figura 6.29b, pertencente a argamassa ARP₅₀PRP₅₀ que desenvolveu uma microestrutura com maior frequência de poros e esses poros têm dimensões maiores (quase o dobro) quando comparados a AN₁₀₀.

Considerando as dimensões dos poros, AN₁₀₀ e ARP₅₀PRP₅₀ são formados principalmente por poros capilares (NGUYEN *et al.*, 2019). Os poros de maiores dimensões apresentados na argamassa AN₅₀PRP₅₀ diminuíram a absorção de água, conforme observado nos resultados de absorção capilar de água. Esses poros maiores apresentados em ARP₅₀PRP₅₀ também contribuíram para a diminuição das propriedades mecânicas (JAYA *et al.*, 2020).

A Figura 6.30a exibe a interface matriz/agregado da argamassa ARP₇₀PRP₃₀. Nesta figura é possível verificar que não existem poros visíveis na superfície do agregado, porém algumas depressões (indicadas pela seta) que podem aumentar a superfície de contato e favorecerem a penetração da pasta álcali-ativada no agregado (ZEGARDŁO; SZELĄG; OGRODNIK, 2016).

A análise de EDS (Figura 6.30c) evidencia a presença de ARP como agregado, contendo elementos químicos como Si, Al, K, Fe, e O, juntamente com um baixo conteúdo de Ti, como indicado no resultado de FRX (Tabela 5 – Tópico Materiais e Métodos).

As imagens obtidas por MEV indicam que as misturas compostas por RP apresentam poros de maiores dimensões e também uma maior porosidade, conforme também indicado pelo ensaio de permeabilidade ao ar (Tópico 6.6).

6.14 - Utilização das argamassas como material de reparo

Tendo em vista a falta de normatização dos padrões de argamassas de reparo no Brasil, as Tabelas 6.8 e 6.9 apresentam dados comparativos com o que têm sido resultados em algumas pesquisas com argamassa de reparo e também com argamassas disponíveis no mercado. A Tabela 6.8 apresenta informações referentes a alguns materiais de reparo disponíveis na literatura. Na mesma Tabela 6.8, constam os valores encontrados no presente estudo.

Tabela 6.8 - Características de diferentes materiais de reparo - literatura

Identificação	Precursor	Resistência a Compressão (MPa)			Res. à Tração na Flexão (MPa)	Aderência (MPa)	Referência
		1 dia	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	
AN ₁₀₀		10,6	42,7	43,6	9,3	3,2	
AN ₇₀ PRP ₃₀	Metacaulim e Resíduo de Porcelana	22,6	35,2	40,4	10,2	3,05	Fernandes (2020)
ARP ₇₀ PRP ₃₀		23,3	40,7	38,4	8,7	2,98	
ARP ₅₀ PRP ₅₀		24,3	37	34,1	9,1	1,99	
RL	CP e Sílica ativa	-	-	36	-	1,19	Momayez <i>et al.</i> (2005)
K100	CP com polímero	-	-	35	-	2,14	
AAA	Metacaulim	5,5	60,9	73,2	-	3,63	Alanazi <i>et al.</i> (2016)
RRM	Cinza Volante Escória de Alto Forno	5,1	36	41	-	1,9	Song <i>et al.</i> (2017)
AAA	Metacaulim e SCA	12	44	38	8,7	4,2	Teixeira <i>et al.</i> (2019)
GP1	Metacaulim	-	-	24,6	-	1,44	Albidah <i>et al.</i> (2020)
AAA	Cinza Volante	9	23	48	-	7	Phoongernkham <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autor

Os dados da Tabela 6.8 demonstram que com 1 dia de cura todas as argamassas produzidas com resíduo de porcelana tiveram melhor resultado de resistência a compressão do que as demais, demonstrando assim o efeito positivo da argamassa álcali-ativada com a utilização do material residual. Os resultados dessas argamassas são 4 vezes superiores às aquelas preparadas por Alanazi *et al.* (2016) e Song *et al.* (2017) que utilizaram Metacaulim, Cinza Volante e Escória de Alto Forno em seus trabalhos. Ainda em relação ao Metacaulim na idade inicial, o trabalho de Teixeira *et al.* (2019) encontrou um valor 50% inferior quando comparados com as argamassas compostas por RP, mostrando que o incremento do resíduo junto ao metacaulim e a SCA promovem ganhos na resistência a compressão. Também utilizando metacaulim como precursor, Nunes, Borges e Zanotti, (2019) encontraram valores de 50 MPa aos 28 dias. Quanto a resistência a tração na flexão, os resultados das argamassas preparadas no presente estudo apresentaram valores similares e superiores aos encontrados por Teixeira *et al.* (2019) e foram significativamente maiores (3 vezes) quando comparados aos valores obtidos por Nunes, Borges, Zanotti, (2019), que obteve 2,9 MPa para a resistência a tração na flexão.

Ao avaliar a resistência a compressão na idade de 28 dias, observa-se que os resultados das misturas preparadas com metacaulim e RP estão no mesmo intervalo dos demais, exceto Alanazi *et al.* (2016). Merece destacar que para essa mesma idade, todos os resultados aqui encontrados são maiores do que aqueles obtidos por Momayez *et al.* (2005), que produziram um material de reparo com cimento Portland e sílica ativa. Esses resultados vão ao encontro do que trata a literatura ao citar que aglomerantes álcali-ativados podem apresentar resistência a compressão maior do que matrizes preparadas com cimento Portland, existindo a possibilidade de serem utilizados como material de reparo (PROVIS, 2018; TEIXEIRA *et al.* 2019; SHAH, HUSEIEN, 2020; JINDAL, 2019).

É possível afirmar que as argamassas apresentaram resultados satisfatórios em relação a aderência, quando comparados com os resultados de demais trabalhos. Corrobora com tal informação o conteúdo que foi discutido no Tópico 6.5 – Aderência em substrato existente, evidenciando que as argamassas apresentaram resultados excelentes quando relacionados com valores de desempenho estabelecidos por Springkel e, Ozyildirim (2000), descritos na Tabela 6.5. Por outro lado, ao comparar os resultados de aderência aqui obtidos, com os resultados de aderência de Alanazi *et al.* (2016) e Teixeira *et al.* (2019), cujos valores foram 3,63 e 4,62 MPa, é possível observar que a presença do RP nas misturas provoca uma perda de aderência, devido certamente, ao maior índice de vazios dessas amostras. Situação similar foi identificada por

Teixeira *et al.* (2019) utilizando o mesmo método (*Triplet test*) de determinação da aderência em substrato existente.

Para efeitos de comparação com argamassas de reparo disponíveis no mercado, Tabela 6.9 apresenta os valores de resistência à compressão, resistência a tração de 4 argamassas de reparo comerciais, obtidos a partir dos Boletins Técnicos disponibilizados pelos fabricantes. Os nomes comerciais, bem como a identificação dos fabricantes, foram omitidos. Nesta mesma Tabela 6.9, também é possível observar os valores de resistência mecânica das argamassas estudadas.

Tabela 6.9. Características de Argamassas de Reparo Comerciais

Argamassas		Resistência à Compressão (MPa)			Resistência à Tração (MPa)		
		1	7	28	1	7	28
Comerciais*	W1	-	-	34	-	-	-
	W2	-	25	30	-	-	-
	W3	20	45	50	-	-	-
	W4	20	40	50	-	-	-
	AN ₁₀₀	10,6	42,7	43,6	2,6	9,3	9,3
	AN ₇₀ PRP ₃₀	22,6	35,2	40,4	4,3	8,8	10,2
	ARP ₇₀ PRP ₃₀	23,3	40,7	38,4	5,4	8,9	8,7
	ARP ₅₀ PRP ₅₀	24,3	37	34,1	5,5	8,3	9,1

*Informação fornecida pelo fabricante, que não apresenta dados sobre resist. à tração na flexão.

Fonte: Autor

Todas as argamassas preparadas com RP atenderam aos requisitos apresentados pelo fabricante das argamassas W1 e W2. A argamassa W1 é um produto pronto formulado à base de cimento Portland, que resultam numa argamassa moldável com alta resistência mecânica e elevada aderência ao concreto da estrutura existente, impedindo a penetração de água e agentes agressivos. Dentre outras finalidades, esta argamassa é útil para recuperação de concreto deteriorado pela corrosão das armaduras, para reparo de pilares, vigas, lajes, varandas, escadas e elementos pré-moldados de concreto, além de ser indicada para fixação de elementos metálicos em estruturas, como barras de apoio para portadores de necessidades especiais, guarda-corpo. A argamassa W2 é um material polimérico para reparos superficiais, também composto por cimento Portland, facilmente moldável. Destaca-se nas suas funções de utilização a resistência mecânica superior às argamassas convencionais e excelente aderência a substratos de concreto.

Quando se comparam os resultados obtidos pela presente pesquisa com os valores indicados pelo fabricante da argamassa W3 e W4, observa-se que nenhuma das argamassas atingiu os limites estabelecidos pelo fabricante, devido aos menores valores de resistência a compressão aos 7 e 28 dias. A argamassa comercial W3 é um material indicado para reparos profundos em estruturas de concreto que apresenta uma elevada consistência, sendo, portanto, coesa e facilmente moldável. A argamassa W4 também é indicada para reparos estruturais profundos e assentamento de calços com precisão. Trata-se de um produto formulado à base de cimento Portland, composto por agregados selecionados e aditivos especiais, que, quando misturados com a quantidade especificada de água, resultam numa argamassa de consistência seca.

Outros atributos de materiais de reparo foram avaliados por demais pesquisadores. A Tabela 6.10 apresenta dos dados de Consistência, Módulo de Elasticidade, Tempo de Pega e Absorção de Água de alguns estudos em comparação com os dados obtidos na pesquisa ora apresentada.

Tabela 6.10. Características de Argamassas de Reparo

Identificação	Consistência (mm)	Módulo de Elasticidade	T. Pega (min)	Abs. água (%)	Referência
AN ₁₀₀	186,5	16,9	140 – 90	2,62	Fernandes (2020)
AN ₇₀ PRP ₃₀	160,5	17	120-210	2,48	
ARP ₇₀ PRP ₃₀	157,5	18,2	120-210	2,45	
ARP ₅₀ PRP ₅₀	157	15,8	100-201	2,38	
AAA	-	17	16-24	-	Husein, Shah (2020)
AAA	243	16	-	15	Nunes, Borges, Zanotti, (2019)
RRM	224	-	16-35	1,8	Song <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Autor

Conforme apresentado nos tópicos anteriores, as consistências das argamassas álcali-ativadas foram influenciadas pela presença do RP preparadas com resíduo de porcelana, resultando em um material mais coeso, com baixa trabalhabilidade. Diante dos resultados de Song *et al.* (2017) e Nunes, Borges, Zanotti, (2019), é possível admitir a necessidade de um agente plastificante que possa garantir a melhoria da trabalhabilidade do material. Em relação ao módulo de elasticidade e absorção de água, os valores encontrados estão na mesma faixa dos estudos objetos de comparação, demonstrando o bom desempenho das argamassas em relação

a esse atributo. Finalizando a análise em questão, observa-se que o tempo de pega, seja inicial ou final, foi superior aos obtidos em outros trabalhos, devendo, a depender da característica de uso e deslocamento, buscar um agente retardador de pega para a utilização da argamassa produzida com RP.

Analisando os resultados em comparação com os demais materiais, pode-se inferir que as argamassas aqui preparadas têm potencial para serem utilizadas como materiais de reparos. Além de relevantes resultados de resistência mecânica, os materiais apresentaram bons resultados de aderência e elasticidade.

7

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada a utilização de isoladores elétricos de porcelana, na sua forma residual e em granulometrias diferentes (grão e pó), em substituição parcial e total da areia natural em argamassas álcali-ativadas, para identificar um material substituto ao agregado miúdo convencional, uma vez que a demanda por produtos com menores emissões de gases do efeito estufa e menor consumo de energia tem sido buscado incessantemente pela comunidade científica.

O estudo teve como foco as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassas, apresentando o potencial de utilização do resíduo de isoladores elétricos de porcelana em substituição da areia natural, resultando em uma alternativa sustentável para a sua destinação final.

Independentemente da granulometria, a adição do resíduo de porcelana diminuiu a fluidez da argamassa álcali-ativada, reduzindo a trabalhabilidade. Este fato deveu-se à grande área superficial e ao formato lamelar (alongado) dos grãos de porcelana. Complementarmente, a substituição parcial da areia natural por resíduo de porcelana teve um efeito mínimo no módulo de elasticidade. Os valores de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e a aderência das argamassas contendo areia de porcelana diminuíram devido a uma zona de transição interfacial mais fraca e microestrutura mais porosa do material. Os poros maiores reduziram o efeito de absorção de água por capilaridade, aumentando os vazios e a permeabilidade ao ar das argamassas.

Em relação à durabilidade, quanto maior o teor do pó do resíduo de porcelana, menos sujeito ao ataque por cloretos foram as argamassas. Além disso, as argamassas mostraram maior resistência ao ataque por sulfato.

Merece destaque o desempenho das argamassas álcali-ativadas produzidas pelo presente estudo que apresentaram bom desempenho na imobilização dos metais pesados. Os resultados de lixiviação indicaram um material viável do ponto de vista ambiental, pois, além de ser processado em temperatura ambiente, apresenta a possibilidade de reaproveitamento dos resíduos.

Apesar de ser conhecido o potencial pozolânico do resíduo de porcelana, no presente estudo tal efeito não foi notado. Por outro lado, o mesmo material, em pó, atuou como filler nas argamassas.

As argamassas contendo apenas resíduo de porcelana como agregado apresentaram desempenho satisfatório para aplicações como materiais de construção, com características aceitáveis para argamassas de reparo.

Deste modo, estudos complementares, como coeficiente de dilatação térmica, retração, influência da molaridade devem ser levados em consideração para complementar a caracterização das argamassas álcali-ativadas produzidas no presente trabalho. Cabe também sugerir a condução de estudos sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das argamassas álcali-ativadas para avaliar a pegada ambiental deste produto.

REFERÊNCIAS

ABCERAM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Informações Técnicas - Processos de Fabricação. (2016). Disponível: <<http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em: 15/10/2016.

ABORA, K. *et al.* Durability and Testing – Chemical Matrix Degradation Processes. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Alkali Activated Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. v. 13, cap. 8, p. 177-221.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3468**. Gesso para construção - determinação das propriedades físicas do pó - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 23**. Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248**. Agregados - Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**. Argamassa para assentamento e Revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro. 2005. 7 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos -Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**. Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013. 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**. Revestimento de Paredes e Tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**.

Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**.

Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto — Especificação. Rio de Janeiro, 2019. 11 p.

AHMARI, S.; ZHANG, L. Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolymer bricks. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 743–750, jul. 2013.

ALANAZI, H. *et al.* Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 75–82, jan. 2016.

ALBIDAH, A. *et al.* Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortars at ambient and elevated temperatures. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 10732–10745, set. 2020.

ALECCI, V. *et al.* Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1038–1045, mar. 2013.

ALONSO, M.M. *et al.* Alkali-activated mortars: workability and rheological behaviour, **Constr. Build. Mater.** v. 145, p. 576–587, 2017.

ALTAN, E.; ERDOGAN, S. T. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**. v. 34, p. 131 – 139, 2012.

ÁLVAREZ-AYUSO, E. *et al.* Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 154, n. 1–3, p. 175–183, jun. 2008.

ALVES, A. V. *et al.* Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 103–113, ago. 2014.

ALY, Z. *et al.* Aqueous leachability of metakaolin-based geopolymers with molar ratios of Si/Al = 1.5–4. **Journal of Nuclear Materials**, v. 378, n.2, p. 172-179, aug 2008.

AMRAN, Y. H. M. *et al.* Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119679, abr. 2020.

ANDERSON, D. J.; SMITH, S. T.; AU, F. T. K. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 20–28, ago. 2016.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. Editora Pini. São Paulo, 1992.

ANEPAC. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **Perspectivas para o Setor de Agregados**. Disponível em <https://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: outubro de 2020.

ANTONI, J. S.; SATRIA, J.; HARDJITO, D. Effect of Variability of Fly Ash Obtained from the Same Source on the Characteristics of Geopolymer. **MATEC Web of Conferences**, v. 97, p. 01026, 2017.

ANUNCIACÃO, E. B. B. **Formulação de massas cerâmicas para porcelanas elétricas utilizando resíduos oriundos de corpos e fusíveis**. 2013. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2013. APOLONIO, P. H. *et al.* Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. **Cerâmica**, v. 66, n. 378, p. 172–178, jun. 2020.

APRIANTI, E. *et al.* Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176–187, 15 jan. 2015.

AREDES, F. G. M. *et al.* Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. **Ceramics International**, v. 41, n. 6, p. 7302–7311, jul. 2015.

ASSI, L.N., EDDIE DEEVER, E., ZIEHL, P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. **Constr. Build. Mater.** v. 167, p. 372-380, abr. 2018.

ARIOZ, E.; ARIOS, O.; KOCKAR, O. M. Leaching of F-type fly Ash Based Geopolymers. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 1114–1120, 2012.

ATS ELÉTRICA. **Isoladores de Porcelana**. Disponível em: <http://www.atseletrica.com.br/isoladores-porcelana.php>. Acesso em 04 nov. 2016.

AUSTIN, S.; ROBINS, P.; PAN, Y. Shear bond testing of concrete repairs. **Cement and concrete research**, v. 29, n. 7, p. 1067–1076, 1999.

AZEVEDO, A. G. de S. *et al.* Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na_2O e Na_2SiO_3 . **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p. 143–151, abr. 2017.

AZEVEDO, A. G. DE S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, n. 371, p. 388–396, set. 2018.

BAKHAREV, T. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1233–1246, jun. 2005.

BALAGURU, P. N.; KURTZ, S.; RUDOLPH, J. **Geopolymer for repair and rehabilitation of reinforced concrete beams**. 1997. Disponível em https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/REINFORC.pdf. Acesso em 27 ago. 2017

BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. Air permeability, physical and chemical properties from recycled plaster. In: Inter American Conference on Non-Conventional Materials And

Technologies in Eco-Construction and Infrastructure, 1., 2003, João Pessoa. **Anais... .** João Pessoa: IAC-NOCMAT, 2003. p. 1-

BAŠČAREVIĆ, Z. *et al.* Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers. **Materials and Structures**, v. 48, n. 3, p. 683–697, mar. 2015.

BERNAL S. A. *et al.* Durability and Testing – Degradation via Mass Transport. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Alkali Activated Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 13, cap. 9, p. 223-276. 2014a.

BERNAL, S. A. *et al.* Other Potential Applications for Alkali- Activated Materials. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Alkali Activated Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 13, cap. 12, p.339-379. 2014b

BEZERRA I. *et al.* Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais 129 ativados alcalinamente, 2013 - **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, V.8.2, p.101 – 105.

BEZZERRA, D. C. **Revestimento de isoladores elétricos utilizando borracha de silicone/alumina trihidratada/nanosílica**. 2014. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2014.

BHUTTA, A. *et al.* Pull-out behavior of different fibers in geopolymer mortars: effects of alkaline solution concentration and curing, **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, 2017.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agro-industriais**. 2008. 280f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BILLONG, N.; KINUTHIA, J.; OTI, J. *et al.* Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin (MK) and Rice Husk Ash (RHA): Effect on tensile strength and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 307–313, 2018.

BINICI, H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1191–1197, jun. 2007.

BOCA SANTA, R. A. A.; SOARES, C.; RIELLA, H. G. Geopolymers with a high percentage of bottom ash for solidification/immobilization of different toxic metals. **Journal of Hazardous Materials**, v. 318, p. 145–153, nov. 2016.

BORGES, P. H. R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153–168, 2014.

BORTNOVSKY, O. *et al.* Metal Ions as Probes for Characterization of Geopolymer Materials. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 9, p. 3052–3057, set. 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 ago. 2010a.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de Dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 dez. 2010b.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 04 set. 2016.

BRICE, D. G. *et al.* Conclusions and the Future of Alkali Activation Technology. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Alkali Activated Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. v. 13, cap. 13, p. 381-388.

BUFALO. **Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos Produto: Soda Caustica em Escamas**. Disponível em: <http://www.produtosbufalo.com.br/site/pdfs/fispqs/FB%200014%20-FICHA%20SEGURAN%C3%87A%20-%20soda%20c%C3%A1ustica.pdf>. Acesso em 01 nov. 2016.

CALLIGARIS, G. A. *et al.* Assessing the pozzolanic activity of cements with added sugar cane straw ash by synchrotron X-ray diffraction and Rietveld analysis. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 44–50, nov. 2015.

CAMARINI, G.; SOARES, M. DA S. Propriedades de argamassas de cimento produzidas com resíduo de isolador de porcelana. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 1, 5 mar. 2018.

CAMPOS, M. A. **Estudo do reaproveitamento de Isoladores Elétricos de Porcelana como agregados em argamassas e concretos**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2009.

CAMPOS, M. A. **Análise microestrutural e das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos com isoladores Elétricos de porcelana**. 2011. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2011.

CAMPOS, M. A. *et al.* Reatividade Álcali-Agregado – Determinação da Expansão em Prismas de Concreto com Agregado de Porcelana. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC 2014. Teresina/PI. **Anais...** 4 p., 2014.

CAMPOS, M. A.; PAULON, V. A. Utilização de agregados alternativos de isoladores elétricos de porcelana em concretos. **Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo**, v. 7, n. 1, p. 30–43, 2015.

CAMPOS, M. A. *et al.* Argamassas com Agregados Alternativos: Potencialidade do emprego de areia de Descarte de Fundição e Isoladores Elétricos de Porcelana. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 54384–54404, 2020.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de Geopolímeros utilizando Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2013. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho, Ilha Solteira, São Paulo, 2013.

CASTEL, A.; FOSTER, S. J. Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 48–53, jun. 2015.

CESARI, F. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

CETESB. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmicas Branca e de Revestimentos**. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/ceramica.pdf>. Acesso em outubro de 2020.

CHEN, Y.; HAN, F.; WU, L. Leaching of Lead from Geopolymer Prepared by Waste Acid Residue. **Procedia Engineering**, v. 102, p. 395–398, 2015.

CHINDAPRASIRT, P.; CHALEE, W. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 303–310, jul. 2014.

CHOI, W.-H.; LEE, S.-R.; PARK, J.-Y. Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1766–1771, maio 2009.

COLANGELO, F. *et al.* Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 266–272, 1 fev. 2018.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra Brasileira de Grãos**. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos>. Acesso em janeiro de 2022.

COPPOLA, L.; COFFETTI, D.; CROTTI, E. Pre-packed alkali activated cement-free mortars for repair of existing masonry buildings and concrete structures, **Constr. Build. Mater.** v. 173, p 111-117, 2018.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 289–294, jan. 2009.

COSTA, D. L. *et al.* A. Estudo da adição de alumina em corpos geopoliméricos a base de metacaulim. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, 2013.

CREPALDI, C. Reciclagem de Porcelanas danificadas para confecção de placas de

concreto para estai ancora e escora para base reforçada de poste de distribuição.. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XIX, 2010, São Paulo. **Anais...** 2010. p. 1-7

CRIADO, M. *et al.* Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology. **Rheologica Acta**, v. 48, n. 4, p. 447-455, 2009.

CUSSON, D.; MAILVAGANAM, N. Durability of repair materials. **Concrete International-Design and Construction**, v. 18, n. 3, p. 34–38, 1996.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p. 1633-1656, 1991

DAVIDOVITS, J. Properties of Geopolymer Cements. **Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev, Ukraine, pp. 131-149. 1994.

DAVIDOVITS, J. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. In: Conference Géopolymère, 99., Saint-Quentin, 1999. **Proceedings...** Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 1999.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. 2^a edition, Saint-Quentin: Inst. Géopolymère, France. 2008.

DAVIDOVITS, J. **Why Akali-Activated Materials are NOT Geopolymers?** 2014. Disponível em http://www.geopolymer.com.br/pdf/why_alkali_activated_materials.pdf. Acesso em 27 ago. 2016

DASSEKPO, J.M.; ZHA, X.; ZHAN, J. Synthesis reaction and compressive strength behavior of loess-fly ash based geopolymers for the development of sustainable green materials. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 491-500, jun. 2017.

DEJA, J. Immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ in alkali-activated slag binders. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1971–1979, 2002.

DESOGUS, P. *et al.* Stabilization–solidification treatment of mine tailings using Portland cement, potassium dihydrogen phosphate and ferric chloride hexahydrate. **Minerals Engineering**, v. 45, p. 47–54, mai. 2013.

DUAN, P.; YAN, C.; LUO, W. A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 69–73, out. 2016.

DUXSON, P. Geopolymer precursor design In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009. cap. 3, p. 37-49.

DUXSON, P. *et al.* Understanding the relationship between geopolymer composition, microestrutura and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Phisiccochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n 1-3, p. 47-58, nov, 2005

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L. *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2006.

EEC Council Directive 98/83/EC of 3rd November 1998. On the quality of Water Intended for Human Consumption, Off J. L330./05/12/98.

ETTU, L. O. *et al.* Strength of Binary Blended Cement Composites Containing Cassava Waste Ash. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 4, 2013.

FABRO, F. *et al.* Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 4, n. 2, 2011.

FALCIGLIA, P. P.; ROMANO, S.; VAGLIASINDI, F. G. A. Stabilisation/Solidification of soils contaminated by mining activities: Influence of barite powder and grout content on γ -radiation shielding, unconfined compressive strength and ^{232}Th immobilization. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 174, p. 140–147, mar. 2017.

FAN, F. *et al.* Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 66–81, 2018.

FERNANDES, L. F. R.; GERALDO, R. H.; SALDEIRA, C. G.; CAMARINI, G. Avaliação da atividade pozolânica por meio da condutividade elétrica. In: 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos - TECSIC 2017. Campinas-SP, Brasil: Ago, 2017. ISSN: 2527-2667.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 3055–3065, 9 mai 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Chemical durability of geopolymers. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2009. cap. 9, p. 167-193.

FERREIRA, M. G. *et al.* **Utilização da sucata de isoladores cerâmicos para preenchedimento de gabiões**. [s.d.]. Disponível em http://www.unifia.edu.br/projetoRevista/edicoesanteriores/Marco11/artigos/gestao/gestao_foco_sucata_isoladores_ceramicos.pdf. Acesso em 10 jul. 2016

FODIL, D.; MOHAMED, M. Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 25–34, 10 ago. 2018.

FRANCK, R. *et al.* Utilização de rejeitos de isoladores de porcelana em concretos, em substituição parcial ou total dos agregados naturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004.

FRANCHIN, G. *et al.* Direct ink writing of geopolymeric inks. **Journal Eur. Ceram.**

Soc. v. 37, p. 2481-2489, 2017.

FRANCO, C. S. *et al.* Caracterização dos isoladores elétricos cerâmicos descartados pelas redes de distribuição de eletricidade e comparação com produtos similares sem uso. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Campos do Jordão. **Anais...** ABC, ABM, ABPol, 15 p., 2010

FRANÇA, F. C. C. *et al.* Vigas de concreto reparadas com argamassa geopolimérica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 18 out. 2018.

FRASSON, B. J.; PELISSER, F.; SILVA, B. V. Concrete crack repair analysis with metakaolin-based geopolymer cement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 2, p. 298–313, abr. 2020.

FREITAS, S. M. B. de A. **Adição de geomanta e tecido não tecido de polipropileno em cimentos geopoliméricos de pega rápida**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

GAO, X. *et al.* Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 410–419, out. 2017.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In: F. Pacheco-Torgal, F. *et al.*, (Ed.). **Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes**. Elsevier, Cambridge, Reino Unido, 2015, cap. 2, p. 19-47.

GERALDO, R. H. **Aglomerante Álcali-Ativado contendo Lodo de ETA e Cinza de Casca de Arroz**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2016.

GERALDO, R. H.; AGUIAR, R. C. De; CAMARINI, G. Thermal performance assessment of alkali-activated mortar boards. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101362, set. 2020.

GERALDO, R. H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. Mechanical properties of porcelain waste alkali-activated mortar. **Open Ceramics**, v. 8, p. 100184, dez. 2021.

GERALDO, R. H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 146–155, abr. 2017.

GERALDO, R. H. *et al.* Study of alkali-activated mortar used as conventional repair in reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 914–919, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.063

GERALDO, R. H.; SOUZA, J. D.; CAMPOS, S. C.; *et al.* Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building components. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 136–144, 2018.

GIANELLI, B. F. **Caracterização do efeito corona em isoladores poliméricos do tipo bastão submetidos à poluição salínica**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru/SP, 2009.

GLID, M. *et al.* Alkaline activation of metakaolinite-silica mixtures: Role of dissolved silica concentration on the formation of geopolymers. **Ceramics International**. v. 45, n 15, p. 12641-12650, out. 2017.

GOMES, L. B. *et al.* Processo de Fragmentação de Resíduos Cerâmicos Vitrificadas (RCV) Visando sua Incorporação em Concreto Refratário Sílico-Aluminoso. 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica, IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, Curitiba. **Anais...2012**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Lucas_Bonan_Gomes/publication/263345958_Processo_de_Fragmentacao_de_Residuos_Ceramicos_Vitrificados_RCV_visando_sua_Incorporacao_em_Concreto_Refratario_Silico-Aluminoso/links/02e7e53b2f4d387a54000000.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 618–626, out. 2014.

GRANDES CONSTRUÇÕES. Projeto australiano inova ao usar o concreto livre de cimento. Disponível em: <http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/index.php?option=com_contenido&task=viewmaterial&id=1438>. Acesso em 09 de agosto de 2016.

GUADES, E. J. Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 484–493, 2016.

GUINEA, G. V. *et al.* The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1961–1970, dez. 2002.

GUO, X.; SHI, H.; DICK, W. A. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 2, p. 142–147, fev. 2010.

HAJIMOHAMMADIA, A. *et al.* Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H₂O₂: The impact of mix design. **Materials & Design**. v. 130, p. 381-391, set. 2017.

HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; RANGAN, B. *et al.* On the Development of Fly Ash-based Geopolymer Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 6, p. 467-472, 2004.

HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 704–728, jun. 2019.

- HE, J. *et al.* The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud–fly ash admixture: a comparative study. **Constr. Build. Mater.** v 30, p. 80–91, 2012.
- HE, J. *et al.* Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 108–118, mar. 2013.
- HE, J. *et al.* Preparation and properties of self-compacting alkali-activated slag repair mortar. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 119034, ago. 2020.
- HELENE, P.R, L. **Manual para Reparo, Reforço e proteção de Estruturas de Concreto.** São Paulo: PINI, 1992.
- HIGASHIYAMA, H. *et al.* Efficiency of ground granulated blast-furnace slag replacement in ceramic waste aggregate mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 49, p. 43–49, maio 2014.
- HOSAN, A.; HAQUE, S.; SHAIKH, F. Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. **Journal of Building Engineering**, v. 8, p. 123–130, dez. 2016.
- HU, S. *et al.* Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 3, p. 239–244, mar. 2008.
- HUSEIEN, G. *et al.* Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 54–74, dez. 2017.
- HUSEIEN, G. F. *et al.* Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1229–1240, out. 2016.
- HUSEIEN, G. F. *et al.* Evaluation of alkali-activated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 78–92, jun. 2019.
- HWANG, C. L.; HUYNH, T. P. Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1–9, 30 dez. 2015.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a Economia Mineral Brasileira 2015.** Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>. Acesso em 08 set. 2016.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em Números.** Disponível em: <https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/>. Acesso em agosto 2020.
- IOPPI, P. R.; PRUDÊNCIO, L. R.; IRIYAMA, W. J. Estudo de Absorção Inicial de Substrato de Concreto: Metodologias de Ensaio e Influência na Aderência das Argamassas de Revestimento. **I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas.** Escola de Engenharia Civil. UFG – ANTAC. Goiânia, Agosto, 1995.

IQBAL, Y.; LEE, W.E. Microstructural Evolution in Triaxial **Porcelain**. **Journal of The American Ceramic Society**, v. 83, n. 12, pp. 3121-3127, 2000.

IZQUIERDO, M. *et al.* Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. **Journal of Hazardous Materials**, v. 166, n. 1, p. 561–566, jul. 2009.

JAMIL, M. *et al.* Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185–198, dez. 2016.

JAYA, N. A. *et al.* Correlation between pore structure, compressive strength and thermal conductivity of porous metakaolin geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118641, jun. 2020.

JESUS, A. M. de. **Utilização de Lodo de Estação de Tratamento de Água para Produção de Geopolímeros**. 2018. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

JINDAL, B. B. Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116644, dez. 2019.

JOSEPH, B.; MATHEW, G. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. **Scientia Iranica**, v. 19, n. 5, p. 1188–1194, out. 2012.

JUAN, A. *et al.* O. Re-use of ceramic wastes in construction. In: **Ceramic Materials**, p. 197-214, 2010.

KAMSEU, E. *et al.* Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3050–3060, jan. 2017.

KANG, S. P.; KWON, S. J. Effects of red mud and Alkali-Activated Slag Cement on efflorescence in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 459–467, fev. 2017.

KANI, E. N.; ALLAHVERDI, A.; PROVIS, J. L. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 25-33, 2012.

KARA, I. *et al.* Study on the performance of metakaolin based geopolymer for Mn(II) and Co(II) removal. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 184–193, set. 2018.

KAUR, Kamaldeep; SINGH, Jaspal; KAUR, Manpreet. Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 188–192, 2018.

KOMLJENOVIC, M.; BAŠČAREVIC, Z.; BRADIĆ, V. Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Geopolymers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1/3, p. 35-42, 2010.

KOU, S. C.; POON, C. S. Effects of different kinds of recycled fine aggregate on properties of rendering mortar. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 2, n. 1, p. 43–57, mar. 2013.

KOVALCHUK, G. U.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II. **Fuel**, v. 86, p. 315-322, feb. 2007.

KRAMAR, S.; ŠAJNA, A.; DUCMAN, V. Assessment of alkali activated mortars based on different precursors with regard to their suitability for concrete repair. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 937–944, 15 out. 2016.

LAN, T. *et al.* Mixed precursor geopolymer synthesis for removal of Pb(II) and Cd(II). **Materials Letters**, v. 274, p. 127977, set. 2020.

LEE, S.; VAN RIESSEN, A.; CHON, C. M. Benefits of Sealed-Curing on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymers. **Materials**, v. 9, n. 7, p. 598, 20 jul. 2016.

LI, M.; ZHI, X. L.; YAO, A. L. Study on the slag based cement concrete pavement repair material. **Mater. Rep. B.** v. 28, p. 124-127, 2014.

LI, N. *et al.* Composition design and performance of alkali-activated cements. **Materials and Structures**, v. 50, n. 3, p. 178, 11 maio 2017.

LIMA, V. H. M., FERREIRA, G. C. Utilização do Resíduo de Isoladores Elétricos de Porcelana como Aglomerante (Finos) em Argamassas de Revestimento e Assentamento. In: XX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP. Campinas/SP. **Anais...** 1 p., 2012.

LINTZ, R. C. C. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adições de isoladores elétricos de porcelana em substituição ao agregado graúdo. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 34., 2008, Santiago. **Anais...** Santiago: ASAE, 2008.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 7–18, set. 2015.

LOKUGE, W. *et al.* Design of fly ash geopolymer concrete mix proportions using Multivariate Adaptive Regression Spline model. **Constr. Build. Mater.** v. 166, p. 472-481, mar 2018.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo.** 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2015.

LONGHI, M. A. *et al.* Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 265–272, 2016.

LUCAS, J. *et al.* The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance. **Materials & Design**, v. 91, p. 155–164, fev. 2016.

LUUKKONEN, T. *et al.* One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 21–34, jan. 2018.

LUKOVIC, M. *et al.* Micromechanical study of the interface properties in concrete repair systems. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 12, p. 320-339, dez 2014.

MA, Y.; YE, G. The shrinkage of alkali activated fly ash. **Cement and Concrete Research**. v. 68, p. 75-82, fev. 2015.

MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v. 24, n. 2, p. 79–87, jun. 2009.

MALEKI, A. *et al.* A green, porous and eco-friendly magnetic geopolymer adsorbent for heavy metals removal from aqueous solutions. **J. Cleaner Prod.** v. 215, p. 1233-1245, apr. 2019.

MALONE, P.G.; RANDALL, C. A. J. **Potential Applications of Alkali-Activated Alumino-Silicate Binders in Military Operations**. Department of the Army: Assistant Secretary of the Army (R&D). Washington, DC, 40 p. 1986.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1994. 456 p. v. 2.

MANCINI, S. D. *et al.* Materiais Descartados no Setor Elétrico: Perspectivas de Reutilização e Reciclagem. In: The 8th Latin-American congress on electricity generation and transmission - CLAGTEE. **Anais...** 9p. 2009.

MARTINOLA, G.; MEDA, A.; PLIZZARI, G.A. Strength the ning and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 731–739, 2010.

MARTINS, A. R. **Efeito da cura térmica e de cimentos com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobertura**. 2001. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MAZZA, S. de C. M. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland**. 2010. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, 2010.

MEDEIROS, M. H. F de.; HELENE, P.; SELMO, S. Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2527–2533, jul. 2009.

MEDEIROS, M. H. F de; SELMO, S. M.S. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação : comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, EPUSP. 21 p. 2003

MENNA, C. *et al.* Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members. **Composites Part B: Engineering**, v. 45, n. 1, p. 1667–1676, fev. 2013.

MEDINA, C. *et al.* Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 480–486, fev. 2016.

MEJÍA, J. M.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MONTES, C. Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 133–139, abr. 2016.

MEHTA, P.K. **Rice husk ash - A unique supplementary cementing material**. In: Advances in concrete technology. CANMET. Ottawa, 1992, p. 407-431.

MEHTA, A., SIDDIQUE, R. Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. **Constr. Build. Mater.** v. 150, p. 792-807, set 2017.

MESGARI, S.; AKBARNEZHAD, A.; XIAO, J. Z. Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117571, mar. 2020.

MILHOMEM, P. M.; SILVA, J. M.; COSTA, P. S. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUO DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 1, 7 nov. 2017.

MINOCHA, A. K.; JAIN, N.; VERMA, C.L. Effect of inorganic materials on the solidification of heavy metal sludge. **Cement and Concrete Research**, v. 33 p. 1695–1701, 2003.

MIRZA, J. *et al.* Preferred test methods to select suitable surface repair materials in severe climates. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 692–698, jan. 2014.

MOBILI, A. *et al.* Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 198–210, out. 2016.

MOMAYEZ, A. *et al.* Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 748–757, 1 abr. 2005.

MONTEIRO, R. R.; SABIONI, A. C. S.; DA COSTA, G. M. Preparation of mullite from topaz. **Cerâmica**, v. 50, n. 316, p. 318–323, 2004.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. A Ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 1, p. 47–55, 22 jun. 2011.

- MUDULI, R.; MUKHARJEE, B. B. Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 398–414, 2019.
- NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. **Materials & Design**, v. 57, p. 667–672, maio 2014.
- NGUYEN, K. T. *et al.* Investigation on properties of geopolymer mortar using preheated materials and thermogenetic admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 146–155, 2017.
- NGUYEN, T. T. *et al.* A micromechanical investigation for the effects of pore size and its distribution on geopolymer foam concrete under uniaxial compression. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 209, p. 228–244, mar. 2019.
- NIMWINYA, E. *et al.* A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 128–134, abr. 2016.
- NUNES, V. A.; BORGES, P. H. R.; ZANOTTI, C. Mechanical compatibility and adhesion between alkali-activated repair mortars and Portland cement concrete substrate. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 569–581, ago. 2019.
- NURUDDIN, M. F.; DEMIE, S.; SHAFIQ, N. Effect of mix composition on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 38, n. 11, p. 1196–1203, nov. 2011.
- NĚMEČEK, J.; ŠMILAUER, V.; KOPECKÝ, L. Nanoindentation characteristics of alkali-activated aluminosilicate materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 163–170, 1 fev. 2011.
- OGLIARI, C.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Lixiviação em Argamassas Produzidas com Agregados Reciclados. **IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Campo Grande, E-lecs, 2007.**
- OKOYE, F. N.; DURGAPRASAD, J.; SINGH, N. B. Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete. **Constr. Build. Mater.** v. 98, p. 685–691, nov. 2015.
- OLIVEIRA, E. M. *et al.* Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2–3, p. 196–203, 2004.
- ONUTAI, S. *et al.* Fast microwave syntheses of fly ash based porous geopolymers in the presence of high alkali concentration. **Ceram. Int.** v. 42, p. 9866–9874, 2016.
- OSÓRIO, P. D. L. **Concepção de um Saferoom Anti-Tornado em Betão Geopolimérico.** 2006. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho – Escola de Engenharia, Guimarães, Braga, Portugal, 2006.

PACHECO-TORGAL, F. *et al.* An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 1053–1058, nov. 2012.

PACHECO-TORGAL, F.; GOMEZ, C. J.; JAJALI, S.. Durability and environmental performance of alkali-activated tungsten mine waste mud mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 9, p. 897–904, 2010.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. **Outstanding aspects on the use of rice husk ash and similar agrowastes in the preparation of binders**, In: Proc First Pro-Africa Conf: Non conventional building materials based on agroindustrial wastes. Pirassununga, 18–19 Oct 2010, São Paulo, Brazil.

PEREIRA, A. M. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira/SP, 2014.

PEREIRA, A. M. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 227–238, mar. 2015.

PEREIRA, D. C. de. **Desenvolvimento de isolantes cerâmicos a base de geopolímeros de silicato de alumínio com resíduos de madeira para controle da densidade e porosidade após queima**. 2019. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2019.

PEREIRA, H. R. S. *et al.* Análise Comparativa da Resistência de Aderência (Sob Tração) dm Argamassas Sustentáveis. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais** 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil

PEREIRA, V. M. **Permeabilidade ao ar do concreto**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PEREIRA, V. M.; CAMARINI, G. Air Permeability of Concrete by Thenoz Method. **Advanced Materials Research**, v. 224, p. 132–136, abr. 2011.

PERNÁ, I., HANZLÍČEK, T., SUPOVA, M. The identification of geopolymer affinity in specific cases of clay materials. **Appl. Clay Sci.** v. 102, p. 213-219, dez. 2014.

PHOO-NGERNKHAM, T. *et al.* Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 1–8, ago. 2015.

PHOO-NGERNKHAM, T. *et al.* Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118543, jun. 2020.

PINTO, A. T. **Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina de metacaulino**. 2004. 400 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2004.

PIVÁK, A. *et al.* Low-Carbon Composite Based on MOC, Silica Sand and Ground Porcelain Insulator Waste. **Processes**, v. 8, n. 7, p. 829, 13 jul. 2020.

PONTES, F.S.; CAMARINI, G.; GERALDO, R.H. Analysis of sílica dissolution from rice husk ash for geopolymer production: the storage time, in: **XXIV Congresso de Iniciação Científica da Unicamp**, 2016, p. 1, <http://doi.org/10/19146/pibic-2016-51919>

PORTELLA, K. F. *et al.* Secondary recycling of electrical insulator porcelain waste in Portland concrete structures: determination of the performance under accelerated aging. **Cerâmica**, v. 52, n. 323, p. 155–167, 2006.

PPC SANTANA. **Isoladores de Porcelana**. Disponível em: <http://www.hotfrog.com.br/companhia//isoladores-de-porcelana-37577>. Acesso em 04 nov. 2016.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, jan. 2014.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, mar. 2017.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L, *et al.* Historical Aspects and Overview. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Alkali Activated Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. v. 13, cap. 2, p. 11-57.

PROVIS, J. L, *et al.* Binder Chemistry – Low-Calcium Alkali- Activated Materials. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Alkali Activated Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. v. 13, cap. 4, p. 93-123.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Introduction to geopolymers. In: **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications**. 1º Ed. 454 f. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge, Reino Unido, 2009. [ISBN 978 1 84569 449 4].

PU, S. *et al.* Influence of sepiolite addition on mechanical strength and microstructure of fly ash-metakaolin geopolymer paste. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 6, p. 2470–2477, nov. 2016.

PUERTAS, F. *et al.* Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1625–1632, 2000.

QUARESMA, G. H. **Avaliação do Desempenho de Isoladores Elétricos de Porcelana através do Uso de Recobrimentos Poliméricos Hidrofóbicos**. 2018. 146 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Materiais) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2018.

RAHEEM, S. B.; ARUBIKE, E. D.; AWOGBORO, O. S. **Effects of Cassava Peel Ash (CPA) as Alternative Binder in Concrete**. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*, v 1, p. 27-32, set 2015.

RAMUJEE, K., POTHARAJU, M., 2017. Mechanical properties of geopolymer concrete composites. **Mater. Today Proc.** v. 4, n. 2, Part A, p. 2937-2945, 2017.

RASHID, M. A.; MANSUR, M. A.; PARAMASIVAM, P. Correlations between mechanical properties of high-strength concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 230–238, 2002.

RATTANASAK, U.; PANKHET, K.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, v. 18, n. 3, p. 364–369, jun. 2011.

REIG, L. *et al.* Alkaline Activation of Ceramic Waste Materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 4, n. 4, p. 729–736, dez. 2013.

REIG, L. *et al.* 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, jul. 2014.

REIG, L. *et al.* Compressive strength and microstructure of alkali-activated mortars with high ceramic waste content. **Ceramics International**, v. 43, n. 16, p. 13622–13634, nov. 2017.

REN, X.; ZHANG, L. Experimental study of interfacial transition zones between geopolymer binder and recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 749–756, abr. 2018.

RIBEIRO, A. **Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul/RS, 2015.

RIBEIRO, A.; SANTOS, V dos.; BRANDALISE, R. N. Resíduos de isoladores elétricos cerâmicos - caracterização e utilização em concretos. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. **Anais...2014**. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/31196>>. Acesso em: 08 set. 2016

ROCCO, C. G.; ELICES, M. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 76, n. 2, p. 286–298, jan. 2009.

RODRIGUES, T. M. C. G. **Argamassas e betões geopoliméricos: estado da arte e potencial de industrialização em Portugal**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.

RODRÍGUEZ, E. *et al.* Alternative concrete based on alkali-activated slag. **Materiales de Construcción**, v. 58, n. 291, p. 53–67, 2008.

ROSA JÚNIOR, A. L. R. Isoladores Cerâmicos. In: MORA, N, D.; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. (Org). **Materiais Elétricos: Compêndio De Trabalhos**. Foz do Iguaçu, 2010. p. 45-57, 2010.

SALAU, M. A.; IKPONMWOSA, E. E.; OLONADE, K. A. Structural Strength Characteristics of Cement-Cassava Peel Ash Blended Concrete. **Civil and Environmental Research**, v. 2, n. 2, 2012.

SANTOS FILHO, N. DOS; COSTA, C. O. F. Reciclagem e descarte de isoladores de média e alta tensão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVIII, 2005, Curitiba, Paraná. **Anais...** Curitiba: Grupo de Estudos de Impactos Ambientais, 2005. p. 1-7

SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 33–39, maio 2013.

SCHNEIDER, M. *et al.* Sustainable cement production—present and future. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 642–650, jul. 2011.

SHI, C.; QU, B.; PROVIS, J. L. Recent progress in low-carbon binders. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 227–250, ago. 2019.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117455, mar. 2020.

SENTHAMARAI, R.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 9–10, p. 910–913, out. 2005.

SENTHAMARAI, R.; MANOHARAN, P. D.; GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2413–2419, maio 2011.

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, 2013.

SHAH, K. W.; HUSEIEN, G. F. Bond strength performance of ceramic, fly ash and GBFS ternary wastes combined alkali-activated mortars exposed to aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 119088, ago. 2020.

SHASH, A. A. Repair of concrete beams – a case study. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 1, p. 75–79, fev. 2005.

SHEHAB, H. K.; EISA, A. S.; WAHBA, A. M. Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 560–565, nov. 2016.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; 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, jul. 2011.

SHIROMA, L. **Atividade Pozolânica de Resíduos de Isoladores de Porcelana em Matrizes Cimentícias**. 2016. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2016.

SIDDIQUE, S. *et al.* Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 246–255, fev. 2019.

SILVA, P.; SAGOE-CRENSSTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 512–518, 2007.

SILVA, F. M. *et al.* STUDY OF THE USE OF MORTAR FOR REPAIR AND STRUCTURAL REINFORCEMENT. p. 13, 2019.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117455, mar. 2020.

ŠKVÁRA, F. *et al.* Aluminosilicate polymers – influence of elevated temperatures, efflorescence. **Ceramics – Silikáty**, v. 53, n. 4, p. 276-282, 2009.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. **Relatório Anual 2020**. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf. Acesso em: setembro de 2022.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. **Resultados Preliminares de Dezembro 2020**. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: setembro de 2022.

SONG, L. *et al.* Novel low cost and durable rapid-repair material derived from industrial and agricultural by-products. **Ceramics International**, v. 43, n. 16, p. 14511–14516, nov. 2017.

SONGPIRIYAKIJ, S. *et al.* Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste. **Materials & Design**, v. 32, n. 5, p. 3021–3028, maio 2011.

SOUSA, F. J. P. *et al.* Estudo da viabilidade de obtenção de isoladores elétricos a partir de resíduo de esmaltação (Study of the viability for obtaining electric insulators from enameling waste). **Cerâmica**, v. 50, p. 217–224, 2004.

SOUZA, M. H. de; SOUZA, R. A. de Análise das Propriedades de uma Argamassa de Reparo de Base Acrílica. **Revista Técnico-Científica**, v. 1, 2017.

SPRINGKEL, M. M.; OZYILDIRIM, C. **Evaluation of high performance concrete overlays placed on Route 60 over Lynnhaven Inlet in Virginia**. No. FHWA/VTRC 01eR1. 2000.

STURM, P. *et al.* Synthesizing one-part geopolymers from rice husk ash. **Constr. Build. Mater.** v. 124 p. 961-966, 2016.

SUKMAK, P. *et al.* Sulfate Resistance of Clay-Portland Cement and Clay High-Calcium Fly Ash Geopolymer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 5, p. 04014158, maio 2015.

SUN, Z. *et al.* Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 281–287, dez. 2013.

TANG, S. W. *et al.* Recent durability studies on concrete structure. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 143–154, dez. 2015.

TASHIMA, M. M. *et al.* New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC). **Materials Letters**, v. 80, p. 50–52, ago. 2012.

TANOBE, É. S. O. de A. *et al.* Análise de desempenho e ciclo de vida de isoladores do sistema de distribuição de energia em ambientes de elevada agressividade. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 3, p. e34687, 31 dez. 2019.

TAYLOR, M.; TAM, C.; GIELEN, D. Energy efficiency and CO₂ emissions from the global cement industry. **Korea**, v. 50, n. 2.2, p. 61–7, 2006.

TEIXEIRA, O. G. *et al.* Mortar type influence on mechanical performance of repaired reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 372–383, ago. 2019.

TEMUJIN, J.; VAN RIESSEN, A.; MACKENZIE, K. J. D. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 10, p. 1906–1910, out. 2010.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: Durabilidade e desempenho ambiental. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.15, p.1-9, abril, 2010

TU DARMSTADT. **Klimafreundlicher Zementersatz (Substituto de cimento ecologicamente correto)**. Disponível em https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles_meldungen/archiv_2/2017/2017quartal1/einzelansicht_170560.de.jsp. Acesso em: outubro de 2020.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO_{2-e}) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Constr. Build. Mater.** v. 43, p. 125–130, 2013.

UMNIATI, B. S.; RISDANARENI, P.; ZEIN, F. T. Z. **Workability enhancement of geopolymer concrete through the use of retarder**. In: GREEN CONSTRUCTION AND ENGINEERING EDUCATION FOR SUSTAINABLE FUTURE: PROCEEDINGS OF THE GREEN CONSTRUCTION AND ENGINEERING EDUCATION (GCEE) CONFERENCE 2017. East Java, Indonesia: 2017Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5003516>>. Acesso em: 6 jun. 2021

VAN DEVENTER, J. S. J. *et al.* Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. **Journal of Hazardous Materials**, v. 139, n. 3, p. 506–513, jan. 2007.

VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1189–1200, 1999.

VASKE, N. R. **Contribuição ao estudo da argamassa com adição de sílica ativa em reforços de elementos comprimidos de concreto**. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VAZ, L. F. da C. **Estudo do efeito de adjuvantes em geopolímeros obtidos de resíduos de minas**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2011.

WAIJAREAN, N. *et al.* The effect of the Si/Al ratio on the properties of water treatment residue (WTR)-based geopolymers. **Key Engineering Materials**, v. 608, p. 289-294, 2014.

WANG, W. C.; WANG, H. Y.; LO, M. H. The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 224–229, jun. 2015.

WANG, Y. *et al.* Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118852, jan. 2020.

WAZIEN, A. Z. W. *et al.* Strength and Density of Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature for Use as Repair Material. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 133, p. 012042, jun. 2016.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M. A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; GALLEGO, N. C. A novel MK-based geopolymer composite activated with rice husk ash and KOH: Performance at high temperature. **Materiales de Construcción**, v. 67, ed. 326, p. 1–13, 2017 DOI: 10.3989/mc.2017.02316.

WONGSA, A. *et al.* Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 637–643, maio 2016.

WU, Y. *et al.* Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 930–949, nov. 2019.

XIE, T.; OZBAKKALOGLU, T. Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. **Ceramics International**, v. 41, n. 4, p. 5945–5958, 1 maio 2015.

XIYILI, H.; ÇETINTAŞ, S.; BINGÖL, D. Removal of some heavy metals onto mechanically activated fly ash: Modeling approach for optimization, isotherms, kinetics and thermodynamics. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, p. 288–300, jul. 2017.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International journal of mineral processing**, v. 59, n. 3, p. 247–266, 2000.

XU, N. *et al.* Preparation and properties of porous ceramic aggregates using electrical insulators waste. **Ceramics International**, v. 41, n. 4, p. 5807–5811, maio 2015.

XU, W.; LO, T. Y.; MEMON, S. A. Microstructure and reactivity of rich husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 541–547, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.005

Ye, N. *et al.* Co-disposal of MSWI fly ash and Bayer red mud using an one-part geopolymeric system, **J. Hazard. Mater.** 318, p. 70–78, 2016.

YUN, K. K.; CHOI, P. Causes and controls of cracking at bridge deck overlay with very-early strength latex-modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 53–62, abr. 2014.

YUSHENG Z. *et al.* Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer. **Journal of Hazardous Materials**, v. 143, p. 206–213, may, 2007.

YUSUF, M.O. *et al.* Strength and microstructure of alkali-activated binary blended binder containing palm oil fuel ash and ground blast-furnace slag. **Construction Building Materials**, 2014; 52: 504–10.

ZAMANABADI, N. S. *et al.* Ambient-cured alkali-activated slag paste incorporating microsilica as repair material: Effects of alkali activator solution on physical and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116911, dez. 2019.

ZANOTTI, C. *et al.* Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 307–316, jul. 2017.

ZEGARDŁO, B.; SZELĄG, M.; OGRODNIK, P. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 736–742, set. 2016.

ZHANG, H. Y. *et al.* Characterizing the bond strength of geopolymers at ambient and elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 40–49, abr. 2015.

ZHANG, M. *et al.* Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 373–382, out. 2016.

ZHANG, J. *et al.* Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 598–613, out. 2017a.

ZHANG, M. *et al.* Immobilization potential of Cr(VI) in sodium hydroxide activated slag pastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 321, p. 281–289, jan. 2017b.

ZHANG, Y.; LI, Z.; DING, Z. **Development of sustainable cementitious materials.**

Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, p. 55 – 75, 2004.

ZHANG, Z. *et al.* Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 30–41, out. 2014.

ZHANG, P. *et al.* A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 152, p. 79–95, 2018.

ZHENG, L.; WANG, W.; SHI, Y. The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer. **Chemosphere**, v. 79, n. 6, p. 665–671, abr. 2010.

ZHOU, F. P.; LYDON, F. D.; BARR, B. I. G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 1, p. 177–186, 1995.

ZHU, H. *et al.* Durability of alkali-activated fly ash concrete: Chloride penetration in pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 51–59, ago. 2014.

ZHUANG, X. Y. *et al.* Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 253–267, jul. 2016.

ZOU, Y.; YANG, T. Rice husk, rice husk ash and their applications. In: CHEONG, L. Z.; XU, X. **Rice bran and rice bran oil**. Champaign: AOCS Press, 2019. Cap. 9, p. 207-246, 2019.

ZUDA, L. *et al.* Mechanical and hydric properties of alkali-activated aluminosilicate composite with electrical porcelain aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 4, p. 266–273, abr. 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Ensaios Preliminares

Neste apêndice, são apresentados os aspectos pertinentes ao programa experimental preliminar que embasou toda a metodologia anteriormente proposta. Esta fase de ensaios preliminares foi dividida em quatro etapas.

Inicialmente, na 1ª Etapa, procedeu-se com a preparação das misturas para avaliar o desenvolvimento do RP como agregado e o tempo de dissolução. Na 2ª Etapa, foram avaliadas a consistência e a resistência mecânica de argamassas produzidas com aditivo superplastificante em duas dosagens. A 3ª Etapa consistiu na adoção dos ensaios de resistência mecânica das argamassas para se avaliar os efeitos da idade (1 e 7 dias) em relação ao uso de aditivos. Finalmente, na 4ª Etapa, avaliou-se o desempenho mecânico das argamassas produzidas em três diferentes tempos de dissolução: 45 min, 30 min e 30 min + 48 h de repouso.

A.1 - 1ª Etapa

As misturas experimentais foram propostas para avaliar os seguintes aspectos:

- a) Definir o processo de produção de silicato de sódio alternativo (SS), principalmente o tempo de mistura;
- b) Avaliar a possibilidade do uso do RP em argamassas álcali-ativadas.

A Tabela A.1 apresenta as composições de todos os materiais utilizados nas misturas. Para promover a interpretação da identificação das misturas, tem-se o seguinte exemplo: XYZ sendo X a identificação do material; Y a proporção do material e Z o tempo de dissolução. Portanto, a mistura ARP₁₀₀30, indica que se trata de uma mistura composta exclusivamente por ARP com 30 min de dissolução. As massas de NaOH e SCA, utilizadas para a preparação do SS, foram 104 g e 81 mg respectivamente

Tabela A.1 - Caracterização das misturas

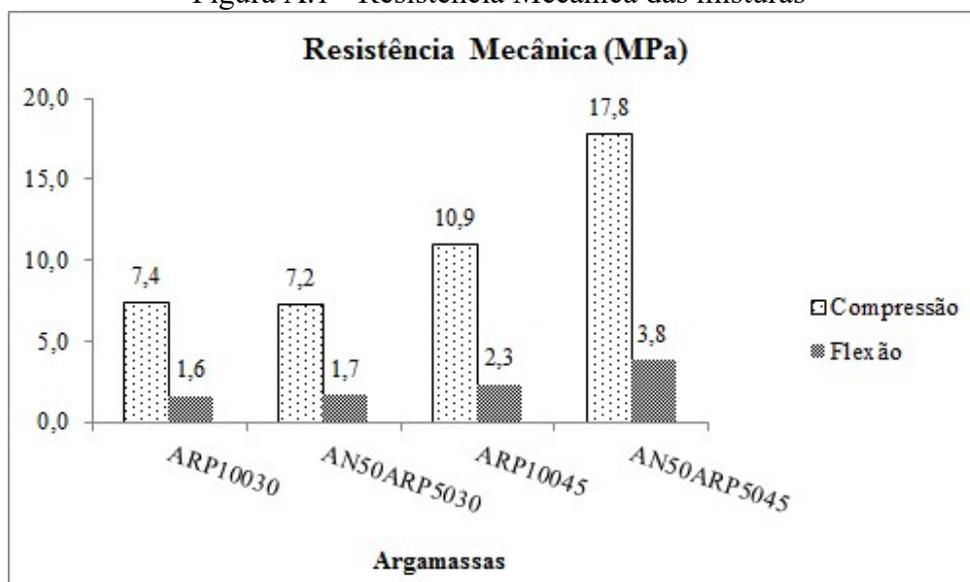
Identificação	Metacaulim (g)	Água (mL)	Tempo Dissolução (min)	Areia de Porcelana (g)	Areia Natural (g)	Cura (dias)
ARP ₁₀₀ 30	355	230	30	1065	-	7
AN ₅₀ ARP ₅₀ 30				532,5	532,5	
ARP ₁₀₀ 45			45	1065	-	
AN ₅₀ ARP ₅₀ 45				532,5	532,5	

Legenda: ARP: Areia de Porcelana; AN: Areia Natural

Fonte: autor

Os resultados de resistência mecânica das misturas preparadas com superplastificante estão representados na Figura A.1.

Figura A.1 - Resistência Mecânica das misturas



Fonte: Autor

Observa-se resistência à compressão mais elevada quando o processo de dissolução é de 45 min e a mistura apresenta uma composição de 50% ARP e 50% AN (AN₅₀ARP₅₀45). Corrobora com tal informação, Campos (2009) ao citar que a melhor proporção de substituição de areia natural por RP é entre 50 e 70% em argamassas convencionais.

Da mesma maneira, quando se utiliza ARP como único agregado miúdo (ARP₁₀₀30 e ARP₁₀₀45), o resultado de resistência mecânica é de 47% superior quando o procedimento de dissolução é de 45 min em relação aos 30 min.

Nota-se também um ganho de resistência à tração na flexão, quando o tempo de dissolução é de 45 min.

Portanto, diante dos resultados fica evidente a possibilidade de se utilizar o RP na granulometria estudada como agregado miúdo. Os dados indicam também a viabilidade de se encontrar proporções ideais de composição entre AN e ARP.

A.2 - 2ª Etapa

A 2ª Etapa avaliou o desempenho de argamassas álcali-ativadas em termos de consistência e resistência mecânica. As argamassas foram moldadas com aditivo superplastificante em diferentes dosagens. A Tabela A.2 apresenta a composição das misturas com aditivo superplastificante. Para promover a interpretação da identificação das misturas,

tem-se o seguinte exemplo: XYZS1 sendo X a identificação do material; Y a proporção do material; Z o tempo de dissolução; S a presença de aditivo superplastificante e 1 ou 2 a dosagem de aditivo. Portanto, a mistura ARP₁₀₀45S1, indica que se trata de uma mistura composta exclusivamente por ARP com 45 min de dissolução, com a adição de 2,7 g de aditivo.

Tabela A.2. Descrição das misturas com aditivo superplastificante

Identificação	Metacaulim (g)	Água (mL)	Tempo Dissolução (min)	Areia de Porcelana (g)	Areia Natural (g)	Aditivo (g)	
AN ₁₀₀ 30S1	355	230	30	-	1065	2,7	
ARP ₁₀₀ 301						2,7	
ARP ₁₀₀ 45S2			45	1065	-		5,4
ARP ₁₀₀ 45S1							2,7

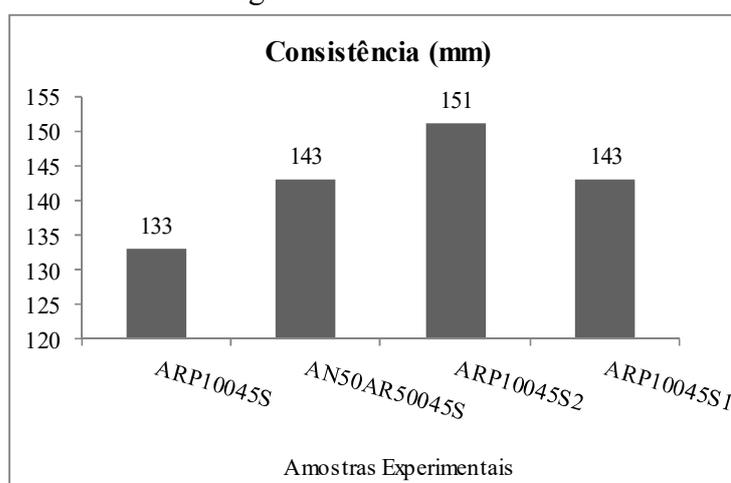
Legenda: ARP: Resíduos de Porcelana; AN: Areia Natural; S: Aditivo; 1 ou 2: Dosagem do aditivo
Fonte: Autor

A.2.1 - Consistência das argamassas com aditivo

No estado plástico a argamassa deve apresentar boa trabalhabilidade, medida pela consistência, para promover o uso prático na construção civil.

A Figura A.2 apresenta os resultados de consistência de algumas argamassas. Para a obtenção dos resultados a trabalhabilidade foi avaliada utilizando-se a média dos valores de espalhamento na mesa de abatimento (*flow table*). Utilizou-se a mesa de consistência (*flow table*) (Figura 5.9), seguindo as prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2002).

Figura A.2. Consistência



Fonte: Autor

Não foi observado melhora significativa nos resultados de consistência quando foram utilizados aditivos superplastificantes, sendo observado um pequeno aumento quando se

utilizou o aditivo superplastificante (ARP₁₀₀45S2 e ARP₁₀₀45S1), tendo sido, conforme esperado, o melhor resultado ao utilizar 1% de aditivo em relação à massa sólida da mistura (SCA +NaOH+MK).

Nota-se também que os valores de consistência são bem inferiores quando comparados com o resultado da mistura R obtida no estudo de Geraldo (2016), de 185 mm, no qual não se utilizou nenhum tipo de aditivo.

Porém, merece destaque os resultados de 133 e 143 mm de consistência das argamassas ARP₁₀₀45, ARP₁₀₀45S1 e AN₅₀ARP₅₀45, respectivamente, que foram moldadas sem aditivo superplastificante e alcançaram resultados aproximados da argamassa ARP₁₀₀45S1, com aditivo em sua composição. Observa-se que a presença da areia natural nas argamassas promove ganho de trabalhabilidade, indicando a possibilidade de se preparar as misturas sem o aditivo superplastificante.

Originalmente, os aditivos superplastificantes são produzidos para influenciar na consistência de misturas preparadas com cimento Portland. Criado *et al.* (2009) recomendam que o uso de plastificantes tradicionalmente utilizados na produção de materiais à base de cimento Portland não produz qualquer tipo de resultado nos aglomerantes álcali-ativados, pois o meio altamente alcalino destrói a estrutura química dos plastificantes, sendo a melhoria de trabalhabilidade atribuída unicamente ao incremento de água na mistura. Palacios e Puertas (2005) explicam que os aditivos superplastificantes são estudados intensamente para misturas com cimento Portland e seus efeitos em outros aglomerantes, tais como escória álcali-ativada, têm recebido pouca atenção.

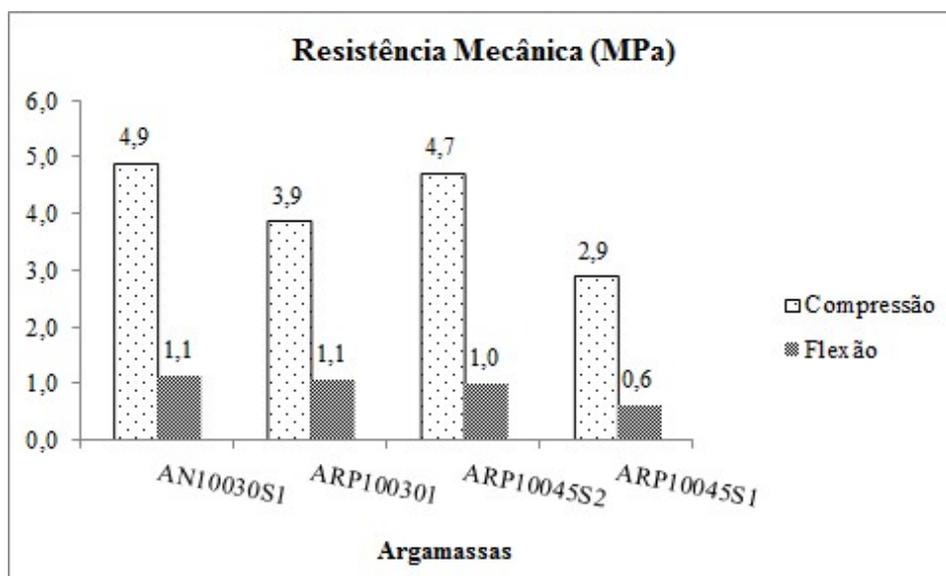
A.2.2 - Resistência Mecânica das argamassas com aditivo

Observa-se, na Figura A.3, os resultados de resistência mecânica para as misturas com aditivo superplastificante.

Nenhuma das misturas com aditivos atingiu os valores de resistência mecânica obtidos com as misturas sem aditivo (Figura A.1).

A quantidade (em massa) de aditivo superplastificante pouco influencia na resistência à compressão. AN₁₀₀30S1, ARPN₁₀₀30S1 e ARP₁₀₀45S1 são misturas moldadas com 0,5% de aditivo em relação à massa sólida e mantiveram praticamente o mesmo desempenho.

Figura A.3 - Resistência Mecânica aos 7 dias das misturas com aditivo



Fonte: Autor

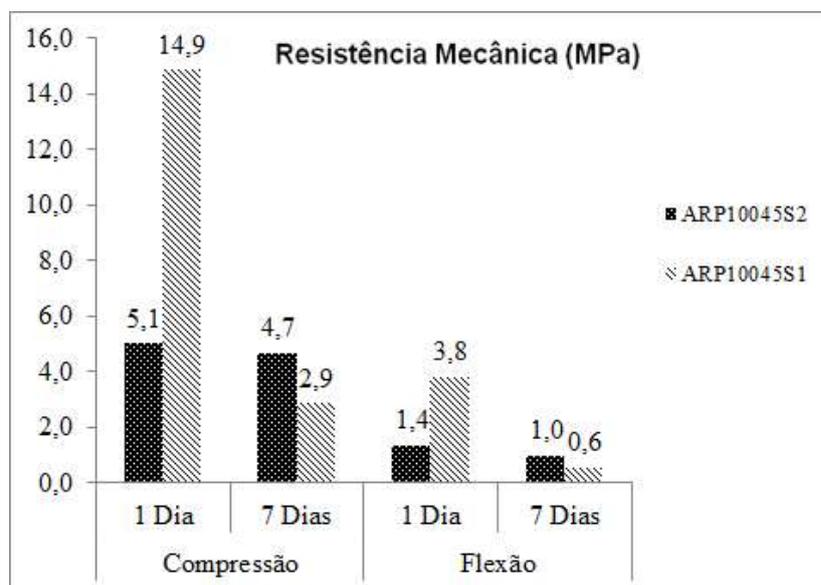
As melhores resistências mecânicas foram obtidas com as misturas AN₁₀₀30S1 e ARP₁₀₀45S1, que têm em sua composição AN e ARP como agregado miúdo respectivamente. Porém, os resultados, cujo valor máximo foi de 4,9 MPa, de uma maneira geral, não são suficientes para a produção de argamassas álcali-ativadas, tendo em vista que seria possível atingir valores superiores de resistência mecânica.

A.3 - 3ª Etapa

Nesta etapa, foram realizados ensaios de resistência à compressão de argamassas álcali-ativadas para avaliar o desempenho da utilização do aditivo superplastificante e o período de cura de 1 e 7 dias (Figura A.4). As argamassas avaliadas foram ARP₁₀₀45S1 e ARP₁₀₀45S2.

O tempo de cura é uma variável que demonstra que a resistência mecânica diminui bruscamente ao longo do tempo quando se utiliza aditivo superplastificante, principalmente quando o teor é de 0,5%, observado em ARP₁₀₀45S1 a 1 e 7 dias. Certamente, tal ocorrência se deve ao fato de que os aditivos utilizados comumente em concretos convencionais não são adequados para utilização em materiais álcali-ativados conforme enfatizado anteriormente.

Figura A.4 - Resistência Mecânica de 1 e 7 dias das misturas com aditivo



Fonte: Autor

A.4 - 4ª Etapa

Para avaliar o melhor tempo de dissolução na produção do SS foram comparados resultados de resistência à compressão de argamassas álcali-ativadas compostas por AN e RP (Tabela A.3). Os tempos de dissolução foram de 30 e 45 min. Além disso, comparou-se o tempo de repouso de 48 h da dissolução.

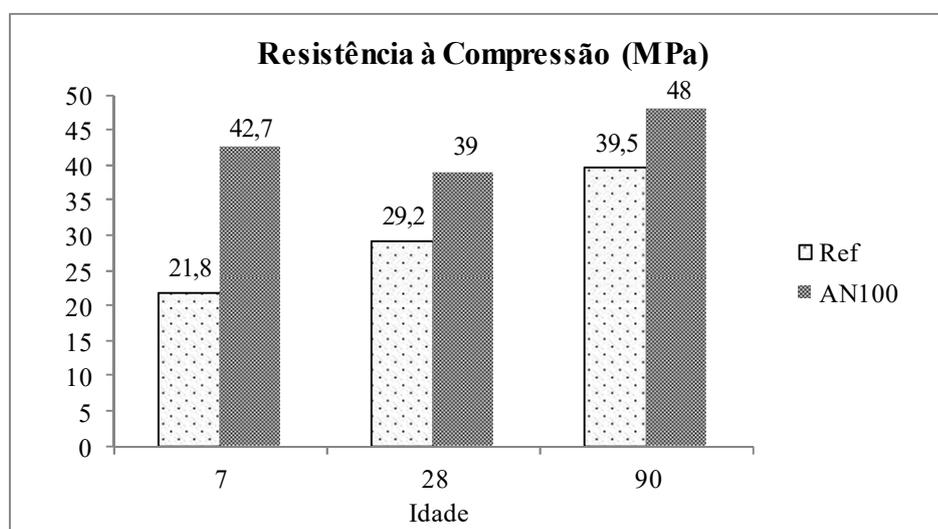
Tabela A.3 – Argamassas moldadas com diferentes tempos de dissolução

Argamassa	Tempo de Dissolução (min)	Composição
Ref*	30	SS, MK e AN
AN ₁₀₀	30 + 48 h de repouso	
ARP ₁₀₀	30 + 48 h de repouso	SS, MK e ARP
AN ₅₀ ARP ₅₀	45 30 + 48 h de repouso 45	SS, MK, AN e ARP

Fonte: Autor

* De acordo com GERALDO (2016)

A Figura A.5 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias das argamassas produzidas com tempo de dissolução de 30 min (Ref e AN₁₀₀). A única diferença entre as argamassas é o tempo de repouso da dissolução da argamassa A₁₀₀30 pelo período de 48 h.

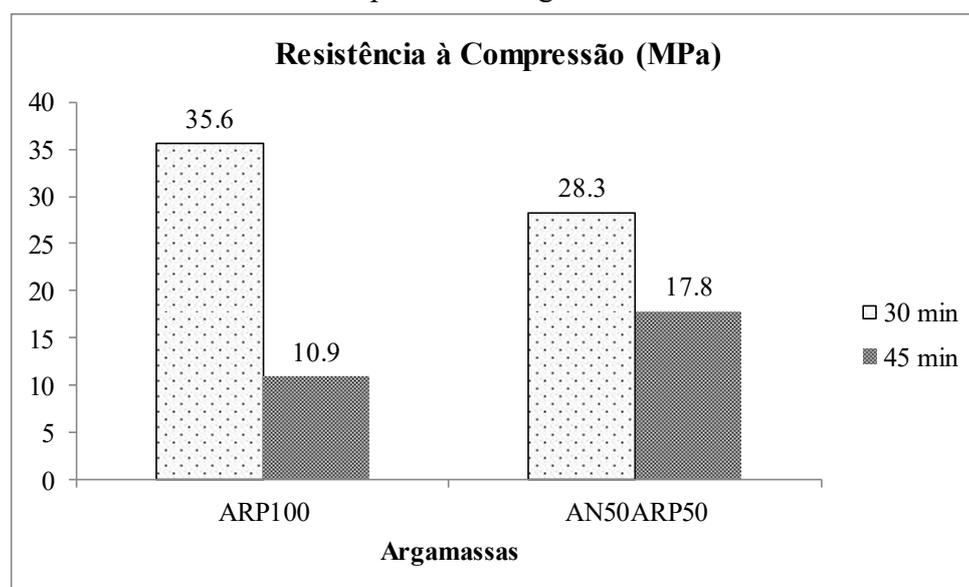
Figura A.5 – Resistência à Compressão das argamassas Ref e AN₁₀₀

Fonte: Autor

Os resultados evidenciam um ganho de resistência para as argamassas produzidas com 48 h de repouso (AN₁₀₀) em todas as idades cujo aumento foi de 96%, 33% e 21% aos 7, 21 e 90 dias, respectivamente.

Apesar de o tempo de dissolução de 45 min promover bons resultados, o tempo de reserva de 30 min acompanhado do repouso de 48 h se mostrou mais eficiente, garantindo melhores resultados de resistência à compressão aos 7 dias de idade (Figura A.6).

Figura A.6 – Resistência à Compressão de argamassas com 30 e 45 min de dissolução



Fonte: autor

Quando a mistura é composta exclusivamente por ARP (ARP₁₀₀) como agregado miúdo, um ganho de resistência acima do triplo, promovido pelo tempo de repouso de 48 h. Da mesma maneira, quando os agregados são AN e ARP, na proporção de 50% (AN₅₀ARP₅₀), o aumento é de 58%, também garantido pelo tempo de repouso de 48 h.

Diante do exposto, observa-se a viabilidade da utilização do RP em substituição parcial ao agregado miúdo convencional. Tem-se também a inviabilidade de utilização do aditivo superplastificante devido aos baixos valores de resistência mecânicas obtidas com a utilização desse material.

Portanto, a continuidade da pesquisa ocorrerá sem aditivos superplastificantes e o tempo para a produção do silicato de sódio alternativo, a partir da dissolução da sílica presente na SCA, ficou definido em 30 min e um tempo de repouso de 48 h.

APÊNDICE B - Tempos de Pega das Pastas

Tabela B.1 - Tempos de Início e Fim de Pega, Relação Água/Materiais secos

Pasta	Início	Diferença		Fim	Diferença		Água/Mat eriais secos*
		Pega (%)	Inicial		Pega (%)	Final	
Ref	140	-		190	-	50	0,65
P30	120	14		210	11	90	0,34
P50	100	29		201	6	101	0,26

Fonte: Autor

A relação Água/Materiais Secos foi obtida a partir da divisão da massa de água pelas massas do metacaulim e resíduo de porcelana em pó, constituintes das pastas, apresentados na Tabela 5.7.

APÊNDICE C**Teste de Scott-Knott das médias dos ensaios de Resistência à Tração na Flexão e Resistência à Compressão**

Tabela C.1 - Teste de Scott-Knott das médias de Resistência à Tração na Flexão

Mistura	Resistência à Tração na Flexão (MPa)			
	1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
AN ₁₀₀	2,6 a A	9,3 b A	9,3 b A	9,3 b A
AN ₇₀ PRP ₃₀	4,3 a B	8,8 b A	10,2 c B	10,2 c B
AN ₅₀ PRP ₅₀	3,9 a B	10,0 b B	9,9 b B	11 c C
ARP ₁₀₀	5,4 a C	7,7 b C	7,1 b C	7,8 b D
ARP ₇₀ PRP ₃₀	5,4 a C	8,9 b A	8,7 b E	7,4 c E
ARP ₅₀ PRP ₅₀	5,5 a C	8,3 b C	9,1 c A	8,5 b F
AN ₇₀ ARP ₃₀	5,4 a C	6,9 b D	8,0 c E	7,8 c E
AN ₅₀ ARP ₅₀	4,8 a C	6,6 b D	6,8 b D	7,1 b E
AN ₃₀ ARP ₇₀	6,3 a D	8,0 b C	6,8 a D	5,8 c D

Fonte: Autor

Tabela C.2 - Teste de Scott-Knott das médias de Resistência à Compressão

Mistura	Resistência à Compressão (MPa)			
	1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
AN ₁₀₀	10,6 a A	42,7 b A	43,6 b A	48,5 c A
AN ₇₀ PRP ₃₀	22,6 a B	35,2 b C	40,4 c B	43,1 c B
AN ₅₀ PRP ₅₀	18,5 a C	37,8 b C	37,2 a C	41,0 b B
ARP ₁₀₀	18,0 a C	35,6 b C	35,2 b C	37,9 b C
ARP ₇₀ PRP ₃₀	23,3 a B	40,7 b A	38,4 b B	38,8 b C
ARP ₅₀ PRP ₅₀	24,3 a B	37,0 b C	34,1 b C	36,5 b D
AN ₇₀ ARP ₃₀	15,5 a C	28,1 b C	28,3 b B	29,9 b E
AN ₅₀ ARP ₅₀	15,5 a C	28,3 b C	29,6 b B	30,8 b E
AN ₃₀ ARP ₇₀	21,3 a B	31,2 b C	30,8 b B	32,4 b E

Fonte: Autor

A análise do teste de Scott-Knott se dá pela interpretação de que letras minúsculas indicam a evolução da mistura em relação à idade e letras maiúsculas representam a diferença entre as misturas para uma mesma idade. Letras iguais indicam não haver diferença estatística entre os dados.