

ANO
2020



UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MANUELA BAZZANI KRETZER | ARGAMASSAS COM CIMENTO GEOPOLIMÉRICO À
BASE DE METACULIM, CINZA VOLANTE E ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO
ATIVADO POR SOLUÇÃO ALCALINA DE SILICATO

Este trabalho buscou investigar os principais efeitos do uso de cimento geopolimérico (CG) em substituição parcial ao cimento Portland em argamassas para revestimento. O CG foi obtido a partir de misturas de rejeitos industriais (cinza volante e escória granulada de alto forno) e metacaulim, ativados por solução composta por silicato de sódio alcalino e hidróxido de potássio. Foram avaliadas as propriedades no estado fresco, e endurecido, além de propriedades de durabilidade e microestrutural para analisar a viabilidade de aplicação da argamassa.

Orientador: Carmeane Effting

Joinville, 2020

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ARGAMASSAS COM CIMENTO GEOPOLIMÉRICO À BASE DE METACULIM, CINZA VOLANTE E ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO ATIVADO POR SOLUÇÃO ALCALINA DE SILICATO

MANUELA BAZZANI KRETZER

JOINVILLE, 2020

MANUELA BAZZANI KRETZER

**ARGAMASSAS COM CIMENTO GEOPOLIMÉRICO À BASE DE
METACaulim, CINZA VOLANTE E ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO
FORNO ATIVADO POR SOLUÇÃO ALCALINA DE SILICATO.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Carneane Effting.

JOINVILLE, SC

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Kretzer, Manuela Bazzani

Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por solução alcalina de silicato / Manuela Bazzani Kretzer. -- 2020.

147 p.

Orientador: Carneane Effting

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2020.

1. Argamassa. 2. Cimento de geopolímero. 3. Propriedades físicas. 4. Propriedades mecânicas. I. Effting, Carneane. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**Argamassas com Cimento Geopolimérico à base de Metacaulim, Cinza Volante
e Escória Granulada de Alto Forno Ativado por Solução Alcalina de Silicato**

por

Manuela Bazzani Kretzer

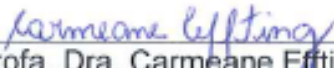
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL

Área de concentração em "Engenharia Urbana e da Construção Civil"
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

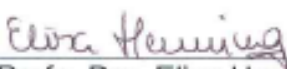
Banca Examinadora:



Profa. Dra. Carmeane Effting
CCT/UDESC
(Orientadora/Presidente)



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
UNESC/Criciúma



Profa. Dra. Elisa Henning
CCT/UDESC

Joinville, SC, 17 de fevereiro de 2020.

Aos meus pais, Ronaldo e Regina,
e minha irmã Fernanda,
para todo o sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pela vida.

Aos meus pais, por todo o amor, incentivo e apoio incondicional, sem vocês, essa etapa não seria possível.

À minha irmã, que por mais que esteja longe, sempre se faz presente, sendo meu porto seguro.

À minha orientadora, Prof. Dra. Carmeane Effting, por sua dedicação, esforço e amizade durante o mestrado. Serei eternamente grata por você aceitar ser minha orientadora.

Ao Samoel Schwaab, por me permitir dar continuidade ao seu estudo e toda a assistência durante todo o trajeto. Muito obrigada.

Ao Dr. Adilson Schackow, pela orientação no laboratório de Materiais de Construção Civil para realização dos ensaios desta pesquisa.

Aos meus amigos de mestrado, em especial à Débora Ganasini, Gustavo Aurélio e Patrícia Bergmann Becker pelas horas de parcerias dentro do laboratório, que renderam boas conversas e risadas.

Ao Roberto Dagios, que me ajudou a confeccionar inúmeras misturas de argamassas e estava sempre feliz e disposto ao meu lado para fazer mais.

Às minhas amigas Juliene e Andinara, que além de dividirem apartamento comigo durante esses dois anos, também dividiram tristezas e alegrias da trajetória do mestrado. À Lolla Maria, que apesar de todas suas peripécias foi uma ótima companheira.

A todos os professores do PPGEC que colaboraram para minha formação.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida para a realização desta pesquisa.

Muito obrigada!

“ O segredo, querida Alice, é rodear-se de pessoas que te façam sorrir o coração. É então, só então que estarás no país das maravilhas”

(Chapeleiro Maluco)

RESUMO

Práticas sustentáveis na indústria da construção tornaram-se imprescindíveis devido ao alto índice de emissão de CO₂ na produção do cimento Portland (CP). O aproveitamento de resíduos para novos ligantes pretende reduzir o impacto ambiental e desenvolver materiais alternativos ao CP com características aprimoradas. Os cimentos geopoliméricos (CG) são ligantes promissores produzidos pela reação entre aluminossilicatos e solução alcalina. Neste trabalho são estudados os principais efeitos do uso de CG em substituição parcial ao CP em argamassas para revestimento. O CG foi obtido a partir de misturas de rejeitos industriais (cinza volante e escória granulada de alto forno) e metacaulim, ativados por solução composta por silicato de sódio alcalino e hidróxido de potássio. Para planejamento experimental e análise dos resultados foi utilizado um projeto fatorial 3², sem réplicas. Os fatores empregados foram o teor de substituição, TS (10, 30 e 50 %, em massa) e a relação agregado-cimento, A/C (6,11, 6,90 e 7,69, em massa). Foram avaliadas as propriedades no estado fresco (consistência, tempo de pega, calor de hidratação e retenção de água), no estado endurecido (resistência à compressão e à tração na flexão, resistência de aderência à tração, variação dimensional, absorção de água, módulo de elasticidade e condutividade térmica), além de propriedades de durabilidade (ataque de sulfato) e análise microestrutural (MEV, DRX, ATD e TG). Os resultados são promissores para a utilização de CG em argamassas. A argamassa R690T50S atingiu valores de resistência à compressão e à tração de flexão de 5,65 MPa e 1,73 MPa, respectivamente. Os resultados da aderência mostraram a viabilidade de utilização como argamassa de revestimento interno, atingindo um valor de 0,27 MPa.

Palavras-chaves: Argamassa. Cimento de geopolímero. Propriedades físicas. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Sustainable practices in the construction industry have become essential due to high CO₂ emissions in the production of Portland cement (CP). The use of waste for new binders is intended to reduce the environmental impact and to develop alternative materials to the CP with improved characteristics. Geopolymers cements (CG) are new binders produced by the reaction between aluminosilicates and alkaline solution. In this work, the main effects of the use of CG in partial replacement to the CP in mortars are studied. The CG was obtained from mixtures of industrial waste (fly ash and granulated blast furnace slag) and metakaolin, activated by alkali sodium silicate solution and potassium hydroxide. A 3*2 factorial design was used for experimental planning and analysis of the results. The factors used were the substitution content, SC (10, 30 and 50%) and the aggregate-cement ratio, A/C (6.11, 6.90 and 7.69). The evaluated properties were for fresh mortar (workability, setting time, water retention and heat of hydration), of hardened mortar (tensile and compressive strength, water absorption and thermal conductivity), as well as for durability (sulfate attack and tensile strength in bending) and microstructural analysis (SEM, XRD, DTA and TG). The results are promising for the use of CG in mortars. The R690T50S mortar reached compressive strength and flexural tensile values of 5.65 MPa and 1.73 MPa, respectively. The results of tensile strength in bending showed the viability of use as an internal coating mortar, reaching a value of 0.27 MPa.

Keywords: Mortar. Geopolymer Cement. Physical properties. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de cimento/ emissões de CO ₂	23
Figura 2 - Etapas da produção do cimento Portland	24
Figura 3 - Transformação da matéria-prima até o clínquer	26
Figura 4 - Reação dos produtos de hidratação do Cimento Portland.....	27
Figura 5 - Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento.....	28
Figura 6 - Microestrutura do C-S-H	28
Figura 7 - Microestrutura da portlandita	29
Figura 8 - Microestrutura: a) etringita b) monossulfato hidratado	29
Figura 9 - Microestrutura do vazio capilar	30
Figura 10 - Representação esquemática da estrutura dos geopolímeros	32
Figura 11 - Composição cimento geopolimérico	33
Figura 12 – Diferença entre a reação do CP e do CG.....	34
Figura 13 – Modelo conceitual da reação de geopolimerização.....	35
Figura 14 - Modelo conceitual da formação dos géis N-A-S-H e C-A-S-H	35
Figura 15 - Micrografia de partícula do metacaulim, ampliação 7500x	37
Figura 16 - Micrografia de partícula de cinza volante, ampliação 5000x.....	38
Figura 17 - Micrografia de partícula de escória granulada de alto forno, ampliação 1000x	39
Figura 18 - Quadro geral de aplicação dos geopolímeros.....	41
Figura 19 - Variação da retenção de água para diferentes argamassas	50
Figura 20 - Fases da pasta conforme a liberação de calor x tempo decorrido	52
Figura 21 - Esquema de aderência entre a argamassa e o substrato.....	54
Figura 22 - Formas de ruptura.....	55
Figura 23 - Classificação dos processos de deterioração	57
Figura 24 - Representação diagramática - ataque de sulfato externo (ASE)	58
Figura 25 – Etapas do procedimento experimental	60
Figura 26 - Caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido.....	61
Figura 27 - Areia MF.60/70 ARG	63
Figura 28 - Precursores, (a) cinza volante, (b) escória granulada de alto forno, (c) metacaulim	64
Figura 29 - Gráfico da área otimizada: a) precursores, b) ativadores	65
Figura 30 - Cinza volante: (a) DRX (b) MEV, ampliação de 300x e (c) MEV, ampliação de 20.000x	71
Figura 31 - Escória granulada de alto forno: (a) DRX (b) MEV, ampliação 300x e (c) MEV, ampliação 20.000x	72
Figura 32 - Metacaulim: (a) DRX (b) MEV, ampliação 300x e (c) MEV, ampliação 40.000x	74

Figura 33 - Processo de seleção das argamassas.....	77
Figura 34 - Preparação da argamassa - misturador mecânico.....	78
Figura 35 - Mesa de índice de consistência e molde tronco-cônico	80
Figura 36 - Aparelho Vicat.....	81
Figura 37 - Funil de Buchner	82
Figura 38 - Ensaio resistência à compressão: corpo de prova rompido	84
Figura 39 - Ensaio resistência à tração na flexão: corpo de prova rompido	85
Figura 40 - Paredes revestidas com argamassa: a) R690T50S, b) referência.....	86
Figura 41 - Corpos de prova colados: a) R690T50S, b) referência	86
Figura 42 - Dinamômetro	87
Figura 43 - Ensaio de variação dimensional: a) molde dos corpos de prova, b) comparador de comprimento	88
Figura 44 - Módulo de elasticidade	90
Figura 45 - Sistema de medição de módulo de elasticidade: a) flexional, b) longitudinal	91
Figura 46 - Aparelho condutivímetro	92
Figura 47 - Esquema do funcionamento do aparelho de condutivímetro	92
Figura 48 - Amostras imersas na solução de sulfato de sódio	94
Figura 49 – Microscopia eletrônica de varredura: a) microscópio eletrônico, b) metalizadora para camada condutiva (ouro)	95
Figura 50 - MEV: a) lixamento, b) polimento, c) recobertas de ouro	95
Figura 51 – Resultados das médias dos índices de consistência das argamassas	101
Figura 52 – Diagrama de Pareto dos efeitos no índice de consistência	103
Figura 53 – Análise dos resíduos do IC: a) resíduos versus número de casos b) resíduos versus valores preditos, c) resíduos versus valores normais esperados	104
Figura 54 - Índice de consistência das argamassas.....	105
Figura 55 - Resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias (MPa)	106
Figura 56 - Diagrama de Pareto dos efeitos na resistência à compressão aos 28 dias	107
Figura 57 - Análise dos resíduos do RC28: a) resíduos versus número de casos; b) resíduos versus valores preditos; c) resíduos versus valores normais esperados	108
Figura 58 - Gráfico de contorno da superfície de resposta do RC28	109
Figura 59 – Microscopia eletrônica de varredura: a) Referência, b) R690T10, c) R690T30, d) R690T50, e) R611T50, f) R769T50	111
Figura 60 - Difratometria de raios X (DRX).....	112
Figura 61 - Análise térmica: a) ATD, b) TG	114
Figura 62 - Resistência das argamassas ao ataque de sulfato de sódio	115
Figura 63 - Processo de deterioração das argamassas no ataque de sulfato: (a) 18/03; (b) 27/03; (c) 15/04; (d) 24/04; (e) 26/04; (f) 27/04.	116

Figura 64 – Tempo de pega das argamassas	118
Figura 65 – Resultados do calor de hidratação	119
Figura 66 – Resultados Fase III – R690T50S: a) índice de consistência, b) resistência à compressão,.....	121
Figura 67 – Resultados da resistência à tração na flexão	122
Figura 68 – Resultados: a) absorção de água, b) índice de vazios	124
Figura 69 – Resultados da retenção de água.....	126
Figura 70 – Resultado: a) variação dimensional (mm), b) variação de massa (%) .	127
Figura 71 - Resultado do módulo de elasticidade das argamassas	128
Figura 72 – Resultado da condutividade térmica das argamassas	130
Figura 73 – Ruptura dos corpos de prova da argamassa de referência.....	131
Figura 74 - Ruptura dos corpos de prova da argamassa R690T50S	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes do clínquer.....	25
Tabela 2 - Composição química do metacaulim.....	37
Tabela 3 - Composição química típica de cinzas volantes nacionais.....	38
Tabela 4 - Composição química típica da escória granulada de alto forno	39
Tabela 5 - Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção	47
Tabela 6 - Principais requisitos e propriedades para as diferentes funções das argamassas.....	47
Tabela 7 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas	49
Tabela 8 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco	50
Tabela 9 - Limites de resistência de aderência à tração	55
Tabela 10 - Manifestações patológicas da hidratação da cal	58
Tabela 11 - Composição cimento de geopolímero	64
Tabela 12 – Limites adotados dos precursores e dos ativadores do cimento geopolimérico	65
Tabela 13 - Relação entre as propriedades e as características da areia.....	66
Tabela 14 - Composição química e mineralógica do CP II F-32	69
Tabela 15 - Composição química da Cinza Volante.....	70
Tabela 16 - Composição química da escória granulada de alto forno.....	72
Tabela 17 - Composição química do metacaulim.....	73
Tabela 18 - Porcentagem de óxidos presentes em silicato de sódio alcalino	74
Tabela 19 – Limites dos fatores adotados das argamassas	75
Tabela 20 - Misturas do projeto fatorial	76
Tabela 21 - Misturas do projeto fatorial 3 ² completo	76
Tabela 22 – Nova proporção da argamassa geopolimérica (R690T50S).....	78
Tabela 23 – ANOVA para projeto fatorial com dois fatores.....	98
Tabela 24 - Tipos de erro no teste de hipóteses	98
Tabela 25 - ANOVA do IC com efeitos estatisticamente significativos e não significativos	102
Tabela 26 - ANOVA do IC com efeitos estatisticamente significativos.....	103
Tabela 27 - ANOVA da RC28 com efeitos estatisticamente significativos e não significativos	106
Tabela 28 - ANOVA da RC28 com efeitos estatisticamente significativos	107
Tabela 29 – Resultados referentes à massa específica.....	124
Tabela 30 - Retenção de água	125
Tabela 31 - Resultado do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa de referência	132
Tabela 32 - Resultado do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa R690T50S	132

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio - calcita
CaO	Óxido de cálcio – cal virgem
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio – cal hidratada
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
Cl	Cloreto
CO ₂	Dióxido de carbono - Gás carbônico
Cu	Cobre
FeO	Óxido ferroso
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico - hematita
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
H ₂ O	Óxido de hidrogênio
K	Potássio
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
MgO	Óxido de magnésio
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio
Mn	Manganês
Na	Sódio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio

Na ₂ SO ₄	Sulfato de Sódio
O	Oxigênio
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício - Sílica
SO ₃	Óxido sulfúrico – Trióxido de enxofre
TiO ₂	Dióxido de titânio

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
CG	Cimento Geopolimérico
CH	Hidróxido de cálcio
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CV	Cinza Volante
DOE	Design of Experiments
EGAF	Escória granulada de alto forno
EPS	Poliestireno expandido
GGE	Gases do efeito estufa
MC	Metacaulim
MF	Módulo de finura
SA	Aluminato de sódio
SK	Silicato de potássio
SS	Silicato de sódio alcalino
TS	Teor de substituição
A/C	Relação agregado/cimento
°C	Graus Celsius
g	grama
kg	Quilograma

mm	Milímetros
MPa	Megapascals
N	Newton – kg.m/s ²
N/s	Newton/segundo
pH	Potencial hidrogeniônico
µm	Micrometro
W/C	Relação água/cimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.2.1	Objetivo geral.....	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1	PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E O MEIO AMBIENTE	23
2.1.1	O clínquer.....	25
2.1.2	Reação de hidratação do Cimento Portland	27
2.2	GEOPOLÍMEROS.....	30
2.2.1	Obtenção dos Geopolímeros.....	31
2.2.2	Mecanismo de reação do cimento geopolimérico.....	32
2.2.3	Materiais de base e ativadores.....	36
2.2.3.1	Metacaulim	36
2.2.3.2	Cinza Volante	37
2.2.3.3	Escória granulada de alto forno.....	39
2.2.3.4	Hidróxido de potássio e Silicato de sódio alcalino	40
2.2.4	Aplicações dos geopolímeros.....	40
2.2.5	Propriedades do cimento geopolimérico (CG)	42
2.3	ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS	42
2.3.1	Trabalhabilidade.....	42
2.3.2	Tempo de pega	43
2.3.3	Temperatura das argamassas geopoliméricas no estado fresco	43
2.3.4	Propriedades físicas de argamassas geopoliméricas	44
2.3.5	Resistência à compressão e à tração.....	44
2.3.6	Durabilidade da argamassa geopolimérica.....	46
2.4	ARGAMASSAS.....	46
2.5	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	48
2.5.1	Trabalhabilidade.....	48
2.5.2	Tempo de pega	51
2.5.3	Calor de hidratação	51
2.6	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	52
2.6.1	Resistência mecânica	52
2.6.2	Resistência de aderência à tração	53
2.6.3	Módulo de elasticidade	55
2.6.4	Durabilidade.....	56
2.6.5	Ataque por sulfatos.....	58

3	METODOLOGIA	60
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	61
3.1.1	Água	62
3.1.2	Cimento Portland.....	62
3.1.3	Cal.....	62
3.1.4	Agregado miúdo – areia.....	63
3.1.5	Cimento de geopolímero	63
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	66
3.2.1	Determinação da composição granulométrica da areia	66
3.2.2	Determinação da massa específica e massa específica aparente da areia	67
3.2.3	Determinação da massa unitária da areia	68
3.2.4	Caracterização do Cimento Portland CP II F-32.....	69
3.2.5	Caracterização da Cinza Volante	70
3.2.6	Caracterização da Escória Granulada de Alto Forno	71
3.2.7	Caracterização do Metacaulim	73
3.2.8	Hidróxido de Potássio e Silicato de Sódio Alcalino	74
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL (DOE)	75
3.4	SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	76
3.5	PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	78
3.6	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO	79
3.6.1	Índice de consistência	80
3.6.2	Tempo de pega	80
3.6.3	Calor de hidratação	81
3.6.4	Retenção de água.....	82
3.7	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	83
3.7.1	Resistência à compressão e à tração na flexão	84
3.7.2	Resistência de aderência à tração	85
3.7.3	Variação dimensional.....	88
3.7.4	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	89
3.7.5	Módulo de elasticidade ou Módulo de Young.....	90
3.7.6	Condutividade térmica.....	91
3.7.7	Ataque de sulfato	93
3.8	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E TÉRMICA.....	94
3.8.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	94
3.8.2	Difratometria de raios X (DRX)	96
3.8.3	Análise Térmica (ATD e TG)	96
3.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	101

4.1	FASE I.....	101
4.1.1	Índice de consistência	101
4.1.2	Resistência à compressão	105
4.2	FASE II.....	110
4.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	110
4.2.2	Difratometria de raios X	112
4.2.3	Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica.....	113
4.2.4	Durabilidade.....	114
4.3	FASE III.....	117
4.3.1	Tempo de pega	117
4.3.2	Calor de hidratação	119
4.3.3	Resistência à compressão (RC) e Índice de Consistência (IC)	120
4.3.4	Resistência à tração na flexão	122
4.3.5	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	123
4.3.6	Retenção de água.....	125
4.3.7	Variação dimensional.....	126
4.3.8	Módulo de elasticidade ou Módulo de Young.....	128
4.3.9	Condutividade térmica.....	129
4.3.10	Resistência de aderência à tração	131
5	CONCLUSÕES	135
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
	REFERÊNCIAS.....	137

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais requisitos para o desenvolvimento sustentável, e o intuito de muitas pesquisas, é o aproveitamento de resíduos sólidos para gerar materiais alternativos (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014). A adequada gestão de resíduos, visa, além da reciclagem e da diversificação dos produtos finais, diminuir os custos dos produtos e fornecer matérias-primas alternativas para inúmeros setores industriais (MARMOL *et.al.*, 2010).

Hoje, tornou-se imprescindível adotar práticas sustentáveis na indústria da construção devido ao rápido crescimento urbano. Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2019), o cimento é o segundo material com maior índice de consumo mundial, perdendo apenas para a água. “O consumo do cimento Portland vem aumentando ano após ano, representando atualmente um consumo de aproximadamente 2600 milhões de toneladas/ano e com previsão de aumento de quatro vezes nos próximos 40 anos” (AZEVEDO *et.al.*, 2017, p.143).

O cimento Portland (CP), principal aglutinante utilizado no concreto e argamassas convencionais, é obtido de um processo com um intenso consumo energético e altamente poluente, cerca de 7% do total de emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (HUYNH; VO; HWANG, 2018). Ainda que o uso de CP tenha inúmeras vantagens, seu uso está relacionado a problemas de durabilidade. Muitas estruturas apresentaram grave deterioração antes de atingir a sua vida útil planejada, principalmente construções que estão em ambientes agressivos e corrosivos, como expostos à água do mar, solos sulfúricos ou clima frio (ELYAMANY; ELMOATY; ELSHABOURY, 2018).

Para reduzir o impacto ambiental da construção civil e melhorar o desempenho do concreto, o desenvolvimento de ligantes alternativos, que utilizem resíduos industriais, são alternativas ao cimento tradicional (SINGH *et al.*, 2015).

Em 1978, o cientista francês Joseph Davidovits conduziu as pesquisas do “concreto verde”, chamado de concreto geopolimérico, com propriedades similares ao CP, ou até melhores, como um dos materiais promissores para a construção (FAN *et al.*, 2018). O geopolímero é considerado como um cimento de terceira geração, logo após à cal e o CP. Também chamados de polímeros inorgânicos, este tipo de ligante é produzido pela reação entre silício (Si) e alumínio (Al), ativado por uma solução de silicato alcalino (KWASNY *et al.*, 2018).

Várias fontes de resíduos ou subprodutos podem ser utilizados como fontes de aluminossilicatos para os precursores da geopolimerização, entre os mais comuns estão: metacaulim, diferentes tipos de argilas calcinadas, escórias e cinzas (KWASNY *et al.*, 2018). As propriedades derivam das particularidades dos materiais que o compõem, como, a composição química, conteúdo da fase vítrea, tamanho das partículas e a presença de partículas inertes (ZHANG *et al.*, 2018).

Os geopolímeros têm atraído considerável atenção nos últimos anos devido as suas propriedades e características que o tornam uma alternativa para o CP (SINGH *et al.*, 2015). Entretanto, ainda é necessário, no que diz respeito à indústria da construção, comprovar sua rentabilidade e sua adequação às exigências específicas para obter mais popularidade (KWASNY *et al.*, 2018).

Este trabalho pretende estudar as características das argamassas com substituição parcial do CP por CG, determinando suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e de durabilidade, além da análise microestrutural e térmica. O tema desta pesquisa mostra-se relevante podendo vir a contribuir para a diminuição do consumo de recursos naturais e dos impactos ambientais com a utilização de resíduos como material alternativo para a construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme o protocolo de Kyoto, que compromete os países a importantes reduções na emissão de CO₂, a substituição do cimento Portland por materiais “verdes” tornou-se extremamente importante. A valorização de subprodutos industriais como uma opção promissora para o desenvolvimento sustentável tornou-se um objetivo (DEMBOVSKA *et al.*, 2017).

Devido as grandes vantagens dos geopolímeros, a investigação das propriedades e das aplicações destes novos ligantes têm atraído pesquisadores e indústrias cimenteiras. Muitos estudos têm indicado que os geopolímeros exibiram significantes perspectivas de viabilidade e aplicação para serem usados como um cimento sustentável, podendo vir a substituir o tradicional cimento na produção de argamassas no futuro (ZHANG *et al.*, 2018). A produção de cimentos geopoliméricos versáteis e de baixo custo, que permitem ser misturados e endurecidos como o CP, é uma mudança que promete revolucionar a construção (DAVIDOVITS, 2013).

Conforme Davidovits (2015) o cimento Portland é um grande poluente da atmosfera. Aproximadamente, 850kg de CO₂ são liberados durante a fabricação de uma tonelada de cimento. A emissão de gás carbônico, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, reduz entre 70% e 90% na fabricação de cimentos de geopolímeros (não contabilizando o transporte dos materiais).

Além disso, a fabricação dos geopolímeros não exige altas temperaturas para produção, nem mesmo altos investimentos em equipamentos e instalações. Em casos menos favoráveis, onde não se utiliza dos resíduos industriais, mas fabrica-se esses materiais, a redução do consumo de energia atinge valores de até 43% (DAVIDOVITS, 2015).

Estudos prévios têm reportado que os geopolímeros possuem alta resistência inicial, baixa retração, resistência ao congelamento e descongelamento, resistência aos sulfatos, resistência à corrosão, resistência aos ácidos e resistência ao fogo (WALLAH; RANGAN, 219).

A carência de pesquisas em alguns setores abre uma variedade de novas vertentes de estudos para reafirmar sua aplicabilidade e a sustentabilidade. Baseado no exposto, esta pesquisa visa desenvolver e avaliar a substituição parcial do cimento Portland, por um novo material específico, o cimento geopolimérico (CG). As pesquisas referentes ao uso do CG em argamassas de revestimentos ainda são limitadas, evidenciando a importância deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o desempenho de argamassas de revestimento com substituição parcial do cimento Portland por cimento Geopolimérico para estudar sua viabilidade de aplicação.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar planejamento experimental, por meio de projeto fatorial 3², como uma função do teor de substituição do cimento Portland por cimento geopolimérico

(10, 30 e 50%) e da relação agregado/cimento (6,11, 6,90 e 7,69) para o delineamento de misturas de argamassas;

- b) Avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas desenvolvidas;
- c) Realizar análise microestrutural das argamassas geopoliméricas e da argamassa de referência;
- d) Efetuar estudo comparativo entre a argamassa geopolimérica e a argamassa de referência, demonstrando a possibilidade do uso do cimento geopolimérico do ponto de vista técnico e sustentável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

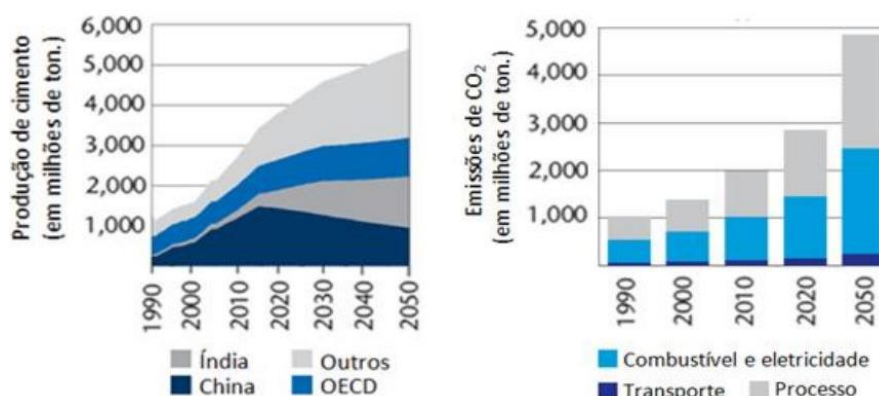
Neste capítulo será retratado um panorama geral da relação entre o cimento Portland e a sustentabilidade, os seus principais componentes, e as reações de hidratação, envolvendo suas fases e produtos. Em seguida, será apresentado um histórico sobre os geopolímeros, sua forma de obtenção, seus principais componentes, suas características como cimento, e as reações de hidratação e sua aplicação. Por último, será apresentado também um contexto das argamassas: suas propriedades no estado fresco e endurecido.

2.1 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E O MEIO AMBIENTE

A elevada produção de cimento, além de ser responsável pelo alto índice de consumo de energia, está diretamente relacionada com o aumento dos gases causadores do efeito estufa (GEE). Hoje, aproximadamente de 5% à 7% do dióxido de carbono (CO₂) lançado na atmosfera é advindo da fabricação do cimento (FAN *et al.*, 2018).

A demanda mundial de cimento deve aumentar em 2,5 vezes até o ano de 2050, onde, o setor da construção civil poderá ser responsável por até 20% do total de CO₂ emitido na atmosfera, conforme mostra a Figura 1 (POLI-USP, 2013).

Figura 1 - Produção de cimento/ emissões de CO₂

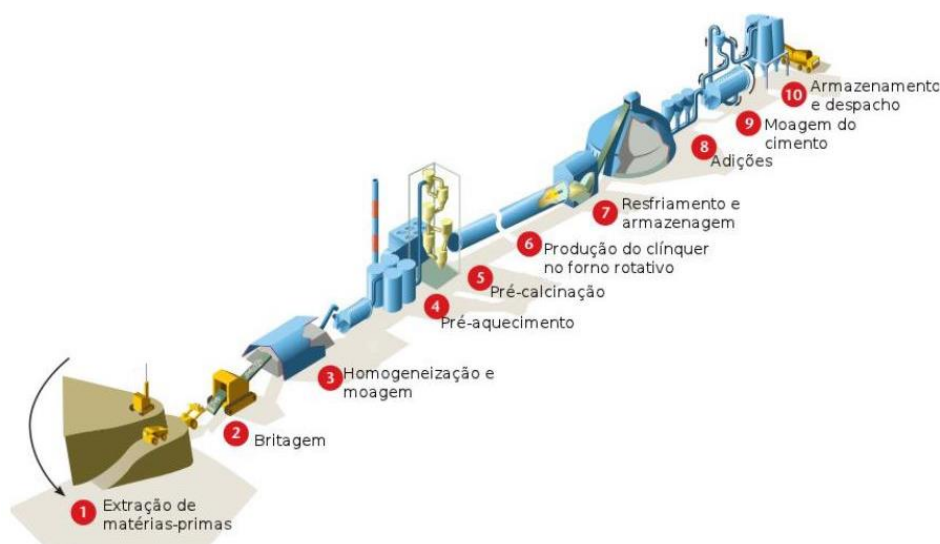


Fonte: Costa *et al.*, 2013

O processo produtivo do CP envolve as etapas de extração da matéria-prima, britagem, moagem da mistura, homogeneização da mistura crua (beneficiamento do

calcário e argila), a calcinação e a moagem do clínquer, conforme esquema apresentado na Figura 2 (SNIC,2019).

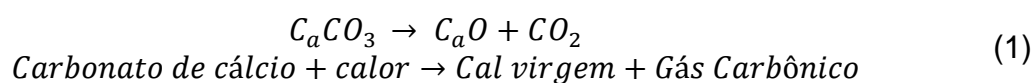
Figura 2 - Etapas da produção do cimento Portland



Fonte: ABDI (2012)

De forma geral, cerca de 90% das emissões do gás dióxido de carbono (CO₂) oriundas da produção do cimento ocorrem durante a etapa de produção do clínquer. Os outros 10% restantes são provenientes do transporte e de emissões indiretas do consumo de energia (ABDI, 2012).

A fabricação do clínquer acontece por meio da calcinação/descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO₃), em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂), segundo a Equação 1 (ABDI, 2012).



Dentro deste cenário, a indústria cimenteira brasileira já vem adotando medidas para melhorar o índice de emissão de GEE. Hoje, a média brasileira é 2,6% menor que a média mundial (POLI-USP, 2013). Países como Espanha, Inglaterra e China possuem índices de 698, 839 e 848 kg de CO₂/ tonelada de cimento, respectivamente, enquanto o Brasil está na faixa de 610 kg de CO₂/tonelada de cimento (CIMENTO ORG, 2013).

O Brasil possui uma das menores taxa de utilização de clínquer no mundo, em torno de 66,9%, conforme pesquisa realizada no ano de 2013. Esse valor mostra a

situação favorável em que o país se encontra devido ao uso de materiais para a substituição parcial do clínquer (CARVALHO; MESQUITA, MELO; 2015).

O concreto, assim como o cimento, é capaz de introduzir em sua composição uma série de resíduos oriundos da indústria e da agricultura, colaborando direta e indiretamente para a minimização do impacto ambiental (CREA-SC, 2013)

Existe uma tendência de crescimento na procura de cimento, com consequente aumento de emissão de CO₂, interligada com o desenvolvimento do país. Em longo prazo, a substituição parcial do cimento é um dos principais meios para a redução da intensidade de carbono (CARVALHO; MESQUITA, MELO; 2015).

Conforme Luukkonen *et al.* (2008), seguindo nessa linha de sustentabilidade, os geopolímeros são os ligantes considerados como alternativa para a reduzir a emissão de CO₂ na atmosfera. Enquanto que a produção de 1 tonelada de cimento Portland emite aproximadamente 1 tonelada de CO₂, para a fabricação de ligantes geopoliméricos, esse número é 7 vezes menor (GEO-POL, 2019).

2.1.1 O clínquer

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido a partir da pulverização do clínquer, constituído por silicatos hidráulicos de cálcio, certa proporção de sulfato de cálcio e adições minerais. A cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃) são os elementos fundamentais do clínquer. Além destes, pode conter substâncias de menor importância e algumas impurezas (OLIVERA, 2005).

A Tabela 1 apresenta os óxidos individuais e os compostos formados pela mistura das matérias-primas utilizadas para a obtenção do clínquer.

Tabela 1 - Constituintes do clínquer

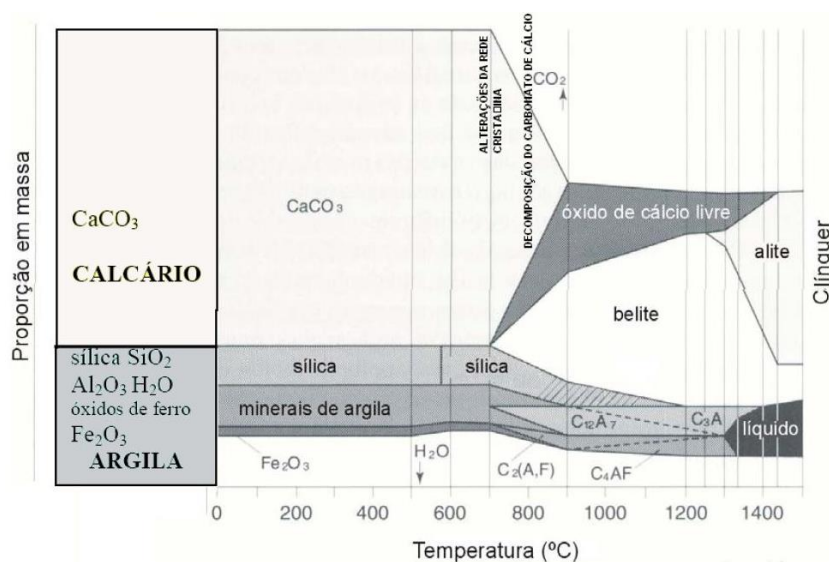
Óxido	Sigla	Composto	Abreviação	Nomenclaturas
CaO	C	3CaO·SiO ₂	C ₃ S	Silicato tricálcico alita
SiO ₂	S	2CaO·SiO ₂	C ₂ S	Silicato dicálcico belita
Al ₂ O ₃	A	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	Aluminato tricálcico celita
Fe ₂ O ₃	F	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico ferrita
H ₂ O	H	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CSH ₂	Silicato de cálcio hidratado

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Sabe-se que a formação dos componentes do clínquer, C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF, é complexa, existindo outras composições além das referidas. A Figura 3 mostra, de forma simplificada, as sucessivas transformações das matérias-primas ocorridas

durante o processo de formação do clínquer promovido pela ação da temperatura (GOUVEIA, 2010).

Figura 3 - Transformação da matéria-prima até o clínquer



Fonte: Gouveia (2010)

As reações ocorridas podem ser sintetizadas da seguinte maneira: até 500°C ocorre a perda da água dos minerais da argila; aproximadamente em 900°C ocorre a reação química entre óxidos de cálcio e argila e a decomposição do carbonato de cálcio; entre 900°C e 1200°C ocorre a reação entre CaO e os aluminossilicatos; entre 1250°C e 1280°C acontece o início da formação da fase líquida; e acima de 1280°C completa-se a fase líquida e a formação dos componentes do cimento (GOUVEIA, 2010).

Em relação às características de endurecimento, o aluminato tricálcico (C_3A) é responsável pela resistência do primeiro dia, o silicato dicálcico (C_2S) está relacionado à resistência em idades acima de um ano, e o silicato tricálcico (C_3S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades (OLIVEIRA, 2005). O C_3A , no início da cura, contribui para o calor de hidratação, e ainda, é responsável pela rapidez da pega. O C_3S também contribui para o calor de hidratação e tempo de pega (OLIVEIRA, 2005).

A reação de hidratação do cimento se dá pela reação química entre os silicatos e os aluminatos com a água, originando uma massa firme e resistente (ITAMBÉ, 2019). Conforme Mehta e Monteiro (2014), no CP as proporções de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF são, respectivamente, entre 45 e 60%, 15 e 30%, 6 e 12%, e 6 e 8%.

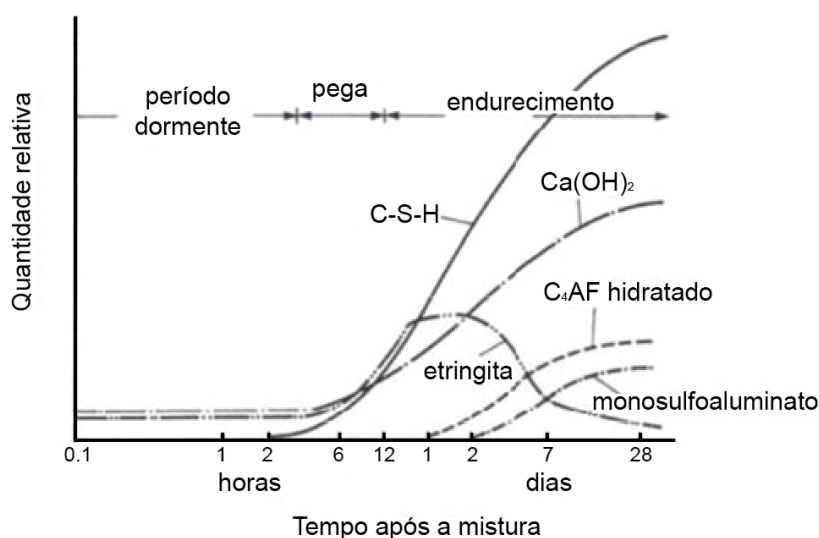
Os aluminatos hidratam-se mais rapidamente do que os silicatos. Os silicatos preenchem em torno de 75% a pasta de cimento e possuem papel dominante em relação à resistência, enquanto que, os aluminatos determinam o tempo de pega e enrijecimento da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.2 Reação de hidratação do Cimento Portland

A hidratação do cimento Portland pode ser definida como reações químicas, que na presença de água, originam novos compostos com características de estabilidade e resistência (GOUVEIA, 2010). Conforme Mehta e Monteiro (2014), o CP é uma mistura de inúmeros compostos diferentes e o processo de hidratação ocorre em reações simultâneas, mas, a velocidade de reação é diferente para os diversos compostos.

A evolução da hidratação é influenciada pelos seguintes fatores: finura do cimento, relação água/cimento, temperatura de cura, presença de adições minerais e presença de aditivos. Na Figura 4 é possível identificar os estados de período dormente, pega e endurecimento, com a formação dos produtos de hidratação, após a mistura da água ao cimento (GOUVEIA, 2010).

Figura 4 - Reação dos produtos de hidratação do Cimento Portland

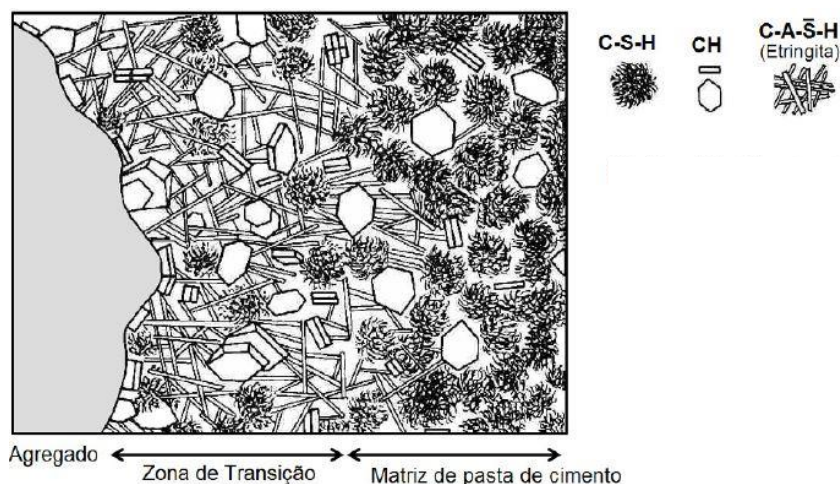


Fonte: Gouveia (2010)

Quando a água entra em contato com o cimento, dentro de poucos minutos de hidratação, começa a aparecer o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também conhecido como etringita. Algumas horas depois, os espaços vazios, previamente

ocupados por água e cimento, são preenchidos por hidróxido de cálcio (CH) e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) fibrosos, conforme esquema da Figura 5. Dias depois, a etringita pode se tornar instável e transforma-se em monossulfoaluminato hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

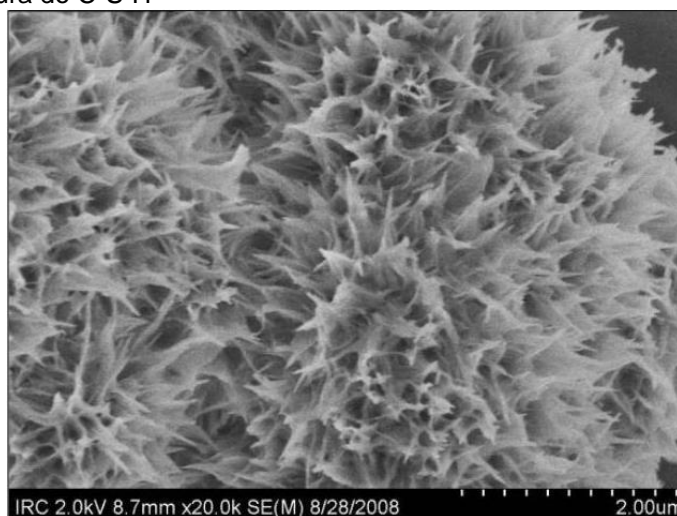
Figura 5 - Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

A fase do C-S-H, também chamado de gel de C-S-H, ocupam entre 50 e 60% do volume da pasta de cimento, e é responsável pela resistência e durabilidade a longo prazo. Sua morfologia varia de fibras pouco cristalinas até redes reticulares. Essa fase tem uma estrutura em camadas com elevada área superficial, Figura 6 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

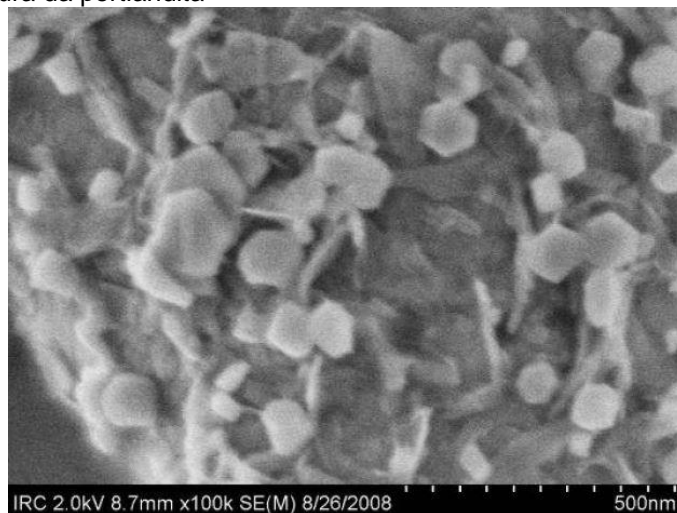
Figura 6 - Microestrutura do C-S-H



Fonte: Freitas Jr. (2013)

O hidróxido de cálcio (CH), também chamado de portlandita, compõe entre 20 e 25% da pasta hidratada. A morfologia deste cristal é de forma prismática hexagonal distinta e sua área superficial é baixa, Figura 7. Sua contribuição à resistência é pequena quando comparado com o C-S-H (PAULON, KIRCHHEIM, 2011).

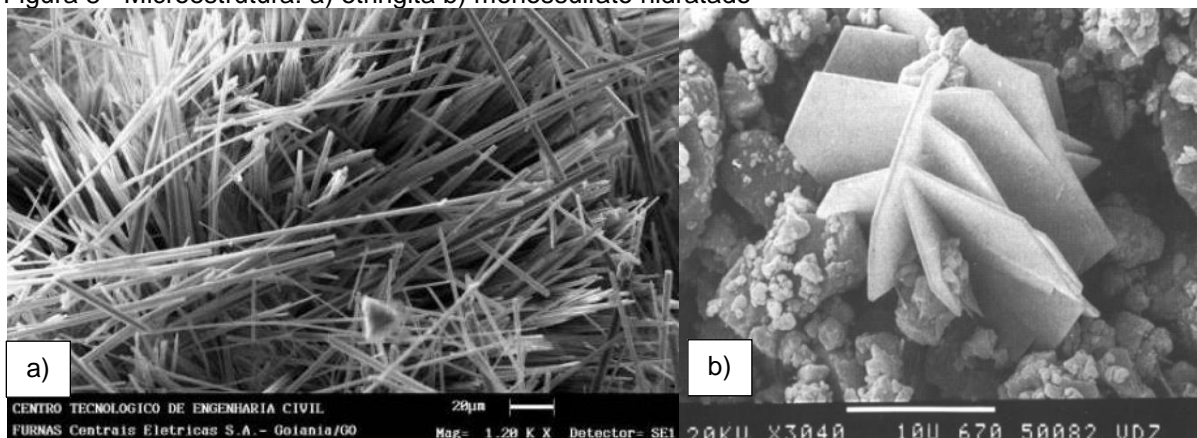
Figura 7 - Microestrutura da portlandita



Fonte: Freitas Jr. (2013)

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o sulfoaluminato de cálcio possui pouca influência na relação microestrutura-propriedade pois só ocupa entre 15 a 20% da pasta hidratada. No início da hidratação, o sulfoaluminato contribui para a formação da etringita (em formas de agulhas), Figura 8a, que eventualmente, transforma-se em monossulfato hidratado (cristais em formas de placas hexagonais em roscas), Figura 8b, tornando o concreto vulnerável ao ataque de sulfatos.

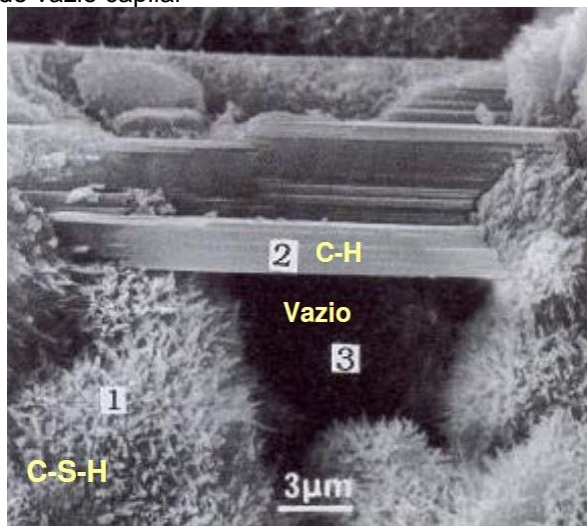
Figura 8 - Microestrutura: a) etringita b) monossulfato hidratado



Fonte: Freitas Jr. (2013)

Os vazios capilares, Figura 9, da pasta de cimento hidratada influenciam diretamente nas propriedades finais do concreto. O espaço não preenchido pelo cimento ou pelos produtos da hidratação é o chamado vazio capilar. Os macroporos, vazios capilares muito grandes, afetam a resistência e a durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 9 - Microestrutura do vazio capilar



Fonte: Freitas Jr. (2013)

Os vazios capilares são determinados por ensaios que determinam a porosidade. Sabe-se que existe uma relação inversa entre a porosidade e a resistência, e a porosidade e durabilidade. A dimensão e a assiduidade dos poros na microestrutura do sólido determinam a permeabilidade, ou seja, a capacidade que um fluido pode passar através de um material sólido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 GEOPOLÍMEROS

Após inúmeros incêndios ocorridos na França entre os anos de 1970 a 1973, o pesquisador Joseph Davidovits observou a necessidade em novas pesquisas de materiais que fossem resistentes ao calor. A consequência desses estudos deu origem aos geopolímeros, patenteados em 1979 (DAVIDOVITS, 1991).

Segundo Davidovits, os geopolímeros são uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos feita pelos antigos romanos e egípcios para a execução de peças estruturais (GEO-POL, 2019). Conforme estudos, a composição química das pedras das pirâmides é semelhante às estruturas geopoliméricas atuais:

uma microestrutura composta de material amorfo composto por silicatos e aluminossilicatos complexos e um material criptocristalino. Estes compostos são encontrados em pirâmides, de 4.500 anos, assim como, em estruturas da Grécia, Chipre e Itália, com 9.000 anos (GEO-POL, 2019).

Em 2004, um estudo publicado por Demortier defende a teoria de Davidovits. Ele comparou uma amostra da pirâmide de Quéops e um amostra de um ligante geopolimérico, revelando que a composição da amostra da pirâmide continha ligantes geopoliméricos (TORGAL; JALALI, 2009).

Antes mesmo de Davidovits patentear este novo material, pesquisas já vinham ocorrendo e continuam até os dias atuais sobre as propriedades e características dos geopolímeros (GEO-POL, 2019). Tem-se registro de estudos realizados por Feret, em 1939, sobre cimentos com escórias, e no Brasil, esse tipo de material começou a ser pesquisado, em meados da década de 1990, por Costa Jr, sobre a resistência de materiais compósitos ao impacto balístico (MAZZA, 2010).

2.2.1 Obtenção dos Geopolímeros

Os geopolímeros, ou polissialatos, são polímeros inorgânicos obtidos por meio da polimerização de matéria-prima contendo aluminossilicatos (poli-sílico-aluminatos). A polimerização é definida como um conjunto de reações no qual moléculas simples reagem entre si formando uma macromolécula de alta massa molar (DAVIDOVITS, 1991).

Conforme Giannopolou e Panias (2004), a estrutura dos geopolímeros é derivada da geossíntese, ciência para produção de rocha artificial à temperatura abaixo de 100°C, para obter propriedades de dureza, durabilidade e estabilidade térmica.

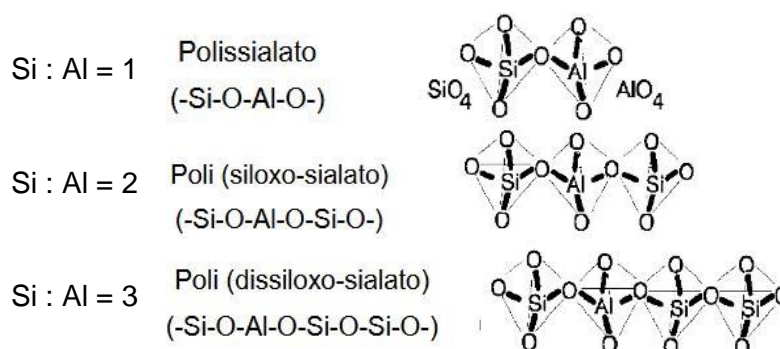
A geopolimerização acontece em temperatura ambiente ou levemente elevada, onde geralmente a solução alcalina utilizada é um silicato solúvel e o aluminossilicato é um material sólido (FENG; PROVIS; VAN DEVENTER, 2012). Este processo de geopolimerização ocorre por meio de uma reação química que produz ligações poliméricas de átomos de silício (Si), oxigênio (O) e alumínio (Al), também chamados de sílico-óxido-aluminato (sialato), conforme Equação 2, fórmula empírica dos geopolímeros (GEO-POL, 2019).



Onde, “M” é o elemento alcalino (Na⁺, K⁺ ou Ca²⁺), “z” é 1,2 ou 3, “n” é o grau de polimerização, o símbolo “—” indica a presença de uma ligação, e w é o grau de hidratação.

Os geopolímeros são nomeados conforme a razão de Si/Al: Polissialato ou sialato (-Si-O-Al-O-), Polissiloxossialato (-Si-O-Al-O-Si-O-), e Polidissiloxossialato (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-), conforme representação da Figura 10 (DAVIDOVITS, 1991).

Figura 10 - Representação esquemática da estrutura dos geopolímeros



Fonte: Davidovits (1994)

O produto desta reação forma um material, da família de ligantes minerais, com composição química parecida com as zeólitas¹, porém possui uma estrutura atômica em rede tridimensional amorfa à semicristalina, ao invés de cristalina (HARDJITO; RANGAN, 2005,).

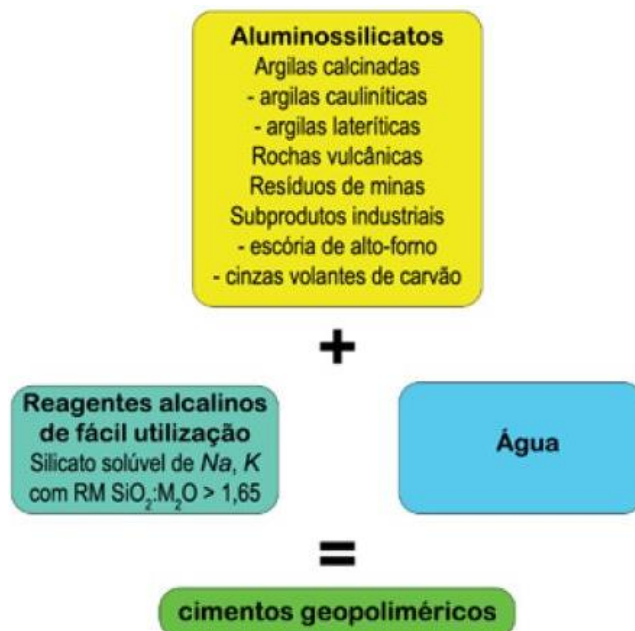
2.2.2 Mecanismo de reação do cimento geopolimérico

O cimento geopolimérico é um material inovador e alternativo ao cimento Portland, obtido a partir de matérias primas de baixo custo, com possível emprego de resíduos industriais, e processamento com reduzida emissão de CO₂, contribuindo para a diminuição da emissão de gases do efeito estufa (DAVIDOVITS, 2013). Para a fabricação do cimento geopolimérico é necessário um material aluminossilicato e um reagente alcalino, conforme Figura 11, (solução de silicato de sódio - Na ou silicato de

¹ Zeólitas são aluminossilicatos cristalinos hidratados, geralmente contendo metais alcalinos ou alcalinos terrosos. Formados por estruturas tridimensionais de tetraedros de SiO₄ e de AlO₄ (BRAGA; MORGON, 2007).

potássio - K, com razão molar de $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O} > 1,65$, onde “M” é Na ou K) (DAVIDOVITS, 2013).

Figura 11 - Composição cimento geopolimérico



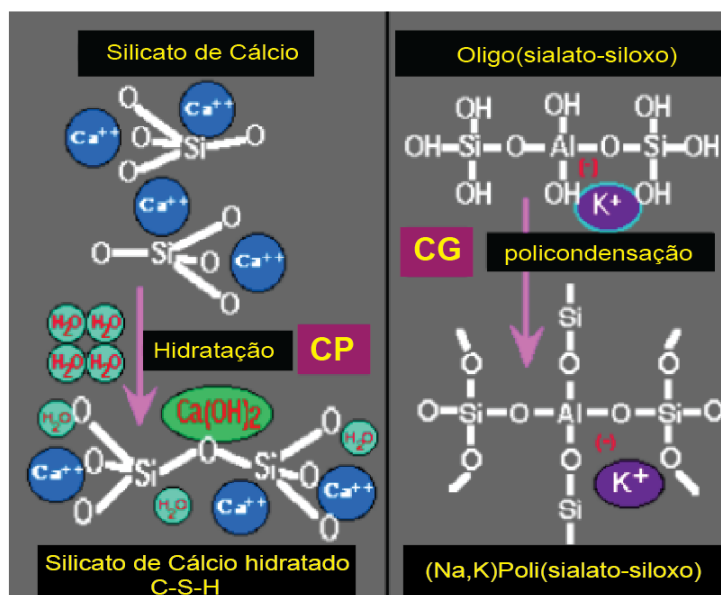
Fonte: Adaptado de Davidovits (2013)

Após a reação, origina-se uma rede tridimensional de cadeias de Si^{4+} e Al^{3+} em número de coordenação IV com o oxigênio (4 íons de oxigênio ao redor de cada um dos íons de Si^{4+} e Al^{3+}) (PINTO, 2006).

Opostamente ao cimento Portland, onde a água dá início à reação de hidratação para formar os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que são responsáveis pela resistência da matriz, os geopolímeros usam da policondensação, dos precursores da sílica e da alumina e um alto teor alcalino para obter resistência estrutural, formando o aluminossilicato hidratado, Figura 12 (ELYAMANY; ELMOATY; ELSHABOURY, 2018).

Conforme Vassalo (2013), a formação de geopolímeros ocorre pelo fenômeno exotérmico, devido à policondensação. O processo de dissolução de Al e Si no meio alcalino, por meio da condensação, forma um gel, altamente reativo, de rede tridimensional de estrutura sílico-aluminato. Conforme Santa (2016), a reação de policondensação (essencial para que ocorra a geopolimerização) acontece como na maioria das zeólitas, entretanto, com rápido endurecimento.

Figura 12 – Diferença entre a reação do CP e do CG



Fonte: Adaptado de Davidovits (2013)

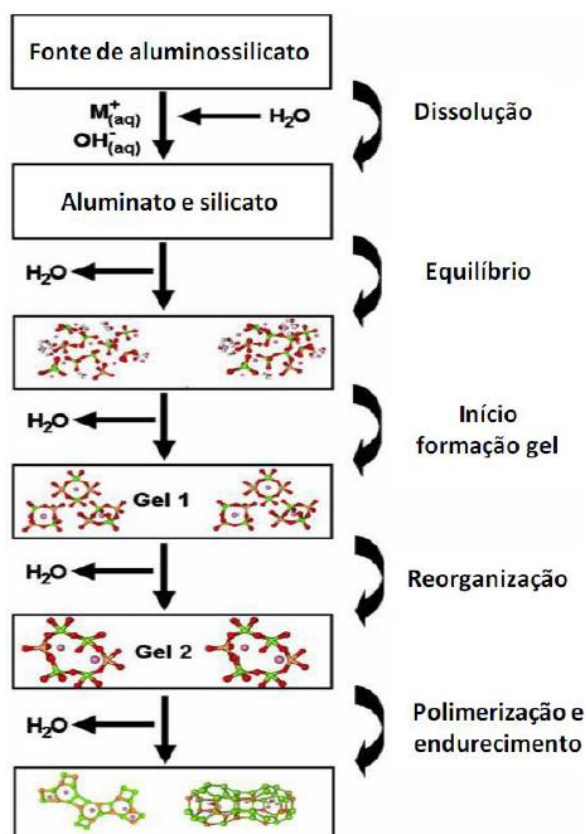
A geopolimerização ainda não está bem definida, onde vários estudos ainda pesquisam as reais razões pelas quais se formam os polímeros inorgânicos. Devido à complexidade dos geopolímeros, detalhar as fases da geopolimerização é um processo difícil. De uma maneira geral, o processo de geopolimerização abrange a reação química com modificação na estrutura da matéria-prima original. Basicamente, a ativação dos geopolímeros contempla as seguintes etapas de reações: destruição, coagulação, condensação e cristalização (SANTA, 2016).

Primeiramente, ao misturar os materiais aluminossilicosos amorfos junto com o ativador alcalino, inicia-se a dissolução, devido à alta alcalinidade, deixando assim, os íons de Al e Si livres. Após isso, as espécies se disseminam na solução e começam novas ligações. A união dos monômeros², de silício e alumínio, junto com oxigênio dão origem aos anéis de polímeros, condensando-os e precipitando-os em forma de gel. Quando todo o material disponível na reação se organiza, formando os poli(sialatos) e impedindo que novas reações iniciem, acontece o processo final de endurecimento da estrutura geopolimérica, conforme Figura 13 (SANTA, 2016).

Conforme Singh e Singh (2019), no modelo conceitual para a formação de geopolímeros, a dissolução da alumina e da sílica acontece em meio alcalino, geralmente compostos de hidróxidos e silicatos de Na e K. A troca entre as espécies e a reorganização conduzem à formação do gel geopolimérico.

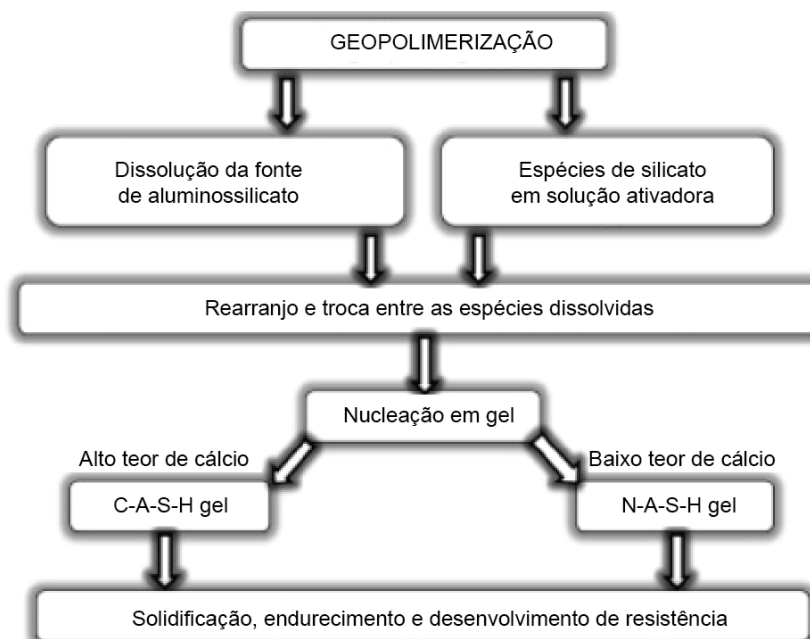
² Monômeros são, basicamente, as moléculas simples, normalmente orgânicas, que quando agrupadas, formam longas cadeias chamadas polímeros.

Figura 13 – Modelo conceitual da reação de geopolimerização



Esta formação de gel pode ser dividida em dois grupos dependendo da composição química dos precursores, Figura 14.

Figura 14 - Modelo conceitual da formação dos géis N-A-S-H e C-A-S-H



Quando o precursor tiver alto índice de cálcio, como a escória granulada de alto forno, será produzido um gel do tipo C-A-S-H, e quando o índice de cálcio for baixo, como exemplo a cinza volante e o metacaulim, será produzido um gel do tipo N-A-S-H. A solidificação e o endurecimentos desses géis que formam o geopolímero são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência (SINGH; SINGH, 2019).

2.2.3 Materiais de base e ativadores

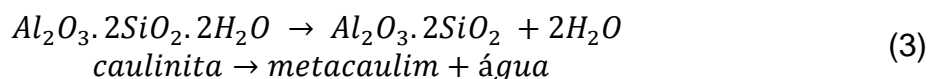
As propriedades dos geopolímeros dependem das características dos materiais de base: (a) composição química, (b) conteúdo de fase vítrea, (c) quantidade de silício e alumínio, (d) tamanho da partícula, (e) presença de partículas inertes, (f) morfologia, (g) estrutura mineralógica.

Existem muitos tipos de materiais que podem ser usados de base para os geopolímeros (ZHANG *et al.*, 2018). Para a formação do cimento geopolimérico, são usados, como fonte de aluminossilicatos, principalmente o metacaulim, a cinza volante e a escória granulada de alto forno. O metacaulim é a fonte de silício e alumínio e a escória granulada de alto-forno, como fonte de cálcio. Ainda, é adicionada a cinza volante, visando a melhoria das propriedades, a redução dos custos e para aliar-se às questões ambientais, pois a produção mundial de cinza volante está prevista para 2 bilhões de toneladas por ano até 2020 (SANTOS *et al.*, 2015 e MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para ativar os aluminossilicatos é necessária uma solução altamente alcalina que forneça condições para que aconteça uma reação de quebra das ligações (dissolução) da matéria-prima original. Esta solução pode ser simples, um hidróxido de metal alcalino, ou composta de um hidróxido e um silicato, onde geralmente os mais utilizados são os hidróxidos de sódio (Na) e potássio (K) (SANTA, 2016).

2.2.3.1 Metacaulim

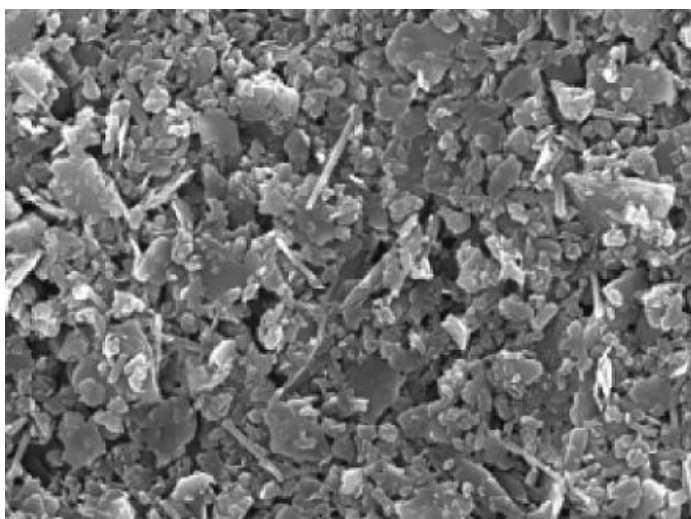
O metacaulim (MC) é um mineral aluminossilicoso oriundo da calcinação de variados tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins de alta pureza, conforme a Equação 3. Durante a calcinação, ocorre o processo de desidroxilação, onde a caulinita produz o metacaulim e água (DAL MOLIN, 2011).



Na presença de água, o metacaulim, formado de sílica e alumina, reage com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, para formar compostos com propriedades cimentícias (TIRONI *et al.*, 2012).

A Figura 15 mostra a micrografia do metacaulim. A pureza do caulim afeta sua reatividade e a sua tonalidade. Desta forma, quanto menor for a quantidade de sílica e alumínio, menor será a reatividade, e sua tonalidade será mais escura (DAL MOLIN, 2011). A composição química típica do metacaulim é observada na Tabela 2.

Figura 15 - Micrografia de partícula do metacaulim, ampliação 7500x



Fonte: Dal Molin (2011)

Tabela 2 - Composição química do metacaulim

Constituintes	Teor (%)
SiO ₂	51,52
Al ₂ O ₃	40,18
Fe ₂ O ₃	1,23
CaO	2,00
MgO	0,12
Álcalis	0,53
Perda ao fogo	2,01

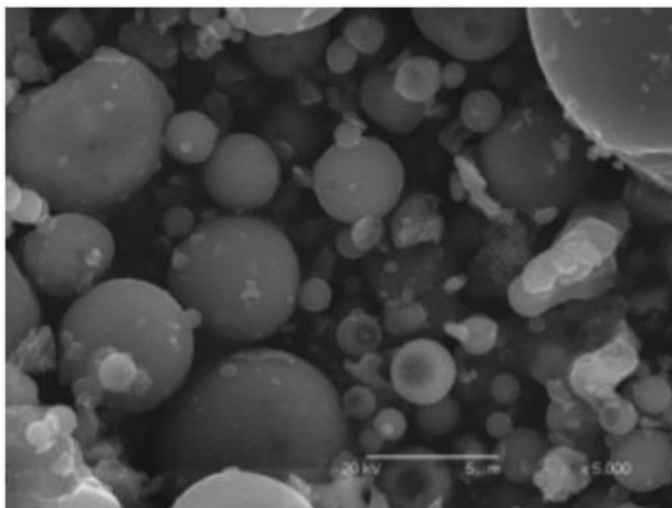
Fonte: Dal Molin (2011)

2.2.3.2 Cinza Volante

A cinza volante (CV) é um material oriundo da combustão do carvão pulverizado em usinas termoeletricas modernas, para a geração de energia, com a

temperatura de queima entre 1200°C e 1600°C. A cinza volante possui textura fina, com composição mineralógica predominantemente vítrea, obtida por precipitadores eletrostáticos ou mecânicos, onde suas partículas são tipicamente esféricas, e seu diâmetro varia de 1 a mais de 150µm, estando geralmente abaixo de 45µm, Figura 16 (DAL MOLIN, 2011).

Figura 16 - Micrografia de partícula de cinza volante, ampliação 5000x



Fonte: Dal Molin (2011)

As CVs são formadas por elementos de sílica e óxidos de alumínio, ferro, cálcio e magnésio, Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química típica de cinzas volantes nacionais

Constituintes	Teor (%)
SiO ₂	55,62 – 60,85
Al ₂ O ₃	28,85 – 29,25
Fe ₂ O ₃	7,15 – 3,15
CaO	1,36 – 2,32
MgO	0,94 – 0,48
SO ₃	0,35 – 0,20
Na ₂ O	0,23 – 0,36
K ₂ O	2,32 – 1,28

Fonte: John, Cincotto e Gomes da Silva (2003)

Dependendo do teor de cálcio, as cinzas podem ser divididas em duas categorias, classe C e classe F. A cinza F, produto da combustão de antracito e carvões betuminoso, possuem entre 10 e 15% de CaO. Enquanto que, a cinza C, obtida da combustão de carvões de lignita e sub-betuminosos, possui teor de cálcio entre 15 e 40% (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ainda, conforme a ASTM C 618 (ASTM, 2019), se a quantidade de CaO for de até 18%, a cinza é considerada como F, se a quantidade for acima de 18%, a cinza é considerada como classe C.

2.2.3.3 Escória granulada de alto forno

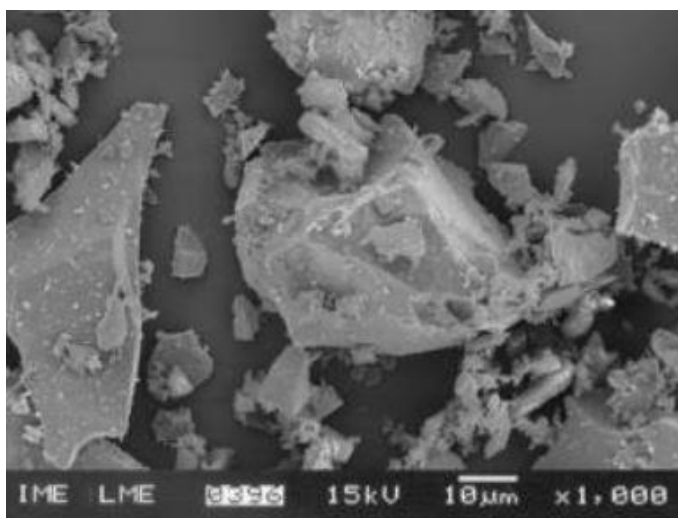
A escória granulada de alto forno (EGAF) é o subproduto da fabricação do ferro gusa (ferro fundido) nos altos-fornos. A estrutura da EGAF é de natureza vítrea, constituída principalmente de aluminossilicatos de cálcio, Tabela 4 (BATTAGIN, 2011). A EGAF é a combinação das impurezas do minério de ferro, das cinzas do coque (combustível e ativador da redução) e da cal utilizada, Figura 17 (BATTAGIN, 2011).

Tabela 4 - Composição química típica da escória granulada de alto forno

Constituintes	Teor (%)
CaO	40 – 45
SiO ₂	30 – 35
Al ₂ O ₃	11 – 18
MgO	2,5 – 9
Fe ₂ O ₃	0 – 2
FeO	0 – 2
S	0,5 – 1,5
CaO/SiO ₂	1,05 – 1,28

Fonte: John, Cincotto e Gomes da Silva (2003)

Figura 17 - Micrografia de partícula de escória granulada de alto forno, ampliação 1000x



Fonte: Silva et al. (2000)

2.2.3.4 Hidróxido de potássio e Silicato de sódio alcalino

A ativação alcalina é um processo químico que condiciona a transformação de estruturas vítreas em um material cimentício. A concentração do ativador deve ser suficiente para provocar a quebra das ligações, pois, quando em excesso, e ao entrar em contato com o ar, a solução ativadora restante inclina-se a formar carbonatos do próprio ativador (RAMOS, 2017).

Os ativadores podem variar conforme a matéria-prima disponível, e o resultado final dos geopolímeros depois da ativação alcalina é muito semelhante, mesmo com diferentes ativadores, dificultando a escolha dos ativadores (SANTA, 2016).

As soluções ativadoras são compostas por metal alcalino ou alcalino terroso. O par de hidróxido (MOH) e de silicato ($nSiO_2MO$), sendo M o sódio ou potássio, são os mais utilizados. Utilizando-se desses compostos juntos, é possível aumentar a velocidade da reação, pois os íons Na^+ e K^+ são considerados como catalisadores da reação (RAMOS, 2017).

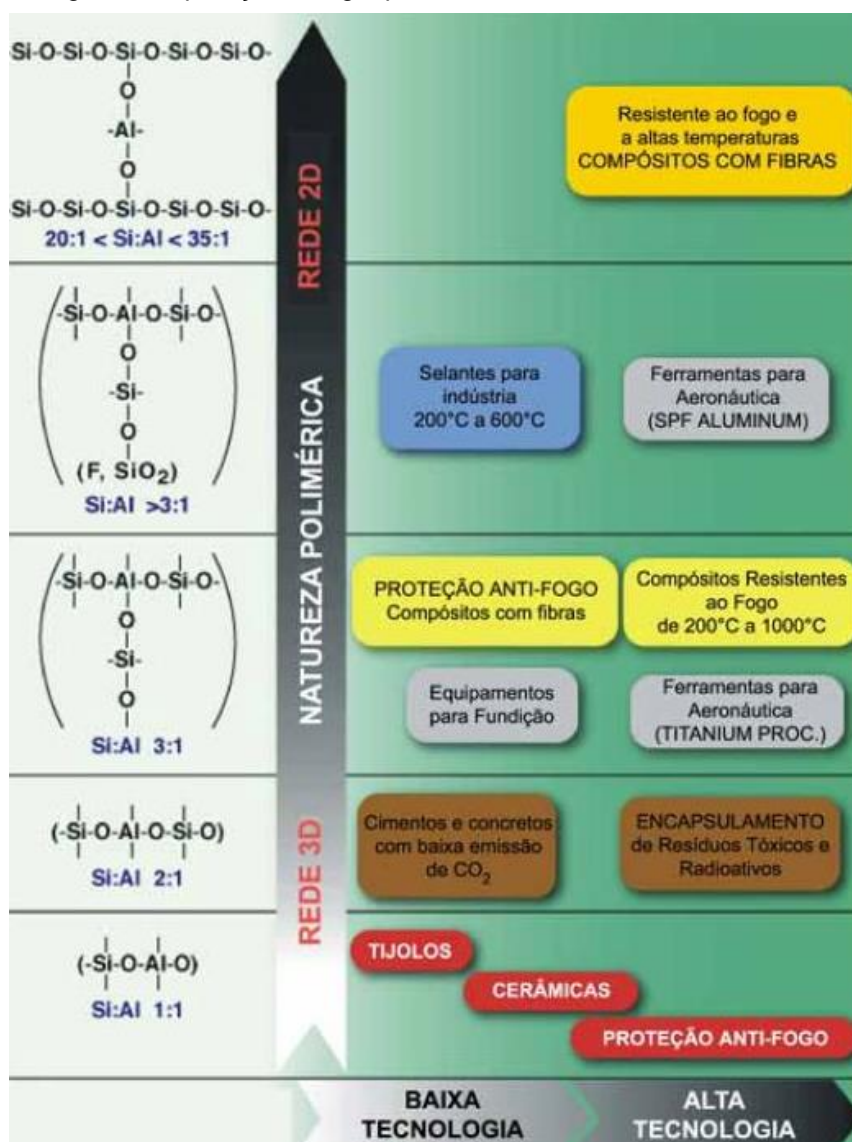
O hidróxido de potássio (KOH) tem a função de dissolver as matérias-primas, enquanto, o silicato de sódio alcalino (SS) exerce a função de ligante (MAZZA, 2010). Ativadores compostos dão lugar a um processo reativo mais rápido e aparentemente mais completo, quando comparados com os ativadores simples (PINTO, 2006).

2.2.4 Aplicações dos geopolímeros

Estes materiais, obtidos a partir da geopolimerização, está propiciando diferentes aplicações e procedimentos, transformando os processos e técnicas de fabricação já conhecidos (DAVIDOVITS, 1991).

É a razão molar de Si/Al das estruturas geopoliméricas que determina as propriedades e características dos produtos obtidos, e consequentemente, os campos de aplicação, conforme Figura 18 (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2004). Os geopolímeros, dependendo de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, podem ser aplicados em uma ampla área da indústria, embora alguns fatores de sua formação ainda não sejam totalmente compreendidos (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2004).

Figura 18 - Quadro geral de aplicação dos geopolímeros



Fonte: Pinto (2006).

Hoje, estes modernos materiais podem ser usados puros, com fílers ou reforçados, sendo encontrados na indústria de plástico, indústria automobilística e aeroespacial, metalurgia, e principalmente na área da engenharia civil (DAVIDOVITS, 1994). Além disso, estes compostos têm grande potencial de aplicação no encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos (DAVIDOVITS, 1988 *apud* WALLAH; RANGAN, 2006).

Na Austrália, Canadá e Europa, o cimento geopolimérico é utilizado em concretos para dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, reparações de rodovias e obras de infraestrutura (SONAFRANK, 2010 *apud* VASSALO, 2013).

2.2.5 Propriedades do cimento geopolimérico (CG)

Este tipo de cimento tem um tempo rápido de endurecimento, comparando-se ao CP, assim como, são mais resistentes aos problemas relacionados à durabilidade. A maior parte de sua resistência mecânica é adquirida dentro de 24 horas, e eles formam uma forte ligação com os agregados (DAVIDOVITS, 2013).

Os geopolímeros possuem grande resistência ao calor, ao fogo, a ácidos, e a ciclos de congelamento e degelo. Eles sofrem leve expansão térmica até 800°C, baixa porosidade aparente, e são estáveis em temperaturas superiores a 1200°C (GIANNOPOULOU; PANIAS, 2004). Essas propriedades tornam o CG passível de substituir o CP nas áreas da construção civil, produção de argamassas, pavimentação, pontes, engenharia hidráulica e militar (MAZZA, 2010)

As propriedades derivam das particularidades dos materiais que o compõem, como, a composição química, conteúdo da fase vítrea, tamanho das partículas e a presença de partículas inertes (ZHANG *et al.*, 2018).

2.3 ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

As argamassas geopoliméricas (AG) possuem propriedades e características distintas das argamassas tradicionais. Neste capítulo serão analisadas algumas dessas diferenças em relação à trabalhabilidade, tempo de pega, temperatura, propriedades físicas, resistência mecânica e durabilidade.

2.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade de argamassas no estado fresco determina as propriedades do estado endurecido. A água é usada para controlar a fluidez sem diminuir a resistência. O tipo de ativador alcalino tem grande influência no desenvolvimento da trabalhabilidade em argamassas geopoliméricas (ZHANG *et al.*, 2018).

Li *et al.* (2009) mostraram que existe uma tendência de diminuição da fluidez com o aumento do teor de pó de geopolímeros. Os estudos de Jumrat *et al.* (2011) apresentaram resultados onde a fluidez diminui com o aumento da razão de cinza volante/solução alcalina (solução de silicato de sódio – Na_2SiO_3 , e hidróxido de sódio - NaOH) devido à alta viscosidade do silicato de sódio. Huseien *et al.* (2016) também

obtiveram resultados mostrando que o uso de silicato de sódio como ativador alcalino pode reduzir a fluidez devido sua alta viscosidade. Misturas usando apenas o NaOH como ativador possuem melhor trabalhabilidade do que as misturas de NaOH e Na_2SiO_3 .

Kabir *et al.* (2015) produziram argamassas geopoliméricas com escória granulada de alto forno, metacaulim e cinza de óleo de palma, e os resultados indicaram que o aumento da escória reduz a fluidez. O estudo de Al-Majidi *et al.* (2016) confirmam que a trabalhabilidade das argamassas geopoliméricas diminuem com o aumento da EGAF. Isto deve-se à diferença das propriedades físicas das escórias, que possuem morfologia mais angular, prejudicial à trabalhabilidade.

2.3.2 Tempo de pega

O tempo de pega de argamassa com CP é maior do que as argamassas geopoliméricas (ZHANG *et al.*, 2018). Hasnaoui *et al.* (2019) obteve os mesmos padrões para o tempo de pega: AG tendem a endurecer mais rápido do que argamassas de cimento Portland.

Malkawi *et al.* (2016) concluíram que a quantidade de sódio (Na) é um dos fatores que afeta o tempo de pega, assim como, o teor de cálcio (Ca) tem um notável efeito nos tempos de pega de argamassas geopoliméricas: quanto maior a quantidade de cálcio, mais rápido será o tempo de pega inicial e final.

Laskar e Talukdar (2017) reportaram que argamassas geopoliméricas com apenas NaOH como ativador alcalino possuem maior tempo de pega do que as compostas por NaOH e Na_2SiO_3 . Al-Majidi *et al.* (2016) mostraram em seus estudos que o uso de escória granulada de alto forno reduz significativamente o tempo de pega de argamassas geopoliméricas.

2.3.3 Temperatura das argamassas geopoliméricas no estado fresco

Nos estudos de Bigno *et al.* (2005), quando compararam o calor de reação de argamassas geopoliméricas e argamassas de cimento Portland, as argamassas geopoliméricas tiveram menor calor de hidratação. Entretanto, para Zhang *et al.* (2018), a temperatura de argamassas geopoliméricas é maior do que as argamassas

compostas apenas de cimento Portland devido às complexas reações químicas da geopolimerização, que são exotérmicas.

A temperatura da argamassa geopolimérica no estado fresco aumenta com a adição da solução alcalina. Neste caso, mais água é necessária para dar trabalhabilidade à argamassa geopolimérica (ZHANG *et al.*, 2018).

Jumrat *et al.* (2011) concluíram que as argamassas geopoliméricas têm altas temperaturas logo após a mistura e, este valor decresce significativamente após 3 horas. A temperatura das argamassas aumenta com maiores quantidades de silicato de sódio alcalino e hidróxido de sódio. Existe uma diminuição na temperatura com o aumento de agregados finos.

2.3.4 Propriedades físicas de argamassas geopoliméricas

Steinerova (2011) afirma que a porosidade, a densidade aparente, e a distribuição dos poros são afetadas pelas argamassas geopoliméricas. Ainda, Al-Majidi (2016) afirma que o aumento de EGAF diminui a porosidade aparente de argamassas geopoliméricas. SINGH *et al.* (2015) concluíram que argamassas ativadas por silicato de sódio apresentaram baixos níveis de porosidade na interface e conseqüentemente melhor resistência à compressão, enquanto que, as ativadas por hidróxido de potássio eram altamente porosas na zona interfacial e com baixos valores de resistência à compressão.

Argamassas geopoliméricas possuem valor de pH menor do que argamassas de cimento Portland, significando que raramente a reação álcali-agregado irá acontecer (ZHANG *et al.*, 2018).

2.3.5 Resistência à compressão e à tração

Conforme Zhang *et al.* (2018), a resistência à compressão é o primeiro parâmetro a ser considerado em misturas de argamassas geopoliméricas. Geralmente, argamassas geopoliméricas possuem maior resistência à tração do que argamassas de cimento Portland. Como existem muitos tipos de material de base para a produção de geopolímeros, cada um desses materiais e sua proporção afeta de forma diferente a resistência à compressão. Ismail (2013) estudou a resistência inicial precoce de geopolímeros compostos por metacaulim e cinza de óleo de palma.

Vasconcelos (2011) concluiu que a resistência à compressão de geopolímeros à base de metacaulim é aprimorada com o uso de NaOH.

De acordo com Ken, Ramli e Ban, (2015), a natureza e a concentração do ativador alcalino são os fatores mais importantes no processo de ativação alcalina. Independentemente do tipo de ativador, em geral, a resistência à compressão cresce com o aumento da concentração. Os ativadores mais utilizados são: hidróxido de cálcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de sódio (NaOH) + carbonato de sódio (Na_2CO_3), hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3). Em estudos desenvolvidos, o ativador alcalino que possui maior potencial de ativação foi o silicato de sódio, e aquele com menor potencial foi o KOH. Esta diferença deve-se ao diâmetro iônico entre o sódio e o potássio.

Entretanto, Hosan *et al.* (2016), encontraram valores diferentes. A resistência à compressão foi mais alta nos geopolímeros ativados por potássio em vez de sódio. Houve maior índice de fissuração nos geopolímeros ativados por sódio, onde essas fissuras preexistentes tendem a causar falhas em baixas cargas. “Os reagentes à base de potássio podem apresentar maior potencial de reação, devido ao tamanho superior do átomo e à tendência de se associar com maior quantidade de moléculas de água” (RAMOS, 2017, p. 41).

Conforme os estudos de Temuujin *et al.* (2010) a ligação entre os ligantes geopoliméricos e o agregados, devido à força dos geopolímeros, determinou a resistência à compressão das argamassas. Em relação à temperatura de cura, Narayanan e Shanmugasundaram (2017) compararam os métodos de cura de argamassas geopoliméricas e descobriram que a argamassa geopolimérica curada em 80°C por 6 horas teve a mais alta resistência à compressão (ZHANG *et al.* 2018).

A produção de argamassas geopoliméricas, usando EGAF e CV, mostrou resultados em que a utilização da escória tem efeito positivo na performance de argamassas. Aumentando a quantidade de escória, aumenta a tendência de resistência à tração (AL-MAJIDI *et al.*,2016)

Geopolímeros exibiram melhores resultados de resistência à compressão com o aumento de substituição de cinza volante por escória granulada de alto forno. Para geopolímeros à base de metacaulim, cinza de óleo de palma e escória granulada de alto forno, a taxa de substituição de EGAF além de 35%, em massa, irá reduzir a resistência à compressão da argamassa (ZHANG *et al.*,2018).

A adição de pequenas quantidades de cal hidratada aumenta significativamente a resistência nos primeiros dias em mistura de cinza volante e escória granulada de alto forno ativadas por NaOH e silicato de sódio. A razão de CV e EGAF é um fator de extrema importância no desenvolvimento da resistência (CHI; HUANG 2013).

2.3.6 Durabilidade da argamassa geopolimérica

Muitos estudos têm sido realizados para verificar a resistência de argamassas geopoliméricas ao ataque de ácidos. Sreevidya *et al.* (2013) observaram que as argamassas geopoliméricas são extremamente resistentes ao ácido muriático e ao ácido nítrico, comparando-se a resistência à compressão antes e depois da imersão em soluções ácidas. Erdogan (2015) comparou a resistência ao ácido de vários tipos de ativadores alcalinos, e descobriu que a argamassa ativada por hidróxido de sódio é mais resistente ao ácido sulfúrico do que as argamassas ativadas por silicato de sódio (ZHANG *et al.* 2018).

Izzat *et al.* (2013) relataram que a perda de massa de argamassas geopoliméricas imersas por 120 dias em solução de ácido sulfúrico de 3%, é menor que a perda de massa das argamassas de CP. E que, em soluções de ácido sulfúrico a 10% o aumento do teor de cimento Portland em argamassas geopoliméricas acarretará em um aumento de perda de massa após a imersão.

2.4 ARGAMASSAS

Conforme a NBR 13281 (2005e, p.2), a argamassa é definida como “mistura homogênea de agregado(s) miúdos(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento”.

As argamassas podem ser classificadas quanto à natureza, tipo ou número de aglomerantes, quanto à consistência, plasticidade, densidade ou forma de preparo. Ou ainda, podem ser classificadas quanto à sua função, conforme Tabela 5, (CARASEK, 2007).

As argamassas, para exercerem apropriadamente suas funções, devem possuir características e propriedades que estejam de acordo com as condições a que estarão expostas. Devem ser compatíveis com as condições de execução, a natureza

da base, as especificações de desempenho e com o acabamento final previsto (ABCP, 2002). Para cada tipo de argamassa é associada sua respectiva função e seus principais requisitos e propriedades, conforme Tabela 6.

Tabela 5 - Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção

Função	Tipo
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria) Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alvenaria de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco Argamassa de camada única Argamassa de revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/ pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Carasek (2007)

Tabela 6 - Principais requisitos e propriedades para as diferentes funções das argamassas

Tipo de argamassa	Função	Principais requisitos/ propriedades
Argamassa de assentamento de alvenaria (elevação)	<ul style="list-style-type: none"> - Unir as unidades de alvenaria e ajuda-las a resistir aos esforços laterais - Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos - Absorver deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita - Selar as juntas 	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e retenção de água) - Aderência - Capacidade de absorver deformações - Resistência mecânica
Chapisco	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir aderência entre a base e o revestimento de argamassa - Contribuir com a estanqueidade da vedação 	<ul style="list-style-type: none"> - Aderência
Emboço e camada única	<ul style="list-style-type: none"> - Proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo - Integrar o sistema de vedação dos edifícios contribuindo com diversas funções (estanqueidade, etc.) Regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos 	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e retenção de água) - Baixa retração - Aderência - Baixa permeabilidade à água - Capacidade de absorver deformações - Resistência mecânica

Tabela 6 (continuação) - Principais requisitos e propriedades para as diferentes funções das argamassas

Contrapiso	Regularizar a superfície para receber acabamento (piso)	- Aderência - Resistência mecânica
Argamassa colante	- “Colar a peça cerâmica ao substrato - Absorver deformações naturais a que o sistema de revestimentos cerâmico estiver sujeito	- Trabalhabilidade (retenção de água, tempo em aberto, deslizamento e adesão inicial) - Aderência - Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) - principalmente para fachadas
Argamassa de rejuntamento (das juntas de assentamento das peças cerâmicas)	- Vedar as juntas - Permitir a substituição das peças cerâmicas - Absorver pequenas deformações do sistema	- Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e adesão inicial) - Baixa retração - Aderência - Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) - principalmente para fachadas
Argamassa de reparo de estruturas de concreto	- Reconstituição geométrica de elementos estruturais em processo de recuperação	- Trabalhabilidade - Aderência ao concreto e armadura originais - Baixa retração - Baixa permeabilidade e absorção de água (durabilidade)

Fonte: Adaptado de Carasek (2007)

2.5 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Neste capítulo serão apresentadas propriedades das argamassas no estado fresco, como a trabalhabilidade, o tempo de pega e o calor de hidratação.

2.5.1 Trabalhabilidade

“Trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea” (CARASEK, 2007, p. 875). A propriedade da trabalhabilidade é uma junção de diversas outras propriedades, conforme apresentado na Tabela 7. O comportamento da argamassa no estado fresco influencia diretamente as propriedades no estado endurecido (GOMES, GONÇALVES, FARIA, 2012).

A consistência e a plasticidade são apontadas como as principais propriedades que determinam a condição de trabalhabilidade. Estas duas propriedades estão interligadas, e os fatores que as influenciam são os mesmos: o teor de água, a

proporção entre aglomerantes e agregados, a distribuição granulométrica, o tipo de mistura e transporte, a forma de aplicação e as características do substrato (BAUER, 2005).

Tabela 7 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que, a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de consistência fluida apresentam maior tendência à exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

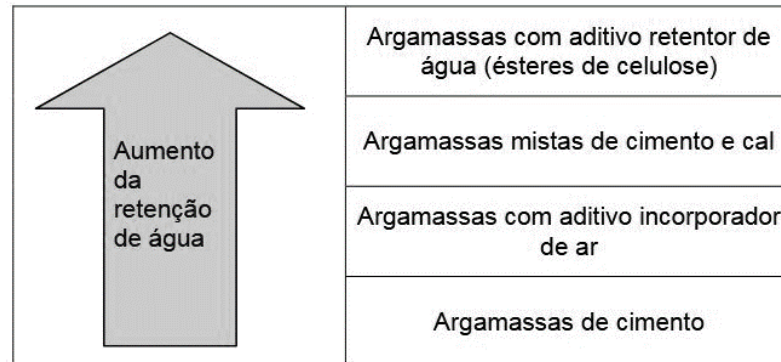
Fonte: Carasek (2007)

Existe uma relação direta entre a consistência e a viscosidade. A viscosidade é definida como a velocidade da deformação do corpo. Quanto maior a viscosidade, maior a consistência (RAGO, CINCOTTO, 1999). A NBR 16541 (ABNT, 2016b) recomenda adotar o índice de consistência da argamassa de $260 \pm 5\text{mm}$.

A retenção de água é uma importante propriedade quando a argamassa é empregada sobre substratos para manter sua trabalhabilidade sem a perda de água do amassamento. Essa propriedade interfere no comportamento da argamassa tanto no estado fresco (acabamento e na retração plástica), quanto no estado endurecido (aderência, resistência mecânica e durabilidade), sendo diferente dependendo da composição da argamassa, demonstrado na Figura 19 (CARASEK, 2007).

Essa característica da argamassa é fundamental pois permite a devida hidratação do cimento e o endurecimento da argamassa de forma progressiva, assegurando o desempenho almejado. Para obter-se um aumento na retenção de água das argamassas, é necessário aumentar a superfícies específica dos constituintes ou por meio da adição de aditivos (NAKAKURA, CINCOTTO, 2004). A ASTM C270 (ASTM, 2007) especifica que as argamassas devem reter, no mínimo, 75% de água.

Figura 19 - Variação da retenção de água para diferentes argamassas



Fonte: Carasek (2007)

A coesão de uma argamassa no estado fresco é uma importante propriedade que mantém unidos os agregados e ligantes, evitando a segregação, refletindo-se no estado endurecido, na resistência à tração (GOMES, GONÇALVES, FARIA, 2012). Segundo Rago e Cincotto (1999), a coesão está diretamente ligada aos constituintes mais finos, ou seja, à área específica dos sólidos. Para variar a coesão, é necessário alterar a superfície específica dos sólidos ou a quantidade de água na mistura.

A densidade de massa, também conhecida como massa específica, varia com o teor de ar e com a massa específica dos materiais constituintes, principalmente do agregado. Quanto mais leve for uma argamassa, mais fácil para trabalhar por um longo período. A Tabela 8 classifica as argamassas conforme a densidade (CARASEK, 2007).

Tabela 8 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa (g/cm³)	Usos/Observações
Leve	< 1,40	Isolamento térmico e acústico
Normal	2,30 ≤ A ≤ 1,40	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Blindagem radiação

Fonte: Carasek (2007)

A adesão inicial, também chamada de “pegajosidade”, está vinculada às características da pasta aglomerante, onde a baixa tensão superficial da pasta é responsável pela adesão física ao substrato. É esta propriedade que possibilita que a argamassa se prenda ao substrato logo após sua aplicação (PAES, 2004). O teor de cimento na composição das argamassas influencia na tensão superficial. Quanto maior a quantidade de cimento, menor a tensão superficial. A adição de cal nas argamassas também diminui a tensão (CARASEK, 2007).

A maneira como ocorre a adesão inicial é resultado de características da trabalhabilidade e da porosidade da argamassa e da rugosidade da base (PAES, 2004). A ocorrência de falhas na adesão inicial pode ocorrer tanto pela absorção reduzida quanto pela absorção excessiva, que consequentemente irá influenciar na resistência mecânica, na aderência e na durabilidade das argamassas (POSSAN, GAVA, PETRAUSKI, 2002).

2.5.2 Tempo de pega

Conforme Mehta e Monteiro (2014), as reações de hidratação do cimento são as causas para as manifestações físicas de enrijecimento e endurecimento do concreto. O tempo de início de pega e fim de pega determinam a taxa de solidificação da pasta fresca de cimento e sua trabalhabilidade.

O início da pega estipula o limite de manuseio, o momento em que a pasta não pode mais ser adequadamente misturada, ou seja, quando esta torna-se não trabalhável. O tempo de fim de pega está relacionado ao início do desenvolvimento da resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A composição química do cimento, relação água/cimento, temperatura e a presença de aditivos são fatores com influência direta no tempo de início e fim de pega (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

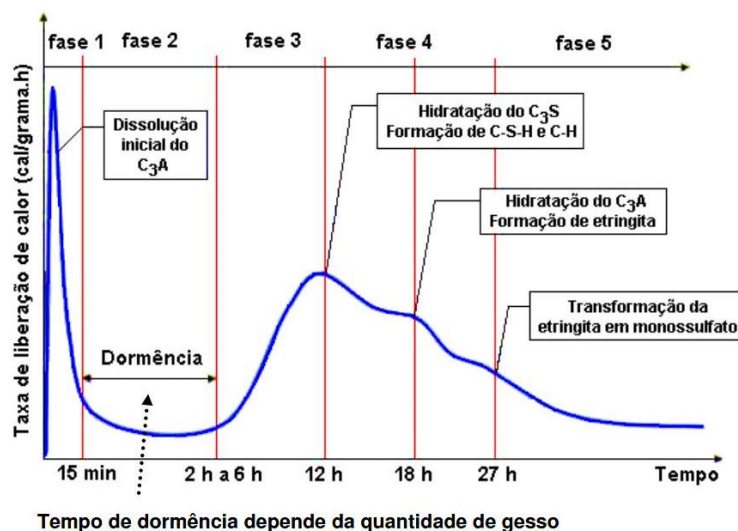
2.5.3 Calor de hidratação

A hidratação do cimento Portland é uma reação exotérmica, ou seja, quando em contato com água, os compostos reagem e o processo libera energia em forma de calor. As taxas de calor liberadas podem ser usadas como índices de suas reatividades, caracterizando os comportamentos de pega e endurecimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O aumento da temperatura no interior, durante a hidratação do cimento, pode levar ao aparecimento de fissuras, permitindo a entrada de agentes agressivos, e consequente redução da resistência e durabilidade da peça (MAUÁ, 2019).

A reação de hidratação do concreto, logo após as primeiras horas, faz com que sejam liberados os produtos de hidratação: hidróxido de cálcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), etringita, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e é esse processo que causa um aumento na temperatura da massa, Figura 20 (TECNOSIL, 2017).

Figura 20 - Fases da pasta conforme a liberação de calor x tempo decorrido



Fonte: Freitas Jr. (2013)

2.6 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste capítulo serão apresentadas algumas propriedades das argamassas no estado endurecido, como: variação dimensional, resistência à tração na flexão e à compressão, durabilidade, absorção de água, condutividade térmica, módulo de elasticidade e resistência de aderência à tração.

2.6.1 Resistência mecânica

Conforme Mehta e Monteiro (2014), a resistência é definida como a capacidade de resistir à tensão sem se romper. As argamassas deverão ter resistência para suportar a movimentação da base devido a recalques, variação dimensional (umedecimento e secagem), ou dilatação e contração (variações de temperatura) (TRISTÃO, 1995).

A argamassa deve absorver pequenas deformações, sem apresentar rupturas, para não comprometer a durabilidade. A capacidade das argamassas de resistirem a esforços de tensões à tração, à compressão e ao cisalhamento é relacionada à

resistência mecânica (DIÓGENES, 2016). De acordo com Mehta e Monteiro (2014) existe uma relação entre as resistências de compressão e tração, porém, não há proporcionalidade. À medida que a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas em uma taxa menor.

De acordo com Diógenes (2016), a resistência mecânica das argamassas é influenciada pela natureza e consumo dos ligantes e agregados. Ainda, o consumo de água é uma variável determinante na resistência à compressão, à tração na flexão, na aderência à tração e no módulo de elasticidade.

Quanto maior o teor de cimento, maior será a resistência à compressão e à tração das argamassas. A cal, em pequenas quantidades, influencia positivamente na resistência. Altos valores de água/cimento diminuem a resistência (QUARCIONI; CINCOTTO, 2005). Conforme Mehta e Monteiro (2014), existe uma relação inversa entre a porosidade e a resistência.

Segundo a ASTM C270 (ASTM, 2007), as argamassas que contêm cal na sua composição devem apresentar resistência à compressão igual ou superior a 2,40MPa.

2.6.2 Resistência de aderência à tração

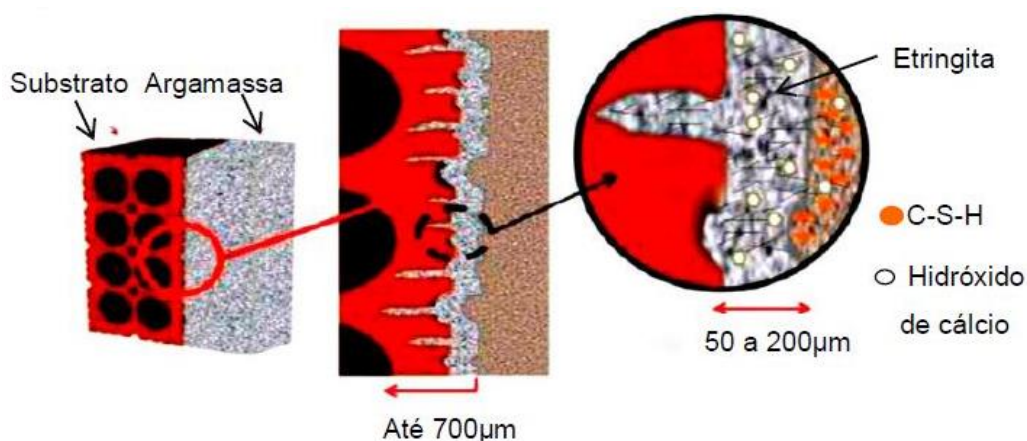
A NBR 13528 (ABNT, 2019, p.1) define que a aderência é “a propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na interface com o substrato”, onde, avalia-se a interação entre o substrato e o revestimento. A resistência de aderência à tração é a tensão máxima suportada quando submetida a um esforço.

A aderência deriva de três propriedades: a resistência de aderência à tração, a resistência de aderência ao cisalhamento, e a extensão de aderência (área de contato efetivo). A ligação entre o substrato e a argamassa endurecida é um fenômeno mecânico, que decorre da penetração da argamassa nos poros, e um fenômeno químico, devido às reações e às forças eletrostáticas (DIÓGENES, 2016; CARASEK, 2007).

Características das próprias argamassas (materiais constituintes, reologia, retenção de água, etc.) e dos substratos (rugosidade, porosidade, sucção de água) podem exercer influência na propriedade de aderência, além das condições climáticas (temperatura, vento, umidade relativa), as técnicas de execução (manual ou mecanizada) e a limpeza e o preparo da base (CARASEK, 2007).

A água é extremamente relevante na função de aderência. Ela é responsável por carregar as partículas de cimento entre a argamassa e os poros do substrato. Quando a pasta entra no processo de hidratação dentro dos poros, ela precipita hidróxidos e silicatos, promovendo a aderência ao revestimento. Os cristais de etringita, dentro dos poros, são os responsáveis por essa resistência, conforme esquema apresentado na Figura 21 (DIÓGENES, 2016).

Figura 21 - Esquema de aderência entre a argamassa e o substrato



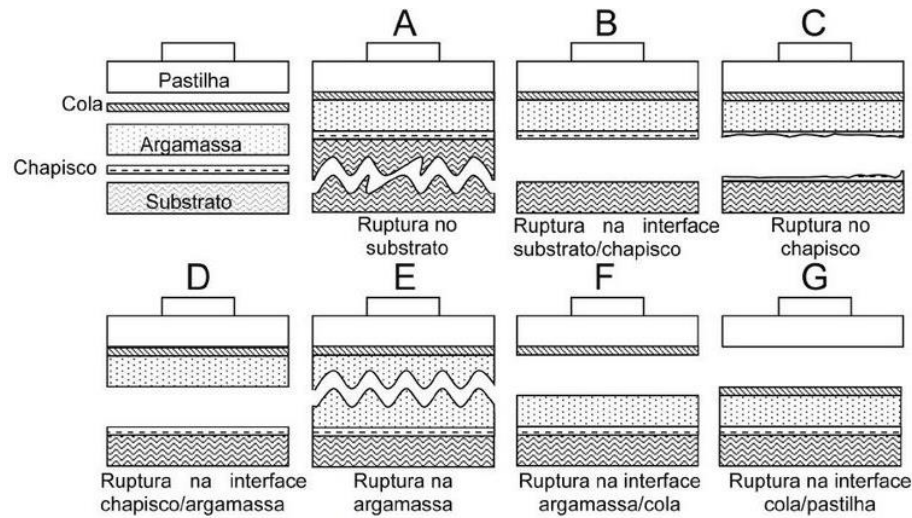
Fonte: Diógenes (2016)

As argamassas compostas por cal e cimento são as mais adequadas em relação à aderência, pois a cal possui maior capacidade de preencher as cavidades. Argamassas com alto teor de cimento, possuem maior aderência, entretanto, também possuem maior tendência de fissuração. Já em relação à areia, esta deve conter composição granulométrica contínua, pois, quanto maior o módulo de finura, melhor a aderência (CARASEK, 2007).

O descolamento e quedas de pedaços de revestimento são consequências da falta de aderência. É importante analisar o tipo de ruptura para determinar a porção mais fraca do revestimento (CARASEK, 2007). A Figura 22 exemplifica os tipos de ruptura.

O ensaio para avaliar a resistência de aderência à tração, também conhecida como resistência ao arrancamento, é definido pela NBR 13528 (ABNT, 2019). A NBR 13749 (ABNT, 2013) determina os limites de resistência de aderência à tração conforme local de aplicação (teto ou parede) e tipo de acabamento, conforme Tabela 9.

Figura 22 - Formas de ruptura



Fonte: ABNT (2010).

Tabela 9 - Limites de resistência de aderência à tração

Local		Acabamento	Ra (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
		Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
		Cerâmica	≥ 0,30
Teto			≥ 0,20

Fonte: ABNT (2013)

2.6.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, também chamado de módulo de Young, é definido como a razão entre a tensão aplicada e a deformação específica de um corpo (PACHECO *et al.*,2014). “A elasticidade é a capacidade de deformação que as argamassas apresentam sem que ocorra ruptura, retornando as suas dimensões iniciais quando cessam as solicitações que lhe são impostas” (SILVA; CAMPITELI, 2000, p.1).

Conforme Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade é afetado por diversos fatores, entre eles: umidade do corpo de prova, matriz cimentícia, interface da zona de transição, agregado, porosidade, entre outros.

A elasticidade é representada pela resistência do material à deformação. O módulo de elasticidade e a durabilidade estão diretamente ligados. Os problemas patológicos de fissuração ocorrem quando a argamassa é impedida de se deformar, ou quando ultrapassa seu limite elástico, que irá fazer com que surja tensão de tração

na argamassa, dando origem às rupturas e posteriores problemas referentes à impermeabilização e aderência (DIÓGENES, 2016).

Quanto maior o consumo de cimento, maior o valor do módulo de elasticidade, menor é a capacidade de deformação das argamassas, resultando em um maior número de fissuras. As argamassas confeccionadas com cal hidratada apresentam baixo módulo de elasticidade, ou seja, suportam as pequenas movimentações e reduzem o aparecimento de trincas, fissuras e descolamentos (DIÓGENES, 2016).

2.6.4 Durabilidade

Diversos fatores podem influenciar na durabilidade das argamassas, acarretando na diminuição da vida útil e no aparecimento de manifestações patológicas que afetam a estética destes revestimentos (DIÓGENES, 2016). A deterioração das argamassas geralmente se manifesta através da desagregação, descolamento, fissuração, e aumento da porosidade e permeabilidade (CARASEK, 2007).

Esses processos de deterioração são classificados em físico-químicos, químicos e biológicos, conforme fluxograma (Figura 23). A deterioração pode ser originada tanto por causas internas à própria argamassa, quanto por fatores externos (intempéries, umidade de infiltração). Os materiais constituintes, o traço (composição) e os processos de execução das argamassas têm influência direta na durabilidade das argamassas (CARASEK, 2007).

As areias constituem cerca de 60% a 80% das argamassas, resultando em significativa influência no desempenho final. O agregado miúdo mais utilizado é constituído de quartzo, proveniente da areia de rio, com alto índice de impurezas que são desfavoráveis à qualidade, ou ainda, de areias artificiais da britagem de rochas ígneas ou metamórficas, constituídas por carbonatos de cálcio e magnésio. Em relação à composição mineralógica, deve-se atentar para a reatividade das areias para desviar-se da deterioração dos revestimentos devido à reação álcali-agregado (RAA). No que concerne à granulometria, deve-se atentar para a retração (GUIMARÃES, 2002; CARASEK, 2007).

Figura 23 - Classificação dos processos de deterioração



Fonte: Carasek (2007)

O cimento Portland pode afetar a durabilidade das argamassas influenciando na retração, devido sua finura, e o seu teor de álcali, que contribui para a eflorescência. Cimentos com alto teor de álcalis (Na_2O e K_2O), durante a hidratação do cimento, convertem-se em hidróxidos, que em contato com o CO_2 da atmosfera, transformam-se em carbonatos de sódio (Na_2CO_3) e potássio (K_2CO_3), altamente solúveis em água (GUIMARÃES, 2002; CARASEK, 2007).

Quando utilizada a cal, deve-se atentar para aquelas de baixa qualidade, que podem afetar sua função de aglomerante. O principal problema com a cal hidratada é a presença de óxidos não hidratados em teor excessivo, que reagem com a umidade após o endurecimento da argamassa. A reação retardada de hidratação dos óxidos é expansiva e não há espaço para os novos produtos formados, causando assim, a deterioração da argamassa (CARASEK, 2007). A Tabela 10 identifica as patologias provenientes da cal hidratada.

Tabela 10 - Manifestações patológicas da hidratação da cal

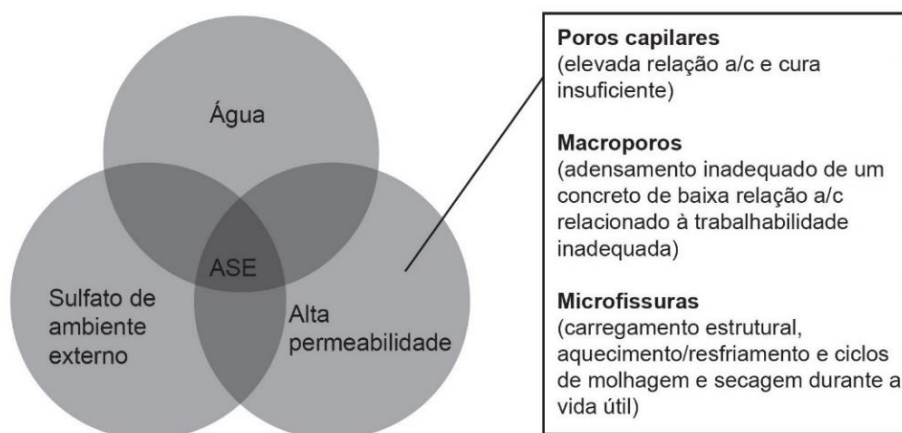
Manifestação patológica	Hidratação retardada	
	Óxido de cálcio	Óxido de magnésio
	Vesículas de interior branco	Desagregação de emboços/camada única. Empolamento da camada de reboco (casos antigos)
Período médio de aparecimento dos sintomas	Nos primeiros meses após a aplicação da argamassa	Após vários meses ou até anos.

Fonte: Carasek (2007).

2.6.5 Ataque por sulfatos

O ataque de sulfato pode manifestar-se na forma de expansão e fissuração, aumentando a permeabilidade e a entrada de água e consequente deterioração, ou ainda, na diminuição progressiva da resistência e perda de massa, devido à perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento, conforme Figura 24 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 24 - Representação diagramática - ataque de sulfato externo (ASE)



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Conforme Mehta e Monteiro (2014), O hidróxido de cálcio e os produtos da hidratação do cimento Portland que contêm alumina são os mais suscetíveis ao ataque por sulfatos. Na pasta de cimento hidratada, quando o Ca(OH)_2 entra em contato com o sulfato, os hidratos que contêm alumina se convertem na forma altamente sulfatada, a etringita, ou ainda, em gipsita.

A etringita causa expansão no concreto, efeito que pode ser associado à pressão de crescimento dos cristais ou adsorção de água em meio alcalino. A gipsita

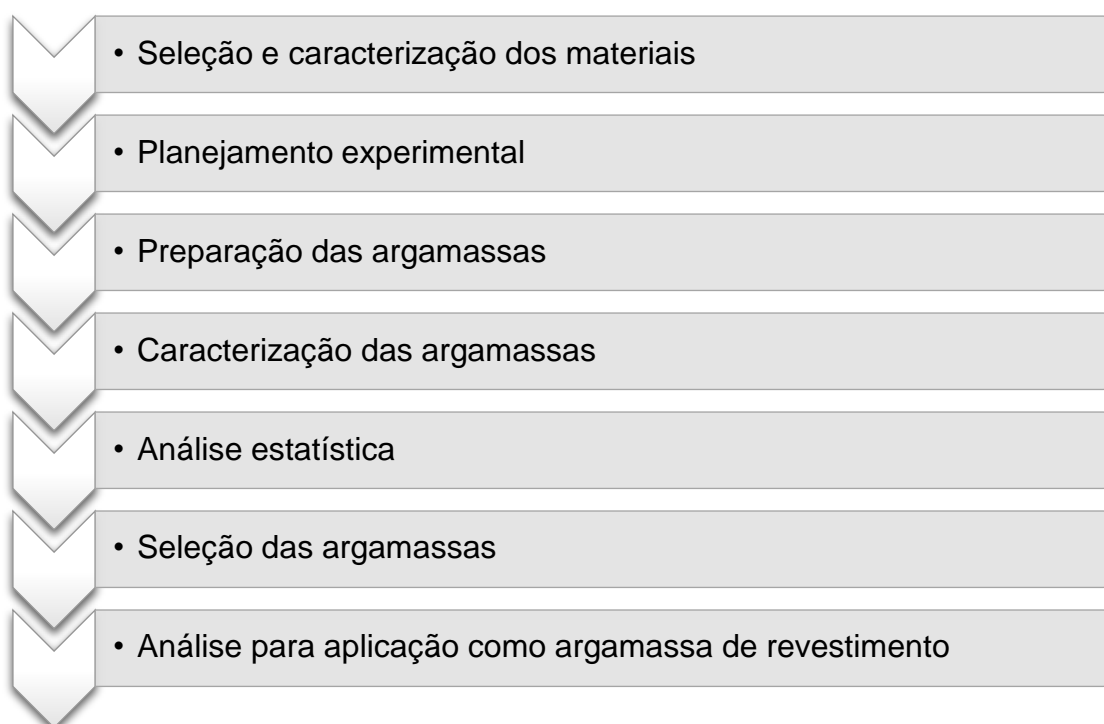
também pode causar expansão, devido um processo que reduz o pH do sistema, com consequente perda de rigidez e resistência, que causa expansão e fissuração. O C-S-H também pode converte-se em gipsita, dependendo do cátion da solução de sulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Desta forma, utilizar de adições que tendam a absorver o hidróxido de cálcio dentro do sistema do cimento hidratado visa originar produtos menos vulneráveis (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quando analisados em laboratório, por meio de ciclos de molhagem e secagem que aceleram o processo de deterioração, os efeitos de ataque por sulfatos podem ser estimados por alterações no módulo de elasticidade dinâmico, perda de massa, expansão, diminuição do corpo de prova ou até mesmo visualmente (NEVILLE, 2016).

3 METODOLOGIA

A realização do procedimento experimental desta pesquisa compreende, resumidamente, as etapas conforme Figura 25. Cada etapa do procedimento foi realizada conforme exigências de normativas nacionais e/ou internacionais. As etapas detalhas são apresentadas posteriormente neste mesmo capítulo.

Figura 25 – Etapas do procedimento experimental

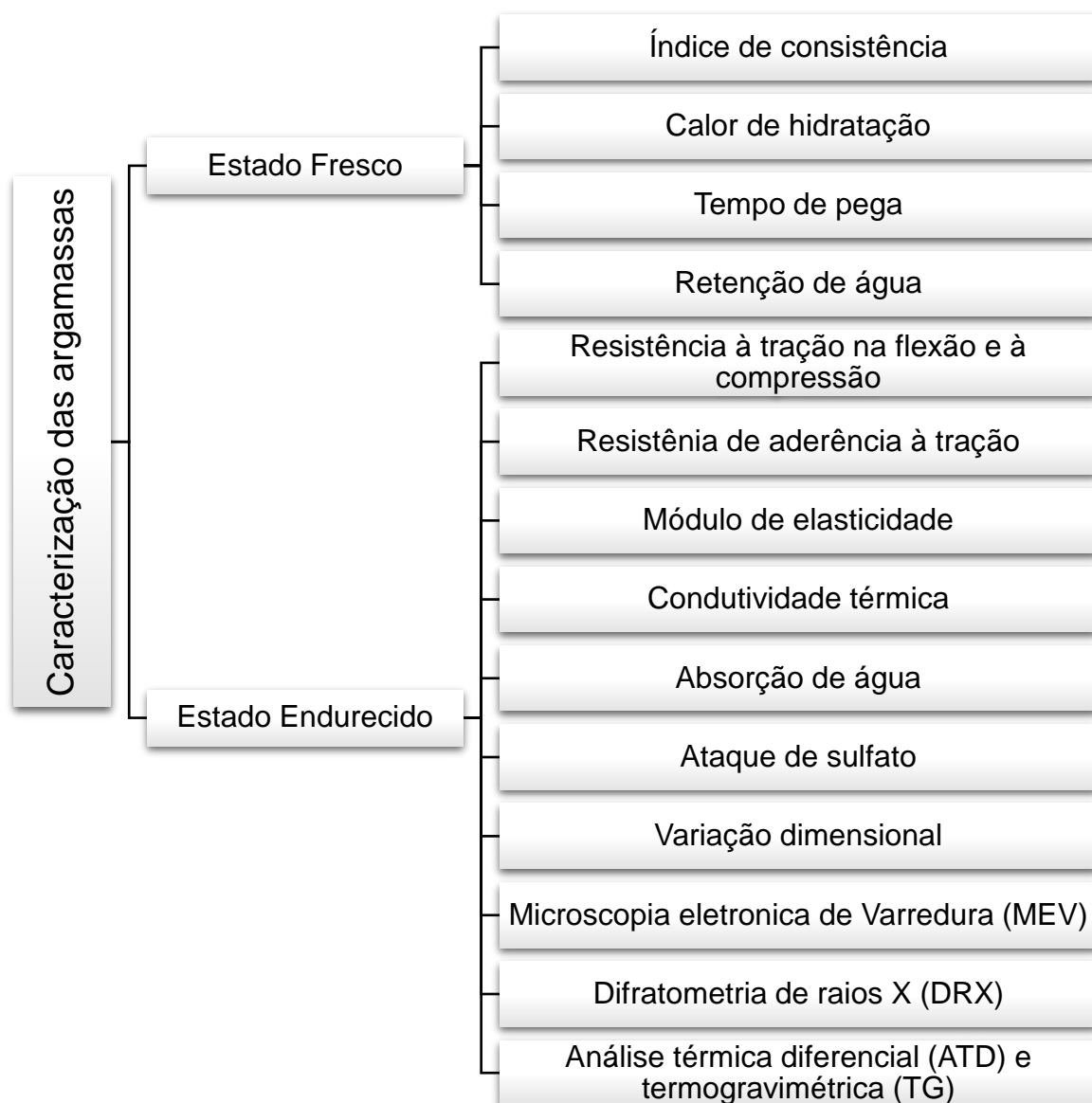


Fonte: A Autora (2020).

Com o objetivo de analisar o comportamento das argamassas, os ensaios de caracterização, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, estão descritos no esquema representado pela Figura 26.

Para a caracterização do material, preparação das argamassas, e análise de propriedades mecânicas, foi utilizado o Laboratório de Materiais de Construção Civil. Para os ensaios de caracterização térmica e microestrutural das argamassas utilizou-se, o Laboratório de Análise Térmica, Laboratório de Raio X e Laboratório de Metalografia e Microscopia ótica. Os laboratórios mencionados são da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Centro de Ciência Tecnológica (CCT).

Figura 26 - Caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido



Fonte: A Autora (2020).

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Para a confecção da argamassa de referência foram utilizados os seguintes materiais: água, cimento Portland CP II F-32, cal hidratada e areia. Para as argamassas geopoliméricas, além destes materiais, foi utilizado também o cimento geopolimérico, composto por misturas de rejeitos industriais (cinza volante e escória granulada de alto forno) e metacaulim. O ativador alcalino utilizado é composto por hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio alcalino (SS).

3.1.1 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento público da cidade, fornecida pela Companhia Águas de Joinville.

3.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland escolhido é da marca Supremo Secil Cimentos – Maxifort, tipo CP II F-32, considerado como cimento Portland composto. É indicado para uso e aplicações em geral, atendendo desde estruturas de concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento (SUPREMO, 2019).

O cimento CP II F-32 foi selecionado por ser um cimento composto apenas por clínquer e material carbonático, sem adições de material pozzolânico ou EGAF, para não interferir nas análises do cimento geopolimérico.

3.1.3 Cal

A cal hidratada selecionada no preparo das argamassas é do tipo CH-III. Este tipo de cal é indicada e utilizada para a construção civil devido seu alto rendimento e durabilidade para argamassas de assentamento e revestimento, estando dentro dos padrões exigidos de pureza. A cal CH-III auxilia na prevenção de trincas, proporciona elasticidade e melhora a impermeabilidade (FRICAL, 2019).

Em argamassas de cal e cimento, a cal é capaz de auxiliar a hidratação do cimento, na trabalhabilidade e na capacidade de absorver deformações, além de ser responsável pela maior retenção de água na argamassa (ABCP, 2002). “Por ser um produto muito fino, a cal, funciona como um perfeito lubrificante, que reduz o atrito entre os grãos da areia presentes na argamassa, proporcionando uma boa “liga” à massa, ainda fresca, o que permite uma melhor aplicação” (INMETRO, 2004).

Na argamassa geopolimérica, foi estabelecido, de início, a utilização da cal com o propósito de melhorar as propriedades de aderência da argamassa em temperatura ambiente, conforme os estudos de Nath e Sarker (2017). A adição de pequenas quantidades de cal hidratada aumenta significativamente a resistência nos primeiros dias em mistura de cinza volante e escória granulada de alto forno (CHI; HUANG 2013).

3.1.4 Agregado miúdo – areia

A areia utilizada é proveniente da Mineração Veiga, localizada no município de Araquari – SC. Foi escolhida a areia MF.60/70 ARG, Figura 27, a qual é indicada para uso em argamassas em geral e argamassas colantes, do tipo ACI e ACII. O teor de argila é considerado elevado (VEIGA, 2019). Conforme informações do fabricante, esta areia é proveniente de cava, e sua composição é formada por 99% de sílica.

Figura 27 - Areia MF.60/70 ARG



Fonte: A Autora (2020)

3.1.5 Cimento de geopolímero

O geopolímero utilizado na realização deste trabalho é composto por três precursores e dois ativadores. A base do cimento de geopolímero é constituída a partir da mistura de dois rejeitos industriais – cinza volante (CV), Figura 28(a), e escória granulada de alto forno (EGAF), Figura 28(b) -, e metacaulim (MC), Figura 28(c). A ativação alcalina dos aluminossilicatos ocorre pela junção do hidróxido de potássio (KOH) e o silicato de sódio alcalino (SS).

A composição do geopolímero, conforme Tabela 11, definindo o teor dos precursores (parte em pó) e o teor dos ativadores (parte líquida), foi estabelecido no início deste estudo, baseado na pesquisa realizada na instituição por Samoel Schwaab (2019).

Figura 28 - Precursores, (a) cinza volante, (b) escória granulada de alto forno, (c) metacaulim



Fonte: A Autora (2020)

Tabela 11 - Composição cimento de geopolímero

GEOPOLÍMERO					
Relação em peso	Percursor			Ativador	
	1,0			0,8	
Proporções (%)	MC	CV	EGAF	KOH	SS
	36%	30%	34%	40%	60%

Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

As características dos geopolímeros mudam de forma significativa dependendo das propriedades da matéria-prima e da variedade e quantidade do ativador. Deste modo, para cada exigência específica é produzido um geopolímero com características próprias (GONÇALVES, 2016). O teor, em porcentagem, de cada componente do cimento geopolimérico (MC, CV, EGAF, KOH e SS) desta pesquisa não pode ser modificado devido à influência direta nas características finais do geopolímero, pois pretendia-se estudar a substituição do CP pelo CG, e não cada componente isolado.

A escolha dos precursores e dos ativadores, como citado, foi fundamentada na pesquisa de Schwaab (2019). Ele estudou a formulação de cimentos geopoliméricos com três precursores (MC, CV e EGAF) e quatro ativadores (hidróxido de potássio - KOH, solução de aluminato de sódio - SA, silicato de potássio - SK, e silicato de sódio alcalino - SS), nas proporções máximas e mínimas, em peso, conforme Tabela 12, para as propriedades de densidade aparente, absorção de água e a resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Existe uma área, dentro dos limites estabelecidos, que atinge melhores resultados para as propriedades acima mencionadas, tanto para os precursores (Figura 29a) quanto para os ativadores (Figura 29b). No ponto em vermelho da Figura

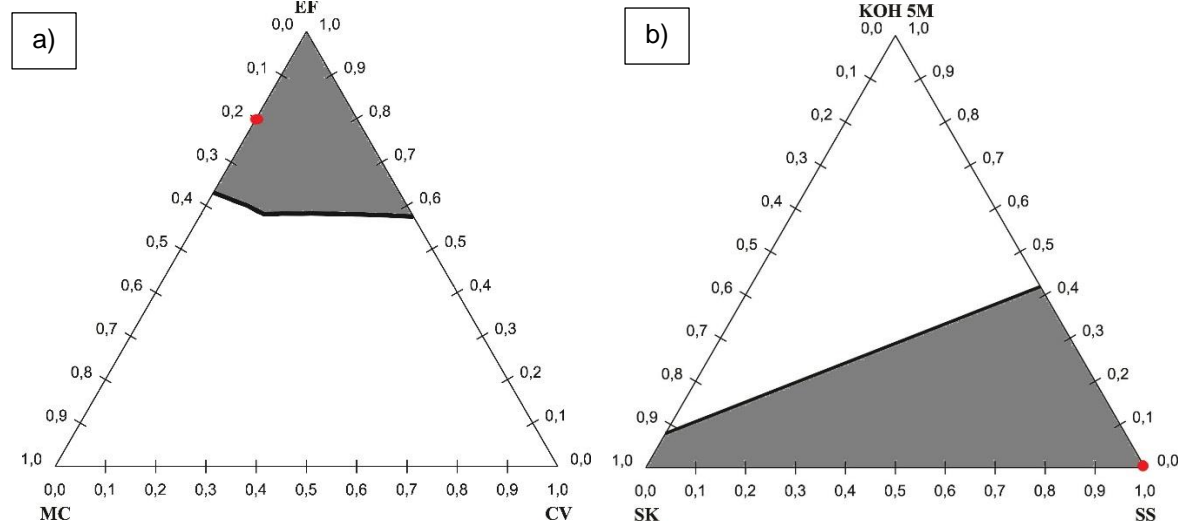
29a está a percentagem de precursores utilizada, de 36% de MC, 30% de CV e 34% de EGAF. Esse valor foi selecionado por obter melhor uniformização da pasta, mesmo não atingindo desempenho máximo. No ponto em vermelho da Figura 29b, está a percentagem de ativadores selecionada, 60% de SS e 40% de KOH, por atingir os melhores resultados para as propriedades acima mencionadas, principalmente para os ensaios de resistência: RC7 de $37,87 \pm 3,91$ MPa e RC28 de $45,11 \pm 6,43$ MPa (SCHWAAB, 2019).

Tabela 12 – Limites adotados dos precursores e dos ativadores do cimento geopolimérico

GEOPOLÍMERO			
Precursores	Limite em peso (%)	Ativadores	Limite em peso (%)
Metacaulim	30 – 60	Hidróxido de potássio	40 – 100
Cinza Volante	30 – 60	Solução de aluminato de sódio	0 – 40
Escória Granulada de Alto forno	10 – 40	Silicato de potássio	0 – 60
		Silicato de sódio alcalino	0 – 60

Fonte: Schwaab (2019)

Figura 29 - Gráfico da área otimizada: a) precursores, b) ativadores



Fonte: Adaptado de Schwaab (2019)

Todos os aluminossilicatos em que a razão atômica Si/Al varie de 1 a 3 tendem a ser usados como precursores para a formação de ligantes para a construção. À medida que o valor dessa razão aumenta, obtem-se materiais adequados para outros tipos aplicações (PINTO, 2006). Conforme literatura, a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ indicada como ideal para a produção de geopolímeros varia de 3,0 a 5,5 (DAVIDOVITS, 1982 *apud* VASSALO, 2013). A razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, para o cimento geopolimérico utilizado neste trabalho foi de 3,44.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Foram realizados os ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa específica aparente e massa unitária para a caracterização do agregado miúdo (areia). A caracterização do cimento CP II F-32 foi obtida do próprio fabricante.

Como o presente trabalho é uma continuação e aplicação do estudo realizado por Samoel Schwaab (2019), cuja pesquisa teve como intuito a elaboração de formulações de cimentos geopoliméricos. Desta forma, os resíduos utilizados nesta pesquisa para a formação dos geopolímeros foram caracterizados previamente por Samoel Schwaab (2019).

3.2.1 Determinação da composição granulométrica da areia

A granulometria da areia tem influência direta nas propriedades das argamassas, e nas proporções entre os aglomerantes e a água (ABCP, 2002), conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Relação entre as propriedades e as características da areia

Propriedades	Características da areia		
	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontinua for a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Elasticidade	Pior	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistencia mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: Guimarães (2002)

Devido à grande influência que a composição granulométrica da areia tem nas propriedades das argamassas, o ensaio para determinar o módulo de finura, a dimensão máxima das partículas do agregado e a curva granulométrica foram definidos pelo método de peneiramento, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Primeiramente, 1kg de areia foi separada e seca em estufa até a amostra atingir constância de massa. Para a realização do ensaio, duas amostras de 300g foram pesadas em balança de precisão e reservadas. O conjunto de peneiras, denominadas como normal, foi disposto na seguinte ordem de abertura de malhas: fundo, 0,15mm,

0,30mm, 0,60mm, 1,18mm, 2,36mm e 4,75mm. As amostras do agregado miúdo foram peneiradas, de forma que, após 1 minuto de peneiramento contínuo, por meio de agitação manual, não passasse quantidade significativa de material em cada peneira. O material retido em cada peneira e no fundo foi separado e pesado.

O diâmetro máximo do agregado foi definido através da abertura nominal da peneira, em mm, onde o agregado apresentou uma porcentagem de massa retida acumulada igual ou menor a 5% e o módulo de finura foi determinado pelo somatório das massas retidas acumuladas nas peneiras da série normal. A areia MF.60/70 ARG utilizada na produção das argamassas possui módulo de finura de 1,31 e o diâmetro máximo de 0,6mm.

A curva granulométrica da areia, deve atender aos limites definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para estar dentro dos limites da zona utilizável. Podem ser utilizados materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

3.2.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente da areia

Conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009b, p.1), massa específica é a “relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis”. O método para a determinação da massa específica foi realizado conforme a norma citada.

Primeiramente, foi separado 1kg de areia e colocado em um recipiente com água durante 24 horas. Após esse período, o excesso de água foi despejado e o agregado saturado foi colocado para uma secagem uniforme até atingir a condição de superfície saturada seca. O agregado miúdo foi então colocado dentro do molde tronco-cônico e compactado por 25 golpes. O molde foi retirado verticalmente e o cone de agregado desmoronou parcialmente, confirmando que a areia chegou a condição necessária para realização do ensaio.

Em seguida, foi pesado 500g de areia na condição de superfície saturada seca (m_s), e colocada dentro de um frasco 500 ± 5 ml, e pesada a massa do conjunto (m_1), frasco + areia. Este frasco foi preenchido com água até próximo de 500ml. O conjunto foi imerso dentro de um recipiente com água, em temperatura entre $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 1 hora. Em seguida, completou-se o frasco com água até a marca de 500ml, e pesou-se o conjunto (m_2), frasco + areia + água. A areia foi retirada do frasco, e seca em

estufa, em temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até atingir massa constante. Depois de resfriada, a massa da areia (m) foi pesada.

A massa específica aparente do agregado miúdo seco, a massa específica do agregado saturado em superfície seca, a massa específica (agregados a serem utilizados em concreto em sua condição natural de umidade), e o volume de água adicionado foram calculados conforme as Equações 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (5)$$

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (6)$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (7)$$

Onde, d_1 é a massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3); m é a massa da amostra seca em estufa (g); V é o volume do frasco (cm^3); V_a = volume da água adicionada ao frasco (cm^3); m_1 é a massa do conjunto (frasco + agregado, em g); m_2 é a massa total (frasco + agregado + água, em g); ρ_a é massa específica da água (g/cm^3); d_2 é a massa específica do agregado saturado em superfície seca (g/cm^3); m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g); d_3 é a massa específica do agregado (g/cm^3);

A massa específica aparente do agregado seco (d_1) foi de $2,57 \text{ g/cm}^3$, a massa específica do agregado saturado em superfície seca (d_2) foi de $2,57 \text{ g/cm}^3$, e a massa específica do agregado (d_3) foi de $2,58 \text{ g/cm}^3$.

3.2.3 Determinação da massa unitária da areia

O ensaio para determinar a massa unitária do agregado miúdo foi realizado conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006). A massa unitária é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume do recipiente, e o volume de vazios é o espaço entre os grãos de uma massa de agregado (ABNT, 2006). É necessário o

conhecimento da massa unitária para determinar as quantidades utilizadas para cada material, transformando a proporção dos materiais de volume para massa

Para a realização do ensaio, a amostra do agregado miúdo foi seca em estufa ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) até atingir a constância da massa e um recipiente com volume conhecido foi se separado. Este recipiente foi preenchido despejando-se areia de uma altura de 50mm da borda. A camada superficial foi nivelada, e o recipiente foi pesado. O procedimento foi realizado três vezes. A massa unitária do agregado miúdo foi determinada pela Equação 8, sendo o resultado final a média dos três valores obtidos. A massa unitária do agregado miúdo foi de $1,50\text{g/cm}^3$.

$$y = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (8)$$

Onde, y é a massa unitária do agregado (kg/cm^3); m_{ar} é a massa do recipiente mais o agregado (kg); m_r é a massa do recipiente vazio (kg); e V é o volume do recipiente (m^3).

3.2.4 Caracterização do Cimento Portland CP II F-32

A tabela 14 apresenta a composição química e mineralógica do cimento.

Tabela 14 - Composição química e mineralógica do CP II F-32

Análise Química	
Elemento	Quantidade (%)
SiO ₂	16,3
Al ₂ O ₃	4,0
Fe ₂ O ₃	2,6
CaO	58,3
MgO	5,7
SO ₃	2,7
K ₂ O	0,9
Na ₂ O	0,21
Cl	0,0
CO ₂	9,4
Cal livre	0,5
Perda ao Fogo	10,9
Resíduo Insolúvel	3,6
Fator de saturação da cal	112,2
Módulo de Sílica	2,5
Módulo de alumina	1,5

Tabela 14 (continuação) - Composição química e mineralógica do CP II F-32

Análise Mineralógica	
C ₃ S	43,03
C ₂ S	9,54
C ₃ A	2,70
C ₄ AF	7,09

Fonte: Supremo (2019).

Conforme informações do fabricante, o cimento CP II F-32 utilizado possui massa específica de 3,03g/cm³, resistência à compressão aos 7 dias de 30MPa, e resistência à compressão aos 28 dias de 36MPa.

A NBR 16697 (2018) exige alguns requisitos mínimos para o CP II F-32, entre eles: possuir resíduo insolúvel $\leq 7,5$; perda ao fogo $\leq 12,5$; e trióxido de enxofre (SO₃) $\leq 4,5$; CO₂ $\leq 11,5$; resistência à compressão aos 7 dias ≥ 20 MPa e 28 dias ≥ 32 MPa. Sendo assim, o CP II F-32 utilizado está de acordo com as exigências desta norma.

3.2.5 Caracterização da Cinza Volante

A CV foi moída em moinho de bolas até a partícula atingir tamanho inferior à 44 μ m (SCHWAAB, 2019). Ela é oriunda, *in natura*, da termoelétrica Tractebel Energia e distribuída pela empresa Pozofly, de Capivari de Baixo – SC. Possui densidade de 2,19g/cm³ e sua composição química pode ser observada na Tabela 15.

Tabela 15 - Composição química da Cinza Volante

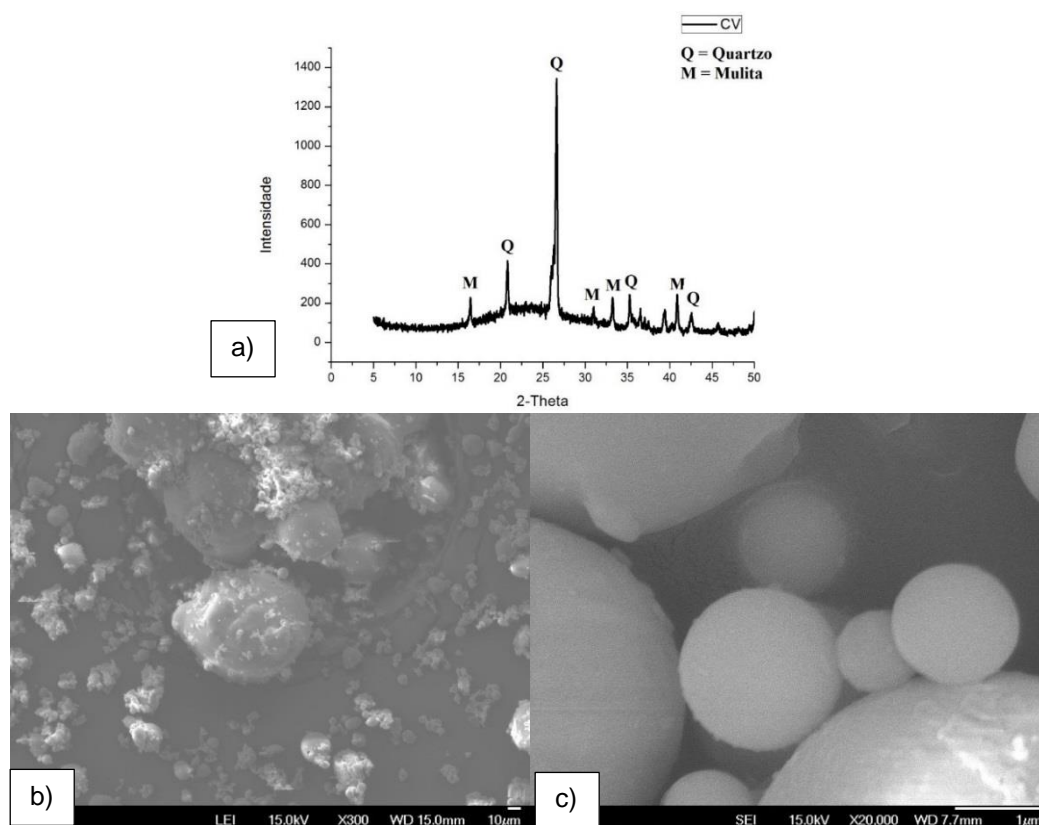
Elemento	Teor (%)
Al ₂ O ₃	25,8
CaO	1,6
Fe ₂ O ₃	5,3
K ₂ O	3,4
MgO	0,8
MnO	< 0,05
Na ₂ O	0,6
P ₂ O ₅	0,1
SiO ₂	59,1
TiO ₂	1,3
Perda ao fogo	1,1
Relação molar SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,9

Fonte: Schwaab (2019).

A cinza volante selecionado neste trabalho é da classe F, ou seja, possui baixo teor de cálcio, e conforme pesquisas, a classe F oferece melhor resistência quando comparada à classe C (NARAYANAN;SHANMUGASUNDARAM, 2017).

A Figura 30(a) apresenta a análise por difração de raios X (DRX), e a Figura 30(b) e 30(c), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) da CV. As fases cristalinas presentes são o quartzo e a mulita cujas partículas são tipicamente esféricas com superfícies lisas (SCHWAAB, 2019). Conforme Narayanan e Shanmugasundaram (2017), as cinzas volantes classe F são geralmente vítreas, com a presença de quartzo e mulita.

Figura 30 - Cinza volante: (a) DRX (b) MEV, ampliação de 300x e (c) MEV, ampliação de 20.000x



Fonte: Schwaab (2019).

3.2.6 Caracterização da Escória Granulada de Alto Forno

A EGAF tem partícula de até 44µm e foi fornecida por uma empresa do ramo de cimentos. Sua massa específica é de 2,97g/cm³ e sua composição encontra-se na Tabela 16.

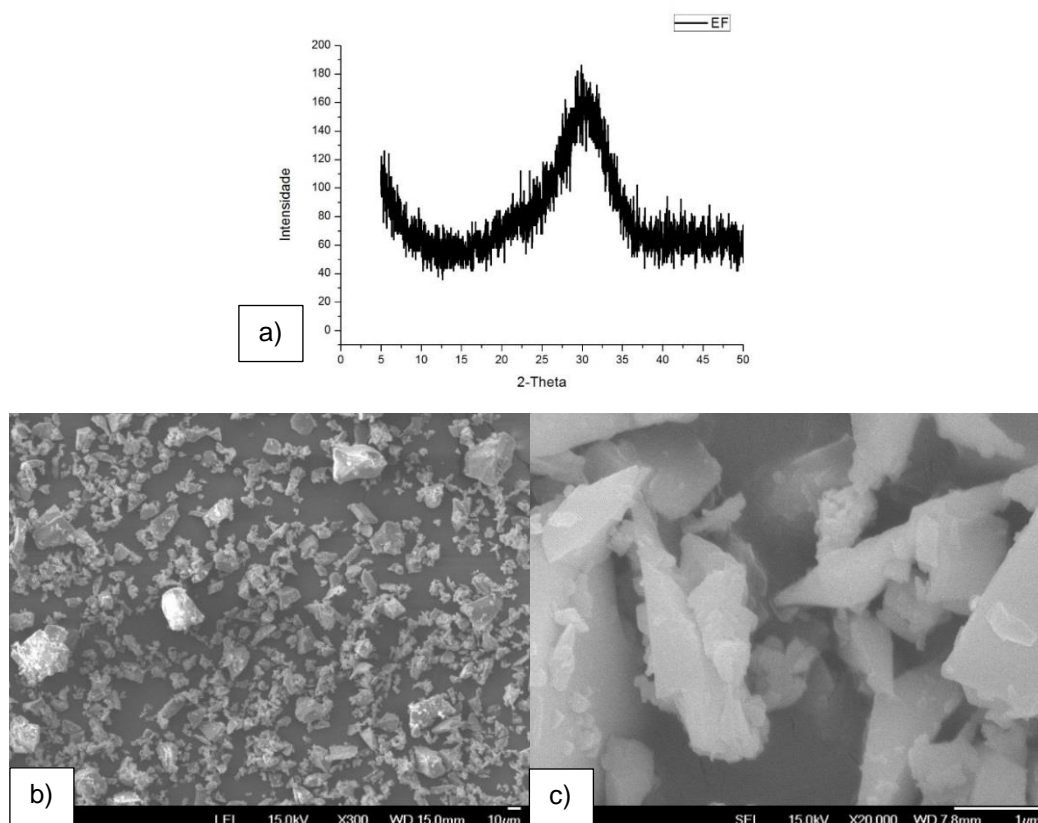
Tabela 16 - Composição química da escória granulada de alto forno

Elemento	Teor (%)
Al_2O_3	12,7
CaO	44,3
Fe_2O_3	0,3
K_2O	0,6
MgO	4,8
MnO	0,9
Na_2O	0,2
P_2O_5	< 0,05
SiO_2	33,0
TiO_2	0,7
Perda ao fogo	< 0,05
Relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,41

Fonte: Schwaab (2019).

A Figura 31(a) apresenta a análise por difração de raios X (DRX), e a Figura 31(b) e 31(c) a microscopia eletrônica de varredura (MEV) da EGAF. Não é possível identificar as fases pois apresenta comportamento amorfo e suas partículas possuem dispersão mais uniforme (SCHWAAB, 2019).

Figura 31 - Escória granulada de alto forno: (a) DRX (b) MEV, ampliação 300x e (c) MEV, ampliação 20.000x



Fonte: Schwaab (2019).

A EGAF foi utilizada como fonte de CaO, possui 33% de SiO₂ e 12,7% de Al₂O₃. A escória pode ser considerada de alta reatividade, pois o valor encontrado, quando aplicada a relação (Equação 9) é de 1,8 (SCHWAAB, 2019).

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1 \quad (9)$$

3.2.7 Caracterização do Metacaulim

O metacaulim (MC) possui massa específica de 2,70g/cm³ e sua composição química está descrita na Tabela 17.

Tabela 17 - Composição química do metacaulim

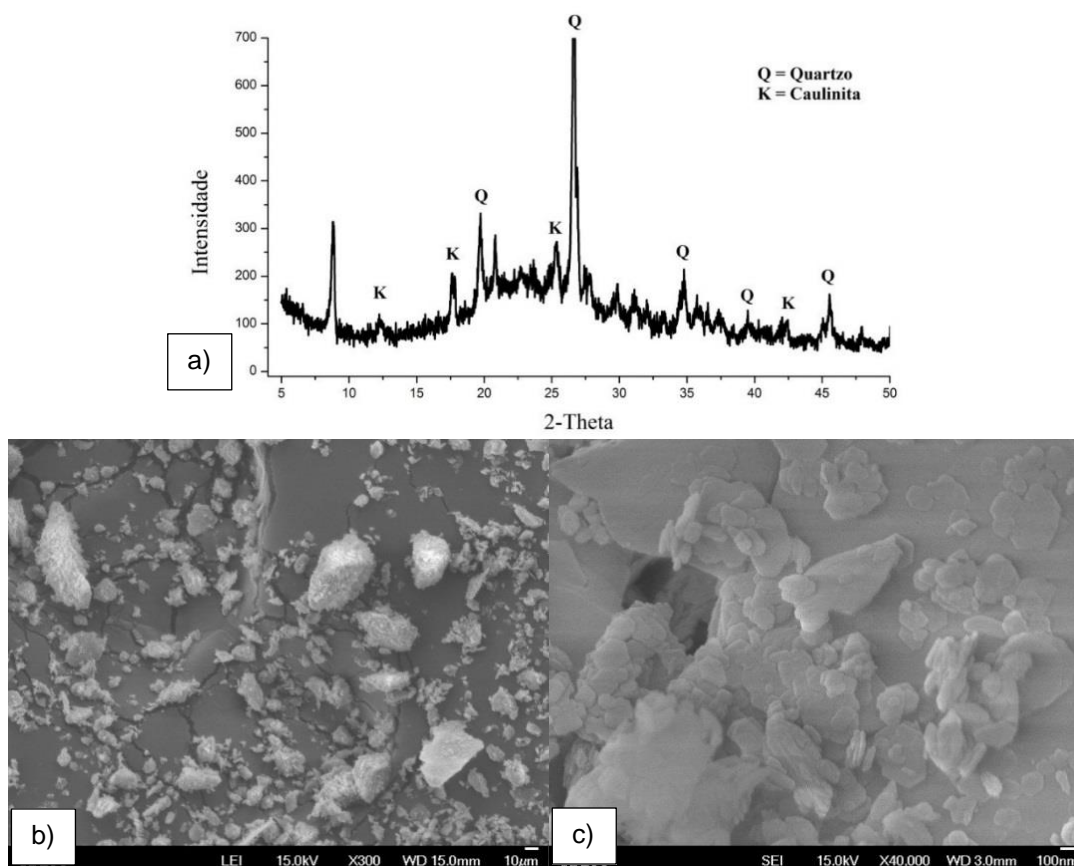
Elemento	Teor (%)
Al ₂ O ₃	33,7
CaO	0,1
Fe ₂ O ₃	2,9
K ₂ O	0,9
MgO	0,9
MnO	< 0,05
Na ₂ O	< 0,05
P ₂ O ₅	0,1
SiO ₂	55,8
TiO ₂	1,4
Perda ao fogo	2,2
Relação molar SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,8

Fonte: Schwaab (2019).

A figura 32(a) apresenta a análise por difração de raios X (DRX) e a figura 32(b) e 32(c) a microscopia eletrônica de varredura (MEV) do MC. O DRX apresentou picos cristalinos de quartzo e caulinita, onde a presença de quartzo é considerada como impureza neste material e a caulinita indica que o tratamento térmico não foi suficiente para torná-lo mais reativo. Na figura 32(c) é possível identificar algumas estruturas em forma hexagonal, típicas da caulinita presente no material (SCHWAAB, 2019).

A razão molar SiO₂/Al₂O₃ do MC é levemente inferior ao adequado (mínimo 3:1 segundo DAVIDOVITS, 2015), sendo necessária assim uma fonte extra de SiO₂ para atingir a proporção molar de 3. O MC, já beneficiado, do tipo comercial, com partículas inferiores à 44µm, foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil S.A., de São Paulo, proveniente de jazidas de Ijaci, Minas Gerais.

Figura 32 - Metacaulim: (a) DRX (b) MEV, ampliação 300x e (c) MEV, ampliação 40.000x



Fonte: Schwaab (2019).

3.2.8 Hidróxido de Potássio e Silicato de Sódio Alcalino

O silicato de sódio alcalino (SS), também conhecido como vidro líquido, foi fornecido pela empresa Quimidrol. Conforme o fabricante, o SS é um líquido viscoso incolor a turvo, inodoro, com massa específica de 1,560 a 1,585 g/cm³, pH de 10,5 até 12,0, e relação parte por peso de óxido de silício (SiO₂) para óxido de sódio (Na₂O) de 2,10 a 2,20. A composição química do material, conforme Tabela 18, foi fornecida pela empresa fabricante.

Tabela 18 - Porcentagem de óxidos presentes em silicato de sódio alcalino

Óxidos	Porcentagem em massa (%)
Na ₂ O	14,50 a 15,50
SiO ₂	31,50 a 33,00
H ₂ O	54,00 a 51,50

Fonte: adaptado de Quimidrol (2020)

O hidróxido de potássio (KOH), também conhecido como potassa cáustica, foi disponibilizado pela empresa Quimidrol, na forma de escamas. Um sólido branco,

higroscópico, solúvel em água, com pH igual a 14, densidade aparente de 2,04 kg/dm³ e grau de pureza de 85%. Este foi utilizado na concentração de 5 mol/L para controlar o ajuste de pH.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL (DOE)

A argamassa de referência foi definida na proporção, em volume, de 1 : 1,5 : 5,5 (cimento: cal: areia), comumente utilizada para a alvenaria de tijolos de 6 furos. Com base na massa específica e massa unitária, essa proporção foi transformada de volume para massa (1; 1,042; 7,68). A relação água/cimento (W/C) iniciou em um fator de 2,5, e foi alterado por meio de correções até a argamassa atingir consistência no intervalo de 260 ± 5mm. No final, o valor obtido para a relação W/C foi de 1,87, em massa (KRETZER *et al.*, 2019).

A metodologia para a elaboração das argamassas geopoliméricas de revestimento foi realizada através de um planejamento experimental, por meio de projeto fatorial 3², sem réplicas. Foram utilizados métodos estatísticos e de metodologia de superfície de resposta para análise dos resultados do índice de consistência e da resistência à compressão.

Os fatores do projeto fatorial definidos para o delineamento das misturas de argamassas foram: relação agregado/cimento (A/C), em massa, e teor de substituição (TS), em porcentagem, do cimento Portland pelo cimento geopolimérico, em massa. A Tabela 19 apresenta os fatores com seus respectivos níveis.

Tabela 19 – Limites dos fatores adotados das argamassas

Nível	Fator	
	A/C	TS (%)
Menor	6,11	10
Médio	6,90	30
Maior	7,69	50

Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

Utilizou-se o *software* Statistica 13.0 (StatSoft, Inc., 2015) para a obtenção da ordem aleatória de realização das misturas, visando à diminuição de erros nas repetições, tanto do equipamento, quanto do operador. Foram 9 misturas de argamassas geopoliméricas, e 1 mistura da argamassa de referência, totalizando 10 misturas. A Tabela 20 apresenta o delineamento das misturas.

Tabela 20 - Misturas do projeto fatorial

Mistura	Nomenclatura	A/C*	TS (%)	Mistura	Nomenclatura	A/C*	TS (%)
1	R611T10	6,11	10	6	R769T50	7,69	50
2	R690T30	6,90	30	7	R690T10	6,90	10
3	R611T50	6,11	50	8	R611T30	6,11	30
4	R769T10	7,69	10	9	R690T50	6,90	50
5	R769T30	7,69	30	10	Referência	7,69	0

*Para calcular a relação de agregado/cimento, é necessário somar os dois tipos de cimento, o cimento Portland e o cimento geopolimérico.

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

Para a identificação das argamassas, foram adotadas as seguintes nomenclaturas: R611, R690 e R769, para indicar, respectivamente, a relação A/C de 6,11: 6,90 e 7,69, em massa. Assim como, T10, T30, e T50, para indicar o TS, em massa, de 10%, 30% e 50%, respectivamente.

A Tabela 21 apresenta os componentes e as quantidades de materiais utilizados para a produção de 8 corpos de provas prismáticos, de 40 x 40 x 160 mm, para cada tipo de mistura de argamassa.

Tabela 21 - Misturas do projeto fatorial 3² completo

MISTURA	CP (g)	CG* (g)	MC 36%	CV 30%	EGAF 34%	KOH 40%	SS 60%	Água** (g)	Cal (g)	Areia (g)
R611T10	171,0	19,0	7,0	5,5	6,5	6,0	9,0	340,0	198,0	1160,5
R690T30	133,0	57,0	20,5	17,0	19,5	18,0	27,5	309,5	198,0	1310,5
R611T50	95,0	95,0	34,0	28,5	32,5	30,5	45,5	279,0	198,0	1160,5
R769T10	171,0	19,0	7,0	5,5	6,5	6,0	9,0	340,0	198,0	1460,5
R769T30	133,0	57,0	20,5	17,0	19,5	18,0	27,5	309,5	198,0	1460,5
R769T50	95,0	95,0	34,0	28,5	32,5	30,5	45,5	279,0	198,0	1460,5
R690T10	171,0	19,0	7,0	5,5	6,5	6,0	9,0	340,0	198,0	1310,5
R611T30	133,0	57,0	20,5	17,0	19,5	18,0	27,5	309,5	198,0	1160,5
R690T50	95,0	95,0	34,0	28,5	32,5	30,5	45,5	279,0	198,0	1310,5
Referência	190,0	-	-	-	-	-	-	355,0	198,0	1460,5

*O cimento de geopolímero é a soma do MC, CV e EGAF (parte sólida).

** O valor da parte líquida manteve-se constante em 355g. É necessário somar o KOH + SS + água para obter o mesmo valor, em massa, nas misturas geopoliméricas.

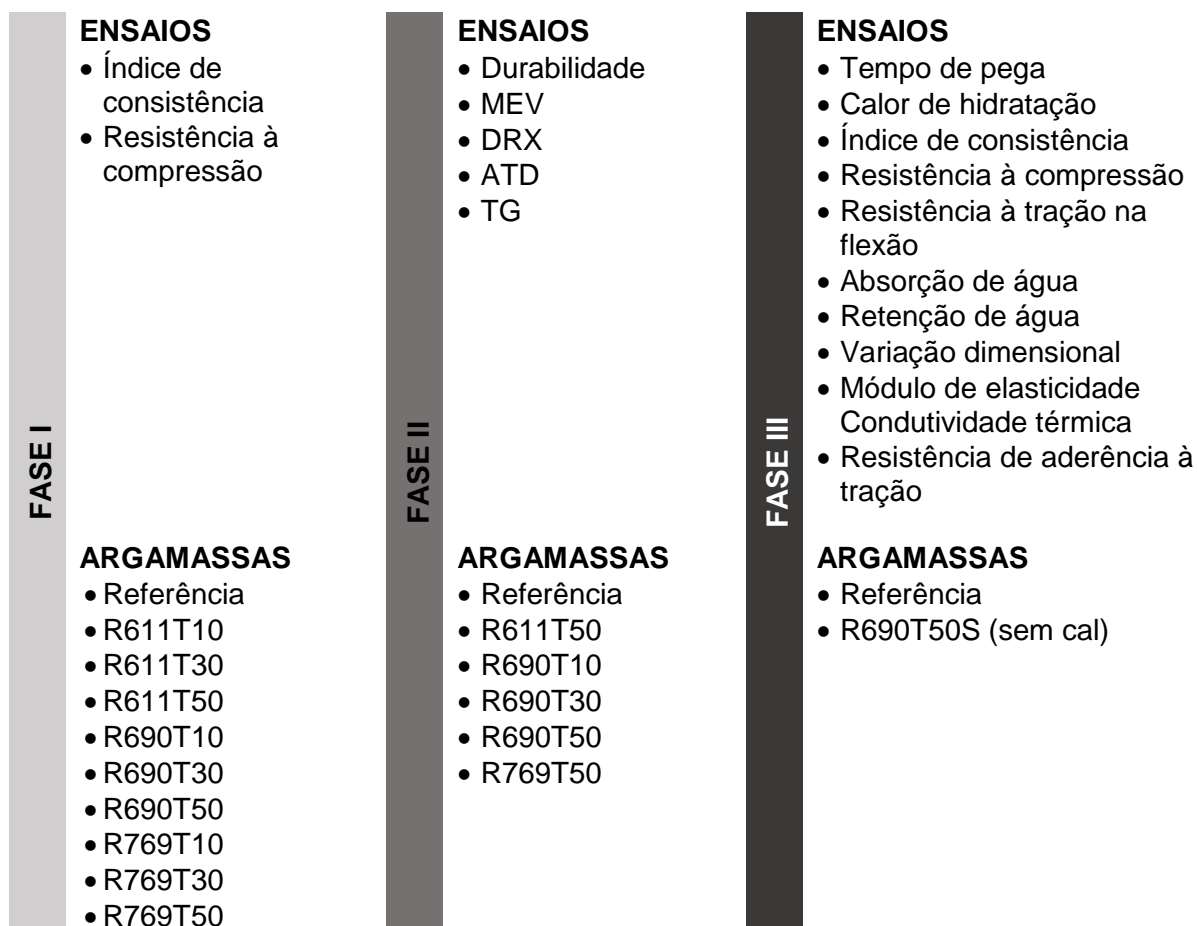
Fonte: A Autora (2020)

3.4 SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS

O processo de seleção das argamassas foi dividido em três fases. O esquema da Figura 33 apresenta a ordem de realização dos ensaios e as argamassas

escolhidas em cada fase. A quantidade de corpos de prova para atender cada ensaio foi determinada conforme exigências das normas técnicas.

Figura 33 - Processo de seleção das argamassas



Fonte: A Autora (2020)

Na fase I, foram realizados os ensaios de resistência à compressão e índice de consistência com todas as 10 misturas de argamassas. Os melhores resultados obtidos nesses dois ensaios determinaram as argamassas selecionadas para a próxima fase.

Na fase II, foi realizado o ensaio de durabilidade, por meio de ataque de sulfato, o ensaio de difratometria de raios X (DRX), as análises térmicas (ATD e TG) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir da observação destes resultados, foi escolhida uma argamassa geopolimérica, juntamente com a argamassa de referência, para a seguinte fase.

Na fase III, apenas com as duas argamassas selecionadas, foram executados os demais ensaios para analisar a aplicação da argamassa geopolimérica como argamassa de revestimento. Os ensaios selecionados para esta fase foram: tempo de

pega, retenção de água, calor de hidratação, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração, variação dimensional, absorção de água, condutividade térmica e módulo de elasticidade. Os resultados foram comparados com os valores indicados em normativas, assim como, entre as duas argamassas.

Foi necessário realizar uma otimização da argamassa geopolimérica escolhida (R690T50) após o ensaio de tempo de pega, devido à suas propriedades físicas. A Tabela 22 estabelece o novo traço definido para os ensaios da fase III da argamassa geopolimérica.

Tabela 22 – Nova proporção da argamassa geopolimérica (R690T50S)

MISTURA	CP (g)	CG* (g)	MC 36%	CV 30%	EGAF 34%	KOH 40%	SS 60%	ÁGUA** (g)	AREIA (g)
R690T50S	95,0	95,0	34,0	28,5	32,5	30,5	45,5	245,0	1310,5

Fonte: A Autora (2020)

A relação agregado/cimento (A/C) foi mantida em 6,90 e o teor de substituição (TS) em 50%. A cal foi retirada da mistura, devido sua alta influência no tempo de pega, onde o alto teor de cálcio tende a acelerar o processo de endurecimento da pasta (HASNAOUI *et al.*, 2019), e a quantidade de água foi diminuída para adequar-se à consistência exigida em norma, de 260 ± 5 mm (ABNT, 2016b). A nova argamassa foi designada de R60T50S para identificar a retirada da cal.

3.5 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

As misturas das argamassas foram preparadas conforme estabelecido pela norma NBR 16541 (ABNT, 2016b), utilizando de um misturador mecânico, Figura 34.

Figura 34 - Preparação da argamassa - misturador mecânico



Fonte: A Autora (2020)

Primeiramente, o KOH foi preparado, com um dia de antecedência: as escamas sólidas foram misturadas em água, na molaridade indicada de 5 mol/L. O SS foi fornecido pelo o fornecedor pronto. No dia da realização das argamassas, os ativadores foram então misturados nas quantidades adequadas, e então, inserido a água conforme planejamento experimental, formando uma mistura homogênea. Esta mistura líquida (ativadores + água) foi reservada.

Para a confecção das argamassas, foram colocados no misturador mecânico, inicialmente, todos os componentes anidros (cimento, cal, areia e os componentes em pó do cimento geopolimérico – MC, CV e EGAF), nas quantidades estabelecidas pelo traço, e acionado o misturador na velocidade baixa. Nos primeiros 10 segundos foi adicionada 75% da mistura líquida aos anidros, e então, o material foi misturado por mais 20 segundos. Após esses 30 segundos, a velocidade alta foi acionada por mais 60 segundos. O misturador foi parado, durante 90 segundos, e a superfície interna foi raspada para melhor homogeneização da mistura. Em seguida, o misturador foi acionado novamente, na velocidade baixa, e o restante da mistura líquida (25%) foi adicionada à mistura nos 10 segundos iniciais. A mistura continuou sendo agitada na velocidade baixa até completar 60 segundos.

A moldagem dos corpos de prova, em seus respectivos moldes, seguiu conforme o tipo de ensaio realizado, sem vedação, diretamente em contato com o ambiente. Os corpos de prova de cada ensaio permaneceram nos moldes durante 48 ± 24 horas até serem desmoldados, mantidos dentro do laboratório em temperatura ambiente, de aproximadamente $22,2 \pm 1,5$ °C, e umidade relativa do ar entre $66,1 \pm 5,7$ %, até a data para a realização dos ensaios.

Conforme os estudos de Nath e Sarker (2017), são poucas as informações disponíveis sobre geopolímeros em condições de temperatura ambiente. A grande maioria das pesquisas é realizada após curas em altas temperaturas, fato este, que possui grande limitações para aplicações *in loco* de argamassas e concretos.

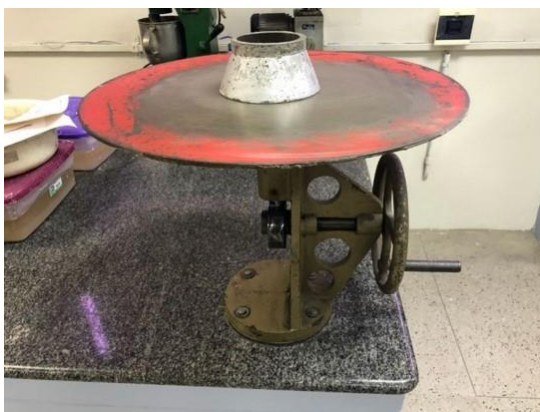
3.6 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

A seguir, são apresentados quatro ensaios de caracterização da argamassa no estado fresco devido à influência direta nas características finais da argamassa. Os ensaios selecionados foram: índice de consistência, tempo de pega, calor de hidratação e retenção de água.

3.6.1 Índice de consistência

A NBR 13276 (ABNT, 2016a) especifica o ensaio para determinar o índice de consistência de argamassas. O método consiste na utilização da mesa de consistência (*Flow table*), Figura 35, para medir o espalhamento da argamassa no estado fresco.

Figura 35 - Mesa de índice de consistência e molde tronco-cônico



Fonte: A Autora (2020)

Após o preparo das argamassas, o molde tronco-cônico foi centralizado sobre a mesa de adensamento e preenchido em três camadas de espessuras aproximadamente iguais. Em cada camada foram aplicados 15, 10 e 5 golpes de soquete, respectivamente. O nivelamento da argamassa no molde foi realizado com régua rente à borda, e o excesso de argamassa retirado.

O molde tronco-cônico foi então retirado, verticalmente, e foram aplicadas 30 quedas em 30 segundos pelo acionamento manual da manivela. Logo após a última queda, a medição do diâmetro foi realizada em três pontos diferentes do espalhamento.

3.6.2 Tempo de pega

O ensaio realizado para determinar o tempo de pega das argamassas é normatizado pela norma NM 65 (ABNT, 2002) e utiliza o aparelho Vicat, Figura 36. Primeiramente, ajustou-se o aparelho, descendo a agulha até a placa base, e indicando a marca zero da escala. O molde foi colocado sob a placa base, preenchido

pela argamassa e nivelado. O conjunto foi apoiado no aparelho de Vicat, centralizando o molde.

Figura 36 - Aparelho Vicat



Fonte: A Autora (2020)

Após 30 minutos, para determinar o tempo de início de pega, procedeu-se descendo a agulha de forma suave até encostar na pasta. Então, a agulha foi solta desta posição para entrar verticalmente na pasta e anotou-se a indicação de escala e o tempo. O processo foi repetido em intervalos de tempo convenientes, distando sempre em 10mm uma perfuração da outra e da borda. Determinou-se o tempo em que a distância entre a agulha e a placa base foi de 4 ± 1 mm.

A seguir, a agulha de Vicat de início de pega foi substituída pela agulha de fim de pega, e o molde foi invertido sobre a placa base, colocando-se a face oposta (sem perfurações) do molde para cima. As medições ocorreram do mesmo modo que as medições de início de pega. Finalmente, registrou-se o tempo de fim de pega no instante zero, ou seja, quando a agulha não deixou mais marcas na pasta.

3.6.3 Calor de hidratação

O calor de hidratação das argamassas, durante o tempo de início de pega e fim de pega, foi medido através do aparelho calorímetro para a geração de gráficos de calor de hidratação, indicando as curvas de evolução da temperatura. O aparelho utilizado é um calorímetro Impaclog IP-7018, com módulo inteligente de 8 canais de

entrada para Termopar, mV, V, mA, e um recipiente semi-adiabático, para evitar as trocas de calor com o ambiente.

Os termopares realizam a leitura da temperatura em intervalos de tempo de 2 minutos e enviam os dados para um computador, que traduz os valores em formas de gráficos e tabelas. O termopar utilizado é do tipo K, com haste de aço Inox 304, com dimensões da haste de $\varnothing 3 \times 80$ mm. A faixa de temperatura varia de -50°C até 700°C .

Através dos gráficos, foi possível medir a variação da temperatura ao longo do tempo do processo de cura. Com menor calor de hidratação, menor será a perda de água por evaporação e por consequência, menor a retração durante a cura. O controle da variação de temperatura é uma das formas de evitar a fissuração térmica.

No ensaio de calor de hidratação, logo após a mistura, as argamassas são colocadas dentro de um recipiente isolante, de poliestireno expandido (*Expanded Polystyrene* – EPS), e um termopar é inserido no centro da amostra. O conjunto é então colocado dentro de outra caixa isolante de EPS. Mede-se então, a variação da temperatura das argamassas durante a hidratação do cimento. As amostras foram mantidas dentro das caixas isolantes por um período de aproximadamente 18 horas.

3.6.4 Retenção de água

O ensaio para determinar a retenção de água em argamassas é especificado pela NBR 13277 (ABNT, 2005b), que, por meio do funil de Buchner, Figura 37, indica a quantidade de água retirada da argamassa por meio de sucção.

Figura 37 - Funil de Buchner



Fonte: A Autora (2020)

Para iniciar o ensaio, colocou-se o prato, junto com o papel-filtro umedecido, sobre o funil. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo foi acionada aplicando-se uma sucção de 51 mm de mercúrio. Em seguida, a torneira foi aberta durante 90 segundos para retirar o excesso de água do papel-filtro e a mesma foi fechada logo em seguida. O conjunto (prato + papel filtro já umedecido) foi então pesado.

O prato foi preenchido com a argamassa, passando um pouco a borda, e aplicam-se 16 golpes na área junto à borda e 21 em pontos distribuídos na parte central, totalizando 37 golpes que asseguraram o preenchimento uniforme. O excesso de argamassa do prato foi retirado usando régua metálica, as bordas foram limpas e o conjunto foi pesado novamente. Em seguida, a torneira foi aberta durante 15 minutos para aplicar na amostra a sucção de 51 mm de mercúrio. Novamente o conjunto foi pesado após o fim do ensaio.

A retenção de água foi calculada conforme NBR 13277 (ABNT, 2005b), Equação 10.

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \right] 100 \quad (10)$$

Onde, R_a é a retenção de água (%), m_a é a massa do conjunto com argamassa (g), m_s é a massa do conjunto após a sucção (g), m_v é a massa do conjunto vazio (g) e AF é o fator água/argamassa fresca.

O fator AF foi determinado conforme a Equação 11 a seguir, seguindo a NBR 13277 (ABNT, 2005b).

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (11)$$

Onde, m_w é a massa total de água acrescentada à mistura (g), e m é a soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra (g).

3.7 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios selecionados para a caracterização no estado endurecido foram: resistência à tração na flexão e à compressão, resistência de aderência à tração,

variação dimensional, absorção de água, módulo de elasticidade, condutividade térmica e ataque de sulfatos.

3.7.1 Resistência à compressão e à tração na flexão

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005d), nas idades de 3 (RC3), 7 (RC7) e 28 (RC28) dias, (ensaios realizados na fase I). Para cada traço de argamassa foram preparados 6 corpos de prova para a realização do ensaio (3 corpos de prova divididos pela metade).

Para a determinação da resistência à compressão foi utilizada uma prensa hidráulica, modelo PC 220 I, marca EMIC. O dispositivo aplica uma carga de 500N/s até a ruptura dos corpos de prova (Figura 38).

Figura 38 - Ensaio resistência à compressão: corpo de prova rompido



Fonte: A Autora (2020)

Para o cálculo da resistência à compressão foi utilizada a Equação 12, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005d).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (12)$$

Onde, R_c é a resistência à compressão (MPa), F_c é a carga máxima aplicada (N), e o 1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga (mm).

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados utilizando o equipamento EMIC DL3000N, também conforme NBR 13279 (ABNT, 2005d), durante os ensaios da fase III. Para cada traço de argamassa, 3 corpos de prova prismáticos

foram preparados e rompidos com 28 dias de idade (RTF28). Cada corpo de prova foi centralizado no equipamento, Figura 39, e uma carga de $50 \pm 10\text{N/s}$ é aplicada até sua ruptura.

Figura 39 - Ensaio resistência à tração na flexão: corpo de prova rompido



Fonte: A Autora (2020)

A equação 13 determina a resistência à tração na flexão, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005d).

$$R_f = \frac{1,5F_t L}{40^3} \quad (13)$$

Onde, R_f é a resistência à tração na flexão (MPa), F_t é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N) e L é a distância entre os suportes (mm).

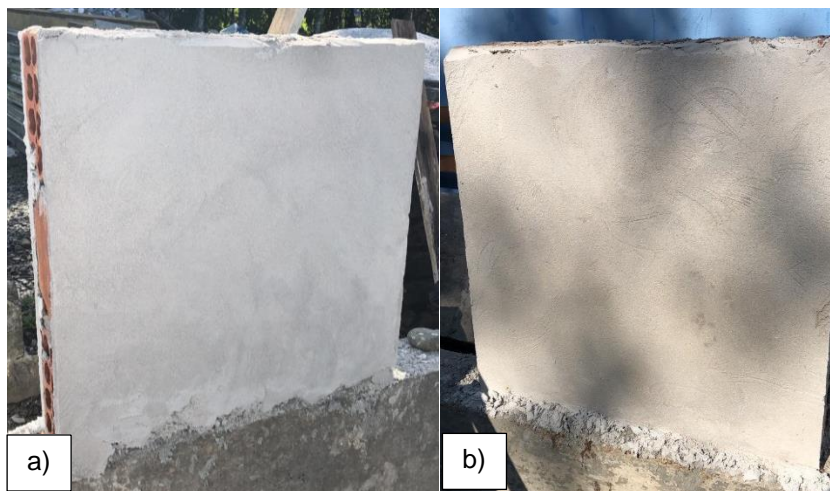
3.7.2 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi determinado conforme a norma NBR 13528 (ABNT, 2019). Duas paredes, de aproximadamente $1,00\text{m}^2$, foram construídas, utilizando de argamassa com proporção de 1:2 (cimento CP II F-32 e areia média) para o assentamento dos blocos e o chapisco. As paredes foram revestidas pela a argamassa de referência e a argamassa geopolimérica R690T50S, com espessura de aproximadamente 2cm, e curadas durante 28 dias, Figura 40.

Para a realização do ensaio, foi utilizado o dinamômetro de tração, marca Solotest, modelo hidráulico manual digital, que permite a aplicação de carga contínua,

pastilhas com diâmetro de 50 mm, e cola adesiva instantânea Tek Bond 793, com viscosidade média.

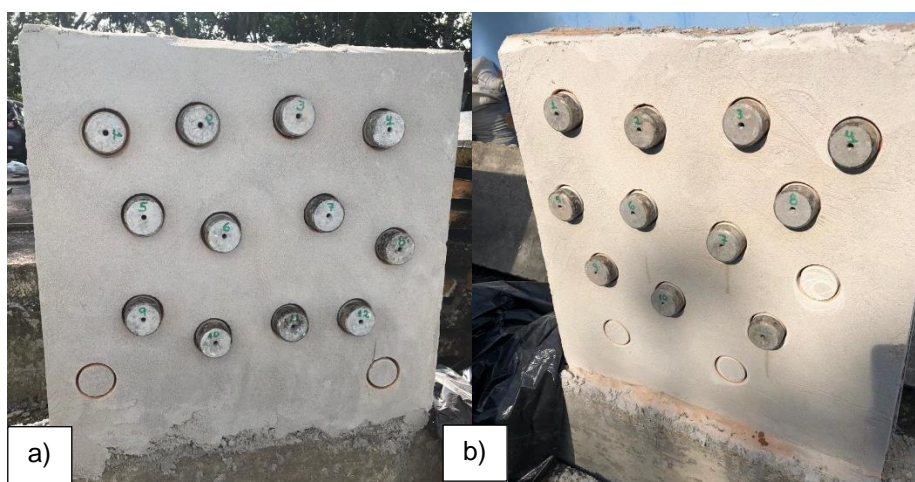
Figura 40 - Paredes revestidas com argamassa: a) R690T50S, b) referência



Fonte: A Autora (2020)

Para cada parede revestida, 12 corpos de prova foram distribuídos aleatoriamente, distantes 50 mm entre si e das extremidades. O corte do revestimento foi efetuado até a superfície do substrato, utilizando-se de dispositivo de corte cilíndrico à seco (serra-copo). As pastilhas foram coladas em cima dos corpos de prova, Figura 41.

Figura 41 - Corpos de prova colados: a) R690T50S, b) referência



Fonte: A Autora (2020)

Antes da realização do ensaio, foi determinada a umidade do revestimento. Para isso, três amostras foram retiradas também com a serra-copo de 50 mm (dentro

da área de ensaio), pesadas e colocadas na estufa ($105^\circ \pm 5^\circ\text{C}$), até atingir constância de massa. Em seguida, as amostras foram resfriadas e pesadas novamente. O teor de umidade foi definido, segundo NBR 13528 (ABNT, 2019), em porcentagem, para cada amostra conforme a Equação 14. A média dos três resultados é o teor de umidade médio.

$$U = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (14)$$

Onde, U é o teor de umidade (%); m_u é a massa do conjunto após extração (g); m_s é a massa da extração seca em estufa (g).

Utilizando o dinamômetro, Figura 42, foi aplicado o esforço de tração perpendicular ao corpo de prova com taxa de carregamento constante até a ruptura do corpo de prova. Anotou-se a carga (N) para cada corpo de prova, o diâmetro do corpo de prova para cálculo de área, a espessura do revestimento e a forma de ruptura.

Figura 42 - Dinamômetro



Fonte: Schackow (2015)

A resistência de aderência à tração de cada corpo de prova foi calculada pela Equação 15, segundo a NBR 13528 (ABNT, 2019).

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (15)$$

Onde, R_a é a resistência de aderência à tração (MPa); F é a força de ruptura (N); e A é a área do corpo de prova (mm²).

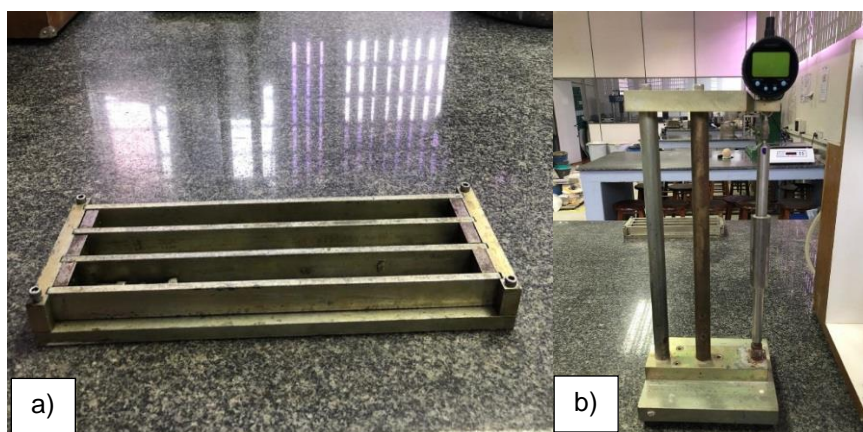
3.7.3 Variação dimensional

A NBR 15261 (ABNT, 2005g) define o ensaio para determinar a retração ou a expansão linear das argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos. A variação positiva das argamassas indica uma expansão, enquanto que, uma variação negativa caracteriza retração.

Para este ensaio, foram preparados 3 corpos de prova (25x25x285mm) para cada traço. Os moldes (Figura 43a) foram preparados previamente recobrimo-os com papel filme de PVC e passando uma fina camada de vaselina sólida para facilitar no desmolde.

Devido à fragilidade dos corpos de prova, estes foram desformados após 96 horas, e a leitura inicial foi realizada aos 7 dias. Aos 28 dias foi medida a leitura final, utilizando do aparelho comparador de comprimento, conforme Figura 43b, para calcular a variação dimensional. Além disso, a massa de cada corpo de prova foi anotada para calcular a variação de massa média.

Figura 43 - Ensaio de variação dimensional: a) molde dos corpos de prova, b) comparador de comprimento



Fonte: A Autora (2020)

A Equação 16 foi utilizada para determinar a variação dimensional, enquanto que, a Equação 17 para a calcular a variação de massa, segundo NBR 15261 (ABNT, 2005g).

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (16)$$

Onde, ε_i é a medida de variação dimensional (mm); L_i é a leitura na idade final (mm); L_0 é a leitura efetuada após a desforma (mm);

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (17)$$

Onde, Δm_i é a variação de massa (%); m_i é a massa na idade final (g); m_0 é a massa após a desforma (g).

3.7.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio para a determinação da absorção de água seguiu conforme especificado na norma NBR 9778 (ABNT, 2005a), e foram utilizados três corpos de prova prismáticos (40x40x160mm) para cada traço de argamassa.

Inicialmente, a amostra foi colocada na estufa, durante 72 horas, à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, e então, a massa da amostra na condição seca foi determinada. Em seguida, a amostra foi imersa em água, em temperatura ambiente $23 \pm 2^\circ\text{C}$, também durante 72 horas, para atingir a condição saturada. Completada essa etapa, a mostra foi levada à ebulição por um período de 5 horas. Após a água esfriar, anotou-se a massa com a balança hidrostática. Ao final, o corpo de prova foi retirado da água, seco com um pano úmido, e então determinada sua massa saturada.

O cálculo da absorção de água (Equação 18), índice de vazios (Equação 19), massa específica da amostra seca (Equação 20), massa específica da amostra saturada (Equação 21) e massa específica real (Equação 22), estão descritas a seguir, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005a).

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (18)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (19)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (20)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (21)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (22)$$

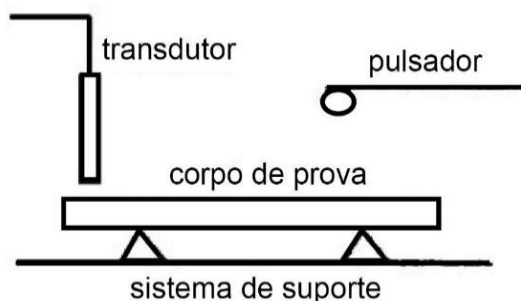
Onde, A é a absorção (%); m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura; m_s é a massa da amostra seca em estufa; m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (balança hidrostática); ρ_s é a massa específica da amostra seca; ρ_{sat} é a massa da amostra saturada; e ρ_r é a massa específica real.

3.7.5 Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

A determinação do módulo de elasticidade por método-não destrutivo (modo dinâmico) possui a vantagem de proporcionar pouco ou nenhum dano à estrutura, para obter informações tanto quantitativas quanto qualitativas (COSSOLINI; PEREIRA, 2010).

Para determinar o módulo de elasticidade foi realizado o ensaio por método de excitação por impulso, Figura 44, que utiliza a frequência de vibração natural dos próprios materiais para determinar a elasticidade. Ou seja, o pulso mecânico produz um sinal sonoro, que é captado pelo microfone, o software calcula a taxa de atenuação, e o resultado é o módulo de elasticidade. O ensaio foi baseado na norma internacional ASTM E1876-15 (ASTM, 2009)

Figura 44 - Módulo de elasticidade



Fonte: Cossolini e Pereira (2010)

“São três os modos de vibração empregados: longitudinal, flexional ou transversal e torcional. Os dois primeiros permitem o cálculo do módulo de Young e o

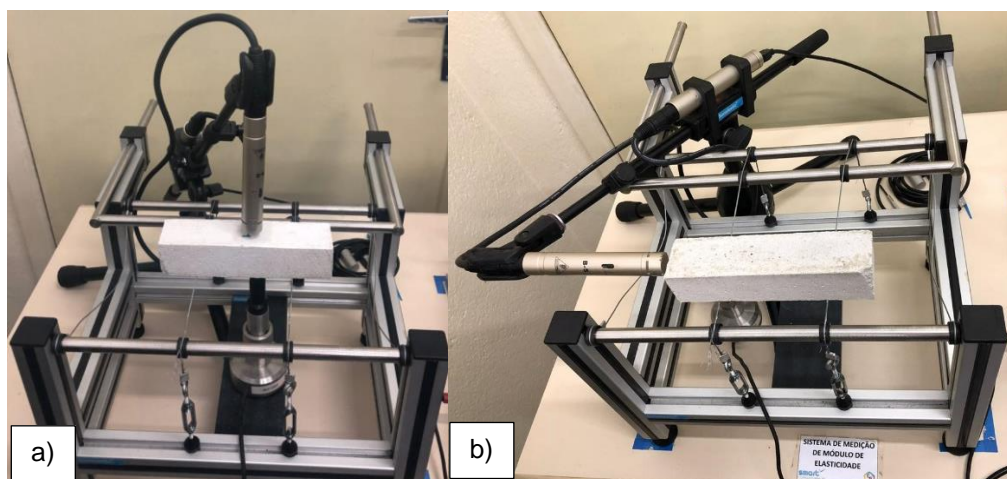
último possibilita a determinação do módulo de cisalhamento” (COSSOLINI; PEREIRA, 2010, p.12).

A vibração longitudinal é o método de maior precisão na determinação do módulo de elasticidade em barras de seção transversal quadrada ou circular, enquanto que, a vibração flexional é indicada para barras delgadas (COSSOLINI; PEREIRA, 2010).

Foi utilizado um pulsador (equipamento que aplica o impacto para gerar vibrações mecânicas) e transdutor (que capta a resposta e a transforma em sinal elétrico para leitura), onde o corpo de prova sofre um impacto de curta duração e responde com vibrações.

Para este ensaio foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos, 40 x 40 x 160 mm, de cada argamassa, e suas respectivas dimensões e massas, anotadas. As amostras foram apoiadas em seus pontos nodais de ressonância ($0,224L$ de cada extremidade) e o impulso, aplicado no local de maior amplitude, para excitação de frequências flexionais, Figura 45a, e longitudinais, Figura 45b. O módulo de elasticidade foi calculado pelo *software* ATCP Sonelastic 3.0.

Figura 45 - Sistema de medição de módulo de elasticidade: a) flexional, b) longitudinal



Fonte: A Autora (2020)

3.7.6 Condutividade térmica

Para determinar a condutividade térmica das argamassas, propriedade de transmissão de calor, foi realizado o ensaio por meio do aparelho medidor de fluxo de calor, condutímetro modelo K10N, Figura 46, baseado nas normas ISO 8301 (ISO, 2017) e ASTM C518 (ASTM, 2007).

Figura 46 - Aparelho condutivímetro



Fonte: A Autora (2020)

Os corpos de prova de argamassa para este ensaio foram curados durante 28 dias com dimensões de 10 x 10 x 2,5 cm, e espessura compatível com a utilizada em obras (entre 1,5cm e 3cm).

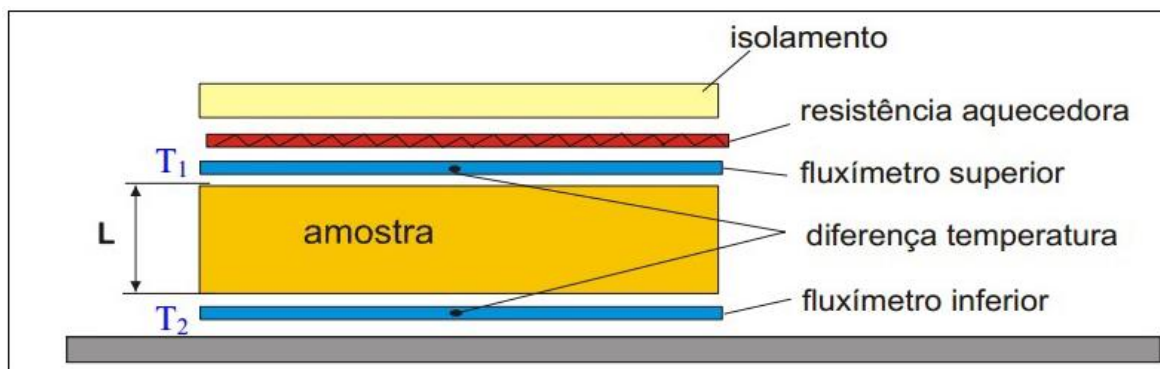
Para a medição do fluxo de calor, o corpo de prova é colocado entre os fluxímetros e a condutividade é estabelecida pela média simples desses fluxos. A Equação 23, conforme a Lei de Fourier, determina a taxa de fluxo de calor.

$$q = k \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (23)$$

Onde, q é a taxa de fluxo de calor (W/m^2); k é a condutividade térmica; $T_2 - T_1$ é a diferença de temperatura; e L é a espessura da amostra.

A Figura 47 mostra um esquema do funcionamento do condutivímetro.

Figura 47 - Esquema do funcionamento do aparelho de condutivímetro



Fonte: Effting (2008)

Em que, R é a resistência térmica em regime permanente ($m^2 K/W$); q_1 e q_2 são as densidades de fluxo de calor medidas pelos fluxímetros 1 e 2 (W/m^2); e T_1 e T_2 são as temperaturas superficiais da amostra (K).

Admitindo-se que a amostra é homogênea, conforme Equação 24, pode-se avaliar a condutividade térmica do material λ por:

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (24)$$

Onde λ é a condutividade térmica (W/mK); L é a espessura do material (metros); e R é a resistência térmica medida ($m^2 K/W$).

3.7.7 Ataque de sulfato

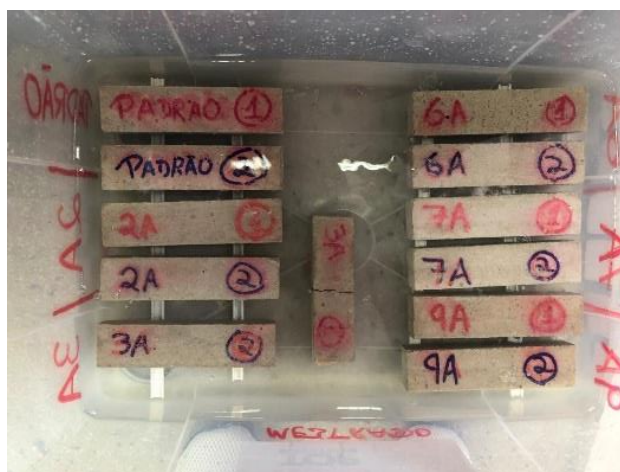
O ensaio de durabilidade foi realizado com base na norma ASTM C1012 (ASTM, 2004). Este consiste na imersão dos corpos de prova em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) para medição de perda de massa.

Foram ensaiados dois corpos de prova prismáticos, nas dimensões conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005d), de 6 misturas de argamassas. A solução de sulfato de sódio foi preparada na concentração de 5% e pH entre 6 e 8.

O ensaio consistiu na molhagem e secagem dos corpos de prova, acelerando o processo de deterioração. As amostras foram secas em estufa, $105 \pm 5^\circ C$, durante 21,5 horas, retiradas e deixadas resfriar em temperatura ambiente $23 \pm 2^\circ C$ durante 30 minutos. Logo em seguida, a massa de cada mistura foi pesada em balança com precisão de 0,01g e anotada, e então, imersas na solução durante o período de 2 horas (Figura 48).

Esse ciclo de imersão e secagem foi realizado até a deterioração das argamassas, totalizando 30 ciclos. No 29º ciclo, com o intuito de acelerar o processo de deterioração, as argamassas permaneceram fora da estufa, durante 24 horas em temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ C$), permitindo que a solução de sulfato atacasse de forma mais intensa os corpos de prova. No 30º ciclo, as argamassas foram submersas na solução e colocadas novamente na estufa.

Figura 48 - Amostras imersas na solução de sulfato de sódio



Fonte: A Autora (2020)

3.8 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E TÉRMICA

“O tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua microestrutura” (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.23).

As propriedades dos materiais estão diretamente ligadas com a sua microestrutura interna. É necessário ter ciência sobre os elementos principais da microestrutura antes de abordar os fatores de influência nas propriedades como resistência, elasticidade, retração, fissuração e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para a caracterização da microestrutura, foram realizadas as análises de microscopia eletrônica de varredura e a difratometria de raios X, e dois ensaios termo-analíticos: análise térmica diferencial e termogravimetria.

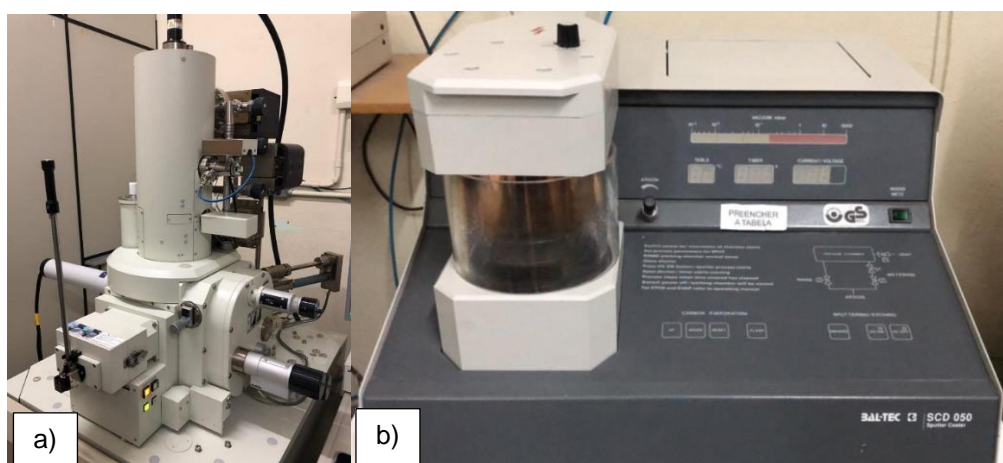
3.8.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise morfológica de superfícies, a Microscopia eletrônica de varredura (MEV), em inglês, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, é indicada devido a sua profundidade de foco e faixa de aumento (BARRETO, 2014).

Conforme Barreto (2014), basicamente, o MEV consiste na emissão de feixe de elétrons que incidem sobre a amostra, gerando uma série de emissões de sinais. Estes sinais são emitidos na forma de elétrons (secundários ou retroespalhados), de fótons de luz e raios X. A formação da imagem acontece através de elétrons de alta energia, concentrados em um feixe fino.

Para a análise de microscopia, o aparelho utilizado foi um microscópio eletrônico, que produz imagens de elétrons secundários (*Second Electron*), da marca JEOL, modelo JSM 6701F, juntamente com um espectrômetro de energia dispersiva, Figura 49a. Para o recobrimento das amostras de ouro, foi utilizado uma metalizadora, marca Bal-Tec, modelo SCD 050, Figura 49b.

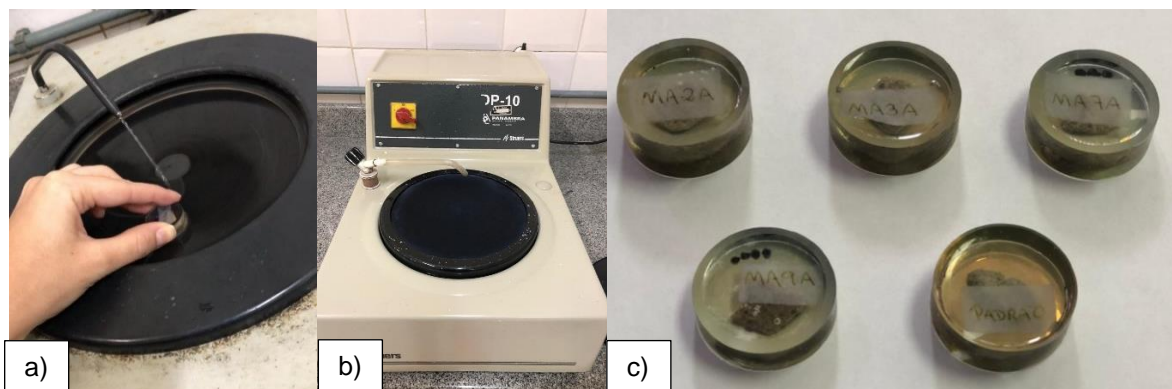
Figura 49 – Microscopia eletrônica de varredura: a) microscópio eletrônico, b) metalizadora para camada condutiva (ouro)



Fonte: A Autora (2020)

Amostras retiradas dos corpos de provas rompidos no ensaio de resistência à compressão, de aproximadamente 1cm x 1cm, foram reservadas e analisadas. Para o ensaio, as amostras foram imersas em resina epóxi por 24h, lixadas após esse período (Figura 50a), polidas (Figura 50b), e então recobertas por uma camada metalizada de ouro e levadas para a análise (Figura 50c)

Figura 50 - MEV: a) lixamento, b) polimento, c) recobertas de ouro



Fonte: A Autora (2020)

3.8.2 Difratometria de raios X (DRX)

A análise mineralógica e microestrutural da difração de raios X (DRX) proporciona informações sobre o tamanho, a perfeição e a orientação dos cristais. A técnica é utilizada para a identificação de fases cristalinas presentes nos materiais, pois cada sólido cristalino tem seu próprio padrão de difração para reconhecimento. É considerada como uma análise quantitativa onde a intensidade do pico de cada componente é proporcional à presença deste material na amostra (BARRETO, 2014).

Para esta análise, as amostras separadas também foram resultantes do rompimento do ensaio de resistência à compressão. Estas foram moídas, por meio de um pistilo e almofariz, até as partículas passarem na peneira de 75µm. Este preparo foi o mesmo para as análises térmicas (DTA e TG).

O aparelho utilizado foi um difratômetro de raios X Shimadzu XRD 6000, com ângulos de difração em 2θ para determinação das fases cristalinas. As análises foram feitas com radiação de cobre $K\alpha$, comprimento de onda, $\lambda = 1,5406 \times 10^{-10}\text{m}$, em intervalos de 5 a 50° em 2θ , com uma velocidade de 2°/min.

3.8.3 Análise Térmica (ATD e TG)

A caracterização de materiais pela análise térmica possibilita determinar as mudanças de propriedades físicas ou químicas em função da temperatura ou tempo. A Análise Térmica Diferencial (ATD) registra efeitos térmicos das transformações – perda de água, mudança de fase - podendo ser endotérmico ou exotérmico, variando conforme a absorção ou liberação de calor pela amostra. A Termogravimetria (TG), por sua vez, mede as variações de massa, em perda ou ganho, ocorridas na amostra, devido a transformações físicas ou químicas, enquanto submetida a uma programação controlada, até sua eventual degradação com o aumento da temperatura (ALMEIDA; NOTHÉ, 2009).

Os ensaios da análise térmica diferencial (ATD) e da termogravimetria (TG) foram realizados por meio do equipamento Netzsch STA 449C. A variação da massa de cada amostra e os processos endotérmicos e exotérmicos de cada material foram medidos entre as temperaturas de 20 °C e 1200 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em um ambiente controlado.

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

“O campo da estatística lida com a coleta, apresentação, análise e uso dos dados para tomar decisões, resolver problemas e planejar produtos e processos” (MONTGOMERY; RUNGER, 2009, p.1) Os planejamentos estatísticos tendem a aperfeiçoar o desenvolvimento de novos produtos e técnicas de produção.

O Planejamento de experimentos, em inglês, *Design of Experiments* (DOE), é uma técnica estruturada para determinar as relações entre os fatores de entrada (variáveis independentes) que afetam as respostas de saída (variáveis dependentes), por meio de modelos matemáticos. Os fatores de entrada são controlados e variados para indicar os efeitos na resposta de saída, desta forma, é possível determinar os fatores mais importantes e suas interações e otimizar as respostas (FUKUDA *et al.*, 2018).

Basicamente, um planejamento experimental adequado agrega três conceitos: qualidade, produtividade e competitividade. As etapas do planejamento experimental são: reconhecer e definir o problema; escolher as variáveis (fatores de influência) e as faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas; escolher a variável de resposta adequada; delineamento de experimentos; execução dos experimentos; análise dos resultados; e a elaboração das conclusões e recomendações (BUTTON, 2005)

O planejamento fatorial é o método mais aconselhável quando pretende-se analisar o efeito de duas ou mais variáveis de influência em determinado experimento. Todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas, assim como, se há interação dessas variáveis (efeito de uma variável depende do nível das outras variáveis) (BUTTON, 2005).

Os resultados obtidos para o índice de consistência e para a resistência à compressão aos 28 dias foram submetidos a testes estatísticos nesta pesquisa. Foi considerado um experimento fatorial com dois fatores (teor de substituição e relação agregado/cimento), com três níveis diferentes para cada fator, para verificar a influência desses fatores na variável resposta.

Os modelos foram analisados e selecionados com base na análise de variância (ANOVA). A ANOVA, Tabela 23, testa a importância de um ou mais fatores comparando as médias da variável resposta em diferentes níveis. A partir dessa comparação, é possível avaliar a significância do modelo de regressão (FUKUDA *et*

al., 2018). A ANOVA constitui de um procedimento estatístico adequado para a avaliação de respostas quantitativas em experimentos planejados (DEVORE, 2006).

Tabela 23 – ANOVA para projeto fatorial com dois fatores

Fonte de variação	Soma dos quadrados (SQ)	Grau de liberdade	Média Quadrática (MQ)	F ₀
Tratamento A	SQ_A	$a - 1$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
Tratamento B	SQ_B	$b - 1$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
Interação	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$ab(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SQ_T	$abn - 1$		

Fonte: Montgomery e Runger (2009)

Baseado na ANOVA, pode-se incluir ou excluir os coeficientes de termos lineares, os termos de interação e os termos quadráticos. Esta decisão é baseada no p-valor para cada termo do coeficiente da regressão. Geralmente, um termo de regressão deve ser incluído quando é significativamente diferente de 0, indicando que a variável saída (resposta) é afetada pela variação dos níveis do fator de entrada (FUKUDA *et al.*, 2018).

A ANOVA é usada para testar as hipóteses sobre os efeitos principais dos fatores A e B e a interação AB. O teste de hipóteses analisa duas hipóteses: a hipótese nula (H_0) que parte do princípio que os fatores não possuem nenhum efeito ou nenhuma diferença entre si; e a hipótese alternativa (H_1) que considera que pelo menos uma média seja diferente. Em um teste de hipóteses dois tipos de erros são possíveis: erro tipo I e erro tipo II, conforma Tabela 24 (BUSSAB; MORETTIN, 2010).

Tabela 24 - Tipos de erro no teste de hipóteses

Decisão com base na amostra	Verdade sobre a população	
	H_0 é verdadeiro	H_0 é falso
Aceitar H_0	Decisão correta: (probabilidade = $1 - \alpha$)	Erro tipo II: aceitar H_0 quando ele é falso (probabilidade = β)
Rejeitar H_0	Erro tipo I: rejeitar H_0 quando ele é verdadeiro (probabilidade = α)	Decisão correta (probabilidade = $1 - \beta$)

Fonte: Adaptado de Bussab e Morettin (2010)

As hipóteses a serem testadas, conforme Montgomery e Runger (2009), em um teste de hipóteses de dois fatores, A e B, e a interação entre eles, estão descritas nas Equações 25, 26 e 27, a seguir.

$$\begin{aligned} H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \\ H_1: \text{no mínimo um } \tau_i \neq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \\ H_1: \text{no mínimo um } \beta_j \neq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0 \\ H_1: \text{no mínimo um } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

O objetivo do teste de hipóteses é dizer, usando uma estatística, se a hipótese H_0 é ou não aceitável, de acordo com um determinado nível de significância (α) pré-estabelecido. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados pode ser analisada através do p-valor. Adotando-se um α , e o p-valor for menor, fica determinado que o fator analisado ou a interação entre os fatores, possui influência na resposta (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

A escolha dos níveis de significância (α) para os modelos do índice de consistência e para a resistência à compressão aos 28 dias foram estabelecidos no contexto da aplicação, por ser um material poroso. Schwaab (2019) utilizou modelos com valores de significância (α) de até 0,25 para a elaboração de cimentos geopoliméricos.

Ainda, a análise dos efeitos pode ser realizada conforme a comparação entre os valores do teste F. Se o valor de F_0 (calculado) for maior que o valor do F (tabelado), para um determinado nível de significância, conclui-se que um determinado fator ou interação entre fatores influencia na variável resposta, rejeitando-se a hipótese nula (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Segundo Montgomery e Runger (2009), após a identificação dos fatores significativos, um modelo de regressão é originado para explorar as relações entre duas ou mais variáveis. O modelo de regressão com k variáveis regressores é apresentado pela Equação 28. Conforme Montgomery e Runger (2009), a regressão linear também pode analisar os modelos de regressão com interação ou quadráticos, mesmo que a forma da superfície gerada seja não-linear. O modelo de regressão com interação é chamado de segunda ordem.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (28)$$

Onde, Y é a variável dependente ou resposta; β_0 é a interseção do plano; β_1 , β_2 e β_k são os coeficientes da regressão; x_1 , x_2 , x_k são as variáveis independentes ou regressores; ϵ é o erro aleatório.

Os fatores foram também observados através do gráfico de Pareto. O gráfico de Pareto é uma ferramenta útil para selecionar os fatores de entradas mais importantes, pois colocam os fatores de entrada e suas interações em ordem de importância. No entanto, os gráficos de Pareto não fornecem informações de como a variável resposta é afetada pela variação do nível do fator de entrada (FUKUDA, *et al.*, 2018).

Para o ajuste do modelo de regressão, utilizou-se dos coeficientes de determinação R^2 e R^2 ajustado. O coeficiente de determinação R^2 é a proporção da variação na resposta prevista pelos fatores de entrada, ou seja, quanto da resposta é explicada pelos fatores de entrada. O R^2 sempre aumentará quando adicionando novos termos ao modelo de regressão, sendo considerado problemático para comparar modelos de regressão e para analisar se um coeficiente de regressão é considerado útil. Já o R^2 ajustado, versão modificada do R^2 , permite comparar o poder explicativo dos modelos de regressão que contêm diferentes números de termos. O R^2 ajustado penaliza a adição de termos ao modelo, ou seja, evita a inclusão de regressores que não são úteis (MONTGOMERY; RUNGER, 2009; FAKUDA *et al.*, 2018).

Para a verificar se o modelo representado pelas equações estava adequado, foi realizado uma análise dos resíduos quanto à normalidade e a aleatoriedade. Na análise dos resíduos é investigado se as suposições feitas para o desenvolvimento do modelo estão satisfeitas, ou seja, estudar o comportamento do modelo com base no conjunto de dados observados, especialmente as diferenças entre os valores observados e os valores ajustados (BUSSAB; MORETTIN, 2010).

Ao final, para fazer uma melhor estimativa dos níveis dos fatores para valores específicos do índice de consistência e da resistência à compressão, foram gerados gráficos de contorno. Uma superfície de resposta é uma figura obtida quando uma variável resposta é representada graficamente em função de um ou mais fatores do processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios das Fases I, II e III conforme especificado na metodologia desta pesquisa. O detalhamento de cada Fase é explicado em seus respectivos tópicos.

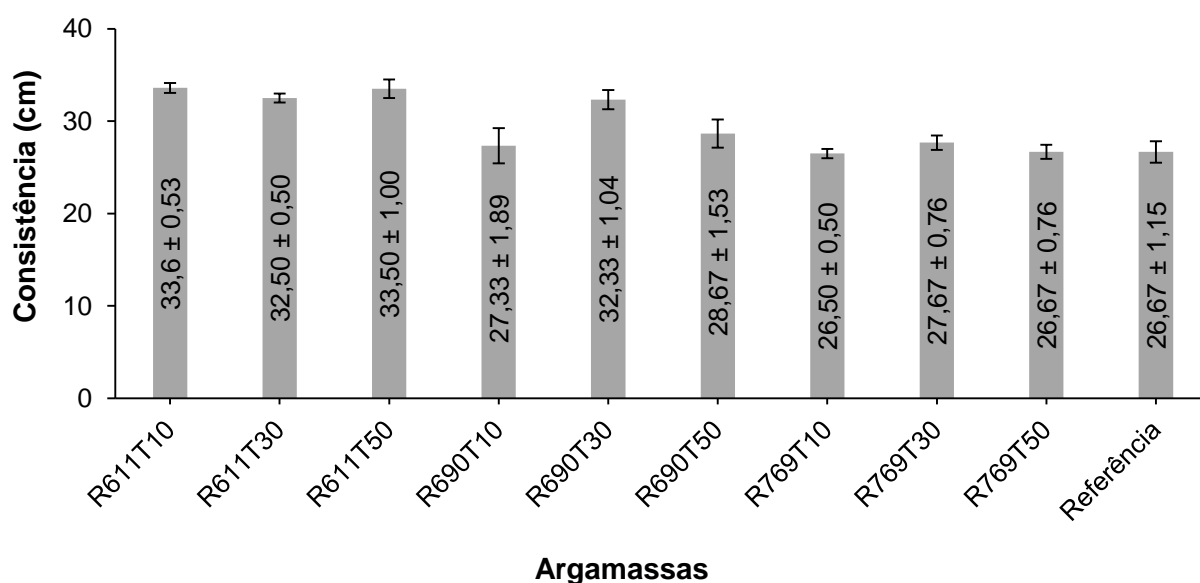
4.1 FASE I

Este capítulo apresenta os resultados referentes aos ensaios de trabalhabilidade e resistência à compressão, relativos à Fase I da pesquisa. Esses ensaios foram realizados com as nove argamassas geopoliméricas e com argamassa de referência. A análise estatística das argamassas do projeto fatorial foi realizado apenas na Fase I para auxiliar na escolha das argamassas para a fase seguinte.

4.1.1 Índice de consistência

Os resultados obtidos para o índice de consistência (IC) das argamassas geopoliméricas e da argamassa de referência estão apresentados na Figura 51. Comparando os resultados, as argamassas geopoliméricas com relação A/C de 7,69 foram as que alcançaram resultados mais próximos da argamassa de referência e do valor estabelecido na norma NBR 16541 (ABNT, 2016b) de 260 ± 5 mm.

Figura 51 – Resultados das médias dos índices de consistência das argamassas



Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

Verifica-se que a consistência diminui conforme o fator A/C aumenta. Para as argamassas geopoliméricas com 50% de geopolímero em substituição ao CP e fator de A/C de 6,11, 6,90 e 7,69, os valores de consistência foram iguais a 335 ± 10 mm, $286,7 \pm 15,3$ mm e $266,7 \pm 7,6$ mm, respectivamente.

Conforme os estudos de Li *et al.* (2009), o aumento do teor de cimento geopolimérico diminuiria a fluidez das argamassas, entretanto, o TS não apresentou influência no IC, pois a parte líquida manteve-se constante em todas as misturas, 355g. Para as argamassas geopoliméricas com 10, 30 e 50% de geopolímero em substituição ao CP e fator A/C de 6,90 os valores de consistência foram iguais a $273,3 \pm 18,9$ mm, $323,3 \pm 10,4$ mm e $286,7 \pm 15,3$ mm, respectivamente.

A Tabela 25 apresenta os fatores A/C e TS, e as interações lineares entre eles, com seus efeitos significativos e não significativos. As interações quadráticas não apresentaram efeitos significativos e não foram consideradas. Analisando estatisticamente os resultados do índice de consistência através da análise variância (ANOVA), observa-se que o fator A/C (L) apresenta relevância mais significativa para o modelo.

Tabela 25 - ANOVA do IC com efeitos estatisticamente significativos e não significativos

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	58,66	1	58,66	16,99	0,0259
A/C (Q)	0,79	1	0,79	0,23	0,6643
TS (L)	0,33	1	0,33	0,09	0,7769
TS (Q)	4,23	1	4,23	1,23	0,3488
A/C (L) x TS (L)	0,02	1	0,02	0,01	0,9466
Erro	10,37	3	3,45		
Total	74,39	8			

(L) termo linear, (Q) termo quadrático

Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

Considerando apenas os fatores com menor p-valor, e admitindo-se um nível de significância (α) de 0,19 para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), ignora-se o A/C (Q), o TS (L) e a interação A/C (L) x TS (L) para o modelo final, conforme Tabela 26. O A/C (L) ($p = 0,0015 \leq \alpha$) e o fator TS (Q) ($p = 0,1877 \leq \alpha$) são estatisticamente significativos conforme nível de significância estabelecido.

A proporção da variabilidade (R^2) foi de 0,8455, ou seja, indica que os fatores e seus efeitos representam 84,55% da variabilidade das medidas. O R^2 ajustado com todos os fatores foi de 0,72, e após a retirada dos fatores não significativos foi de 0,79.

Tabela 26 - ANOVA do IC com efeitos estatisticamente significativos

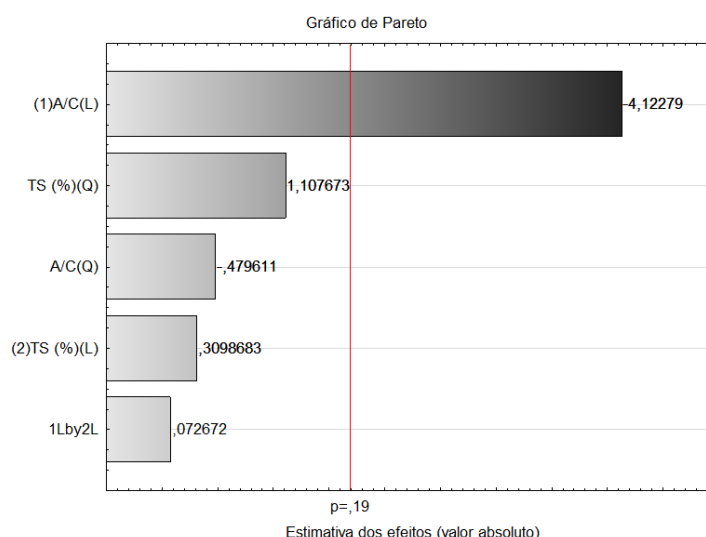
Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	58,66	1	58,66	30,61	0,0015
TS (Q)	4,23	1	4,23	2,21	0,1877
Erro	11,49	6	1,92		
Total	74,39	8			

(L) termo linear, (Q) termo quadrático

Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

Observando também o diagrama de Pareto, Figura 52, que determina a magnitude e a importância dos efeitos, é possível verificar que o fato A/C (L) é o efeito mais significativo, pois seu valor ultrapassa a linha de referência para o nível de significância adotada (α) de 19%.

Figura 52 – Diagrama de Pareto dos efeitos no índice de consistência



Fonte: A Autora (2020).

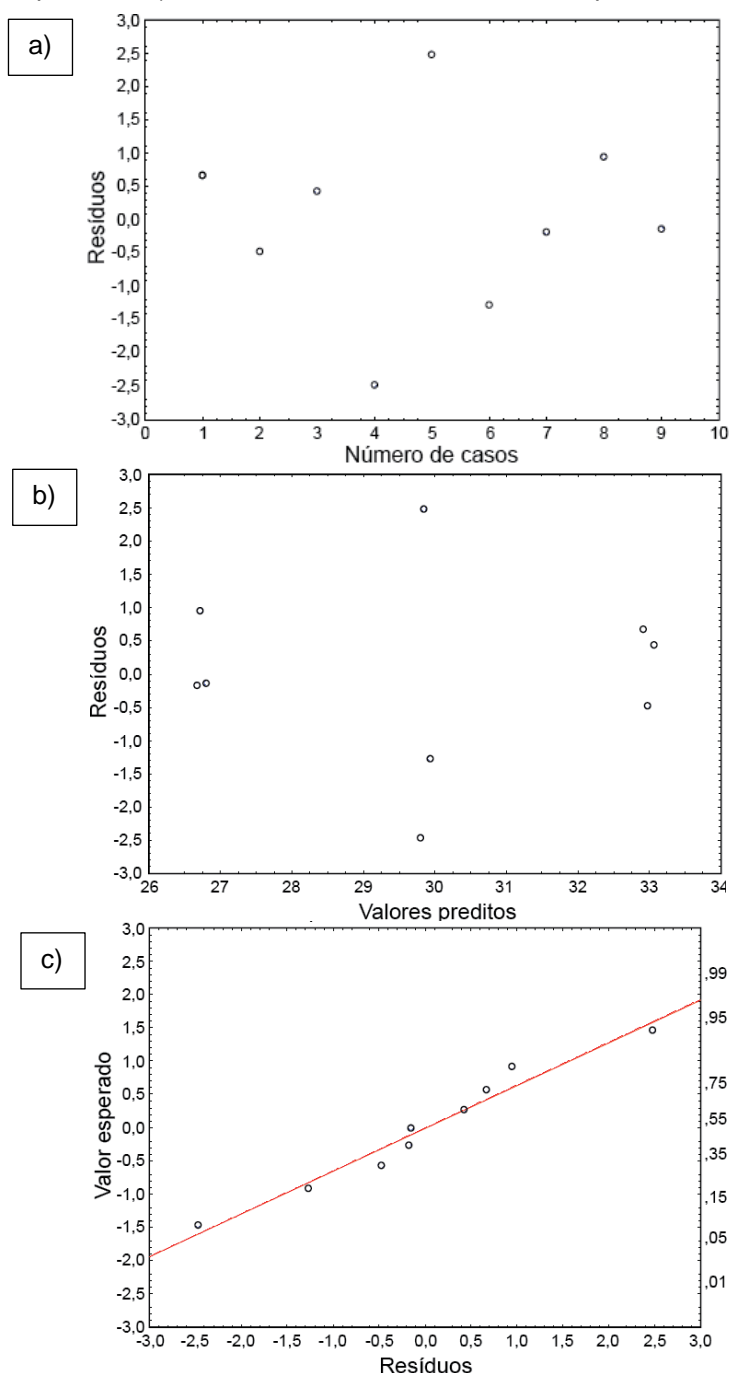
A partir dos resultados, a equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela Equação 29, onde x_1 é o fator A/C e x_2 é o fator TS.

$$IC = 57,10344 - 3,95781x_1 + 0,00006x_2^2 \quad (29)$$

Para analisar a adequação do modelo de variância, foram avaliados os resíduos quanto à aleatoriedade (Figuras 53a e 53b) e a normalidade (Figura 53c). Os resíduos estão normalmente distribuídos ao longo de uma linha reta e sem tendência de afunilamento (MYERS; MONTGOMERY, 2002). Conclui-se que o modelo descrito

conforme a Equação 29 é adequado para descrever o comportamento do índice de consistência como uma função A/C e TS.

Figura 53 – Análise dos resíduos do IC: a) resíduos versus número de casos b) resíduos versus valores preditos, c) resíduos versus valores normais esperados

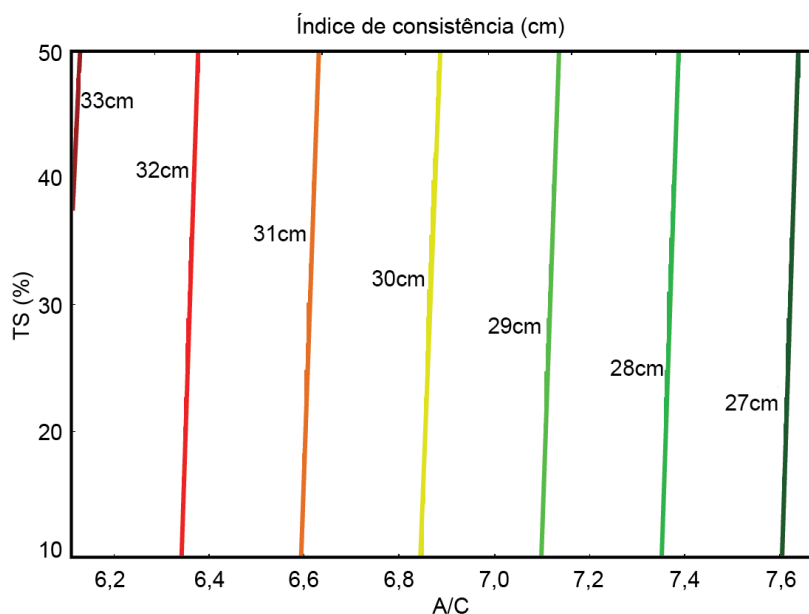


Fonte: A Autora (2020)

O efeito dos fatores A/C e TS no IC estão dispostos na forma de gráfico de contorno, Figura 54. De acordo com o gráfico da superfície de resposta, o IC diminui conforme a relação A/C aumenta. O gráfico indica que argamassas com quaisquer

que sejam as quantidades de CG (entre 10 e 50%) na mistura, com a relação A/C superior a 7,6, apresentarão resultados de IC conforme especificado da norma citada.

Figura 54 - Índice de consistência das argamassas



Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

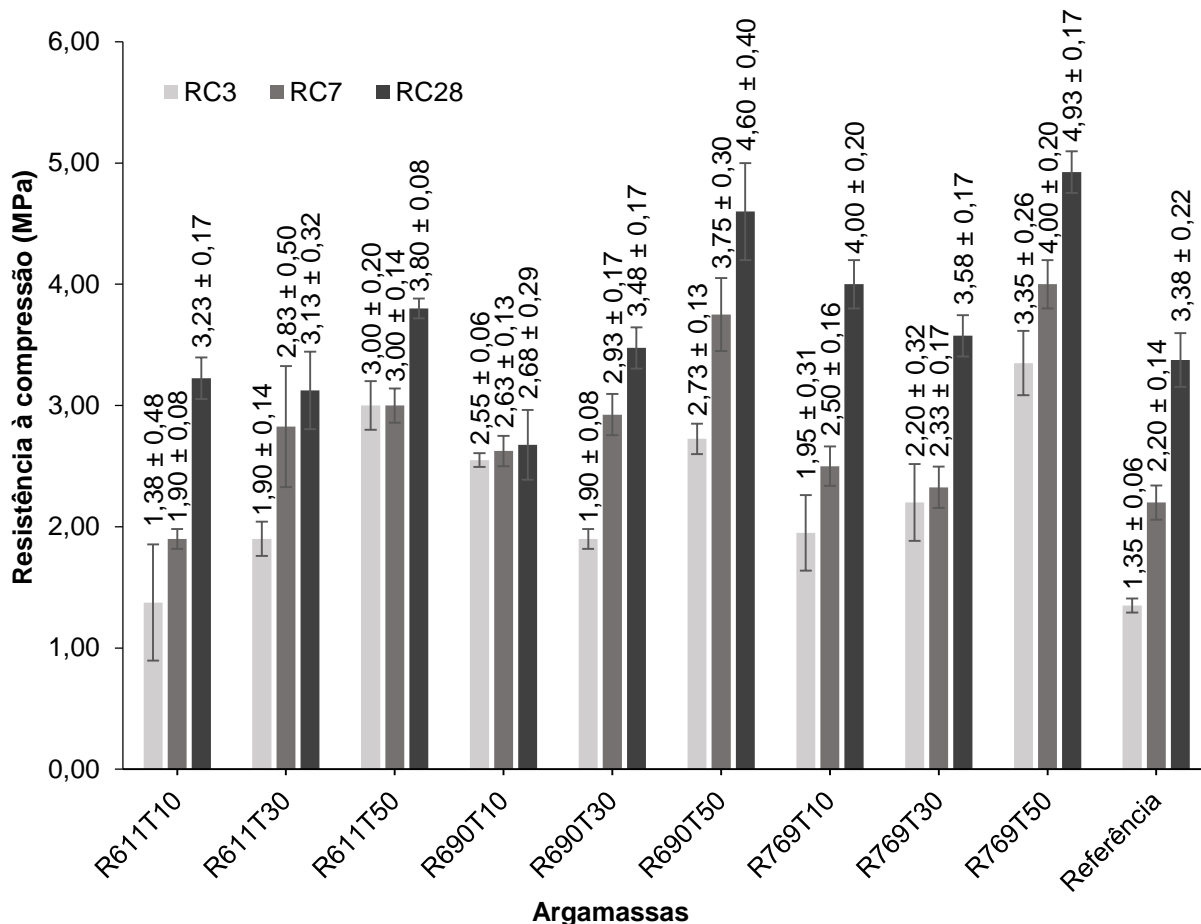
4.1.2 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão aos 3 (RC3), 7 (RC7) e 28 (RC28) dias são apresentados na Figura 55.

As argamassas geopoliméricas contendo teor de substituição de 50% apresentaram os maiores valores de resistência à compressão inicial, atingindo cerca de 80% da resistência final aos 7 dias. Os estudos de Hardjito e Rangan (2005) afirmam que as argamassas geopoliméricas possuem maior resistência à compressão. Segundo Islam *et al.* (2014), as argamassas geopoliméricas alcançam quase 90% da resistência final até os 7 dias.

Aos 28 dias é possível notar que a tendência continua a mesma para a resistência à compressão. A argamassa R769P50 continuou apresentando melhor resistência, cerca de 45% maior quando comparada à argamassa padrão. A ASTM C270 (ASTM, 2007) estabelece que, a resistência à compressão aos 28 dias, em argamassas compostas por cal e cimento deve ser superior a 2,40MPa. As argamassas analisadas apresentaram valores superiores ao estabelecido em norma.

Figura 55 - Resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias (MPa)



Fonte: Kretzer *et al.* (2019) e A Autora (2020)

Analisando estatisticamente os resultados da resistência à compressão aos 28 dias através da análise variância (ANOVA), observa-se que o fator TS (L) apresenta maior relevância para o modelo. A Tabela 27 apresenta os fatores A/C e TS, e as interações lineares entre eles, com seus efeitos significativos e não significativos. As interações quadráticas não apresentaram efeitos significativos e não foram consideradas.

Tabela 27 - ANOVA da RC28 com efeitos estatisticamente significativos e não significativos

Fator	Soma dos Quadrados	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	0,92	0,92	0,92	4,32	0,1293
A/C (Q)	0,07	0,07	0,07	0,34	0,5985
TS (L)	1,95	1,95	1,95	9,14	0,0566
TS (Q)	0,45	0,45	0,45	2,13	0,2405
A/C (L) x TS (L)	0,03	0,03	0,03	0,15	0,7227
Erro	0,64	0,64	0,21		
Total	4,07	4,07			

(L) termo linear, (Q) termo quadrático

Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

Considerando apenas os fatores com menor p-valor, e admitindo-se um nível de significância (α) de 0,15 para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), ignora-se os fatores A/C (Q) e a interação A/C (L) x TS (L) para o modelo final, conforme Tabela 28. O fator A/C (L) ($p = 0,0556 \leq \alpha$), o fator TS (L) ($p = 0,0153 \leq \alpha$) e o fator TS (Q) ($p = 0,1413 \leq \alpha$) são estatisticamente significativos.

Tabela 28 - ANOVA da RC28 com efeitos estatisticamente significativos

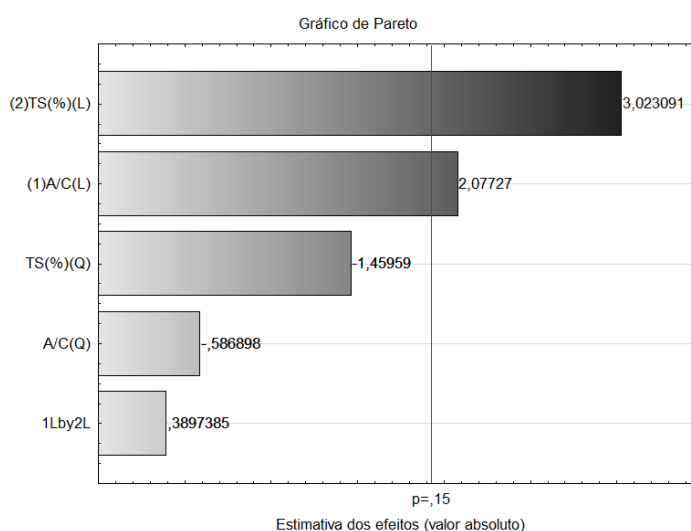
Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	F ₀	p
A/C (L)	0,92	1	0,92	6,17	0,0556
TS (L)	1,95	1	1,95	13,07	0,0153
TS (Q)	0,45	1	0,45	3,05	0,1413
Erro	0,74	5	0,15		
Total	4,07	8			

(L) termo linear, (Q) termo quadrático

Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

Verificando o diagrama de Pareto, Figura 56, que determina a magnitude e a importância dos efeitos, é possível verificar que o fator TS (L) é o efeito mais significativo, seguido do fator A/C (L), pois seu valor ultrapassa a linha de referência para o nível de significância adotada (α) de 15%.

Figura 56 - Diagrama de Pareto dos efeitos na resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: A Autora (2020)

A proporção da variabilidade (R^2) foi de 0,8168, ou seja, indica que os fatores e seus efeitos representam 81,68% da variabilidade das medidas. O valor de R^2 ajustado com todos os efeitos era de 0,66, e após a retirada dos efeitos não

significativos, o valor do R^2 ajustado foi de 0,70. O “Teste F” indica qual variável proporciona o maior impacto na variação da resistência: quanto maior o valor do teste, maior será sua significância. Assim sendo, o TS (L) é o fator mais significativo, seguido da relação A/C (L) e depois, o TS (Q).

A partir dos resultados, a equação final ajustada para o modelo pode ser determinada pela Equação 30, onde x_1 é o fator A/C e x_2 é o fator TS.

$$RC28 = 0,193281 + 0,495781x_1 - 0,04300x_2 + 0,001192x_2^2 \quad (30)$$

A adequação do modelo foi avaliada através dos resíduos. Observando os gráficos da aleatoriedade dos resíduos (Figuras 57a e 57b), mostra que os resíduos não possuem tendência de afunilamento, e no gráfico de probabilidade da normal (Figura 57c), a distribuição dos pontos segue a linha reta da normal. Pode-se concluir que o modelo é adequado para retratar o comportamento da resistência à compressão aos 28 dias, como uma função entre o A/C e TS.

Figura 57 - Análise dos resíduos do RC28: a) resíduos versus número de casos; b) resíduos versus valores preditos; c) resíduos versus valores normais esperados

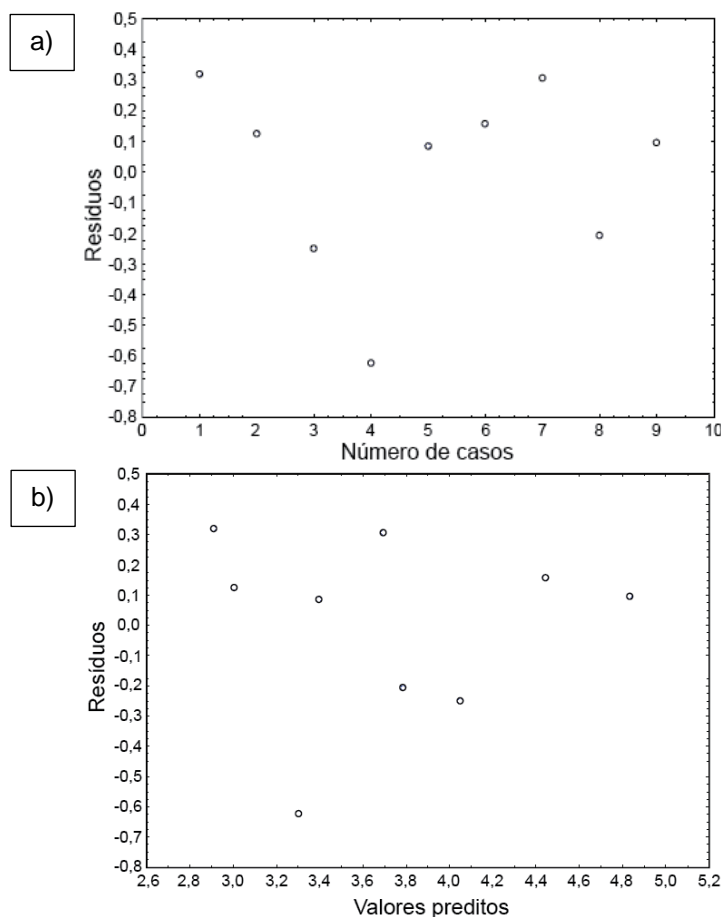
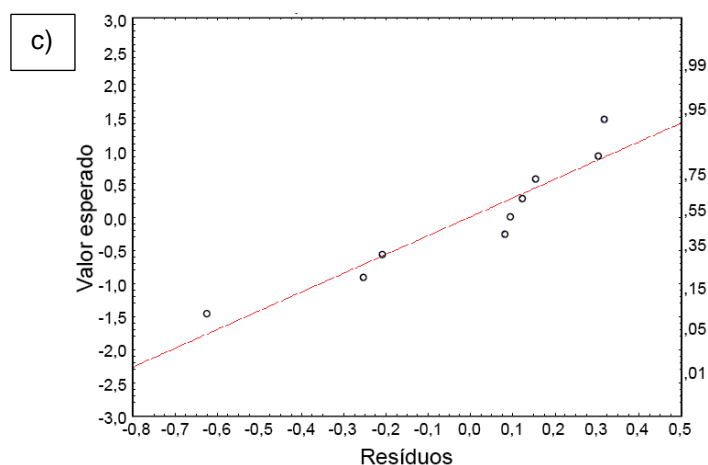


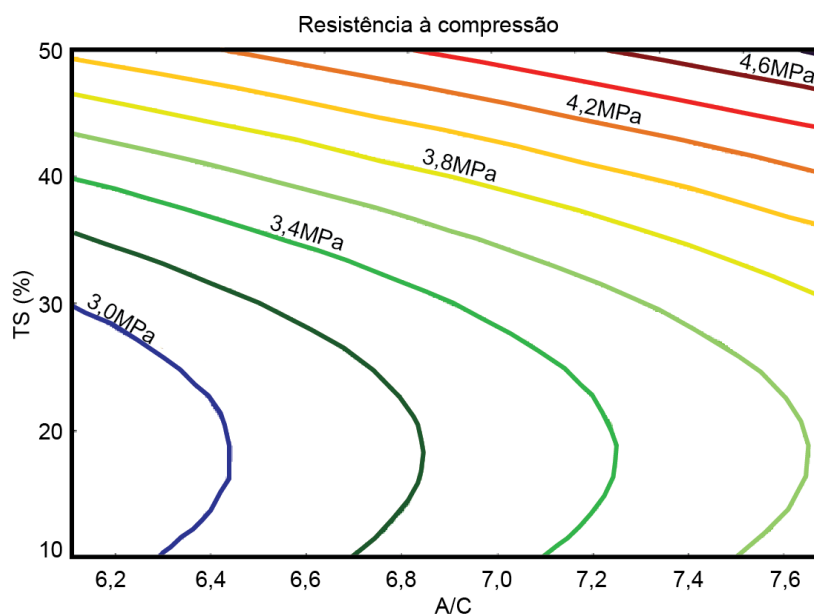
Figura 57 (continuação) – Análise dos resíduos do RC28: a) resíduos versus número de casos; b) resíduos versus valores preditos; c) resíduos versus valores normais esperados



Fonte: A Autora (2020)

Através do gráfico de contorno da superfície de resposta, Figura 58, pode-se observar melhor o efeito dos fatores A/C e TS na RC28. Conforme a Figura 58, para obter argamassas com resistência à compressão acima de 4,0 MPa (respeitando a trabalhabilidade, A/C acima de 7,6), de acordo com a figura, a quantidade de cimento geopolimérico deve ser acima de 40% (limitado à 50%).

Figura 58 - Gráfico de contorno da superfície de resposta do RC28



Fonte: Kretzer *et al.* (2019)

4.2 FASE II

A partir dos resultados obtidos na Fase I, as argamassas foram selecionadas para os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), análises térmicas (ATD e TG), difração de raios X (DRX) e durabilidade, relativos à Fase II da pesquisa. As argamassas escolhidas foram: R690T10; R690T30; R690T50; R611T50; R769T50 e argamassa de referência.

O principal fator de escolha foi a resistência à compressão, onde, as argamassas com 50% de substituição foram selecionadas por conta dos maiores resultados obtidos. Conforme Zhang *et al.* (2018), a resistência à compressão é o primeiro parâmetro a ser considerado em misturas de argamassas geopoliméricas

Ainda, as argamassas com relação A/C de 6,90 foram selecionadas durante a realização dos ensaios devido à argamassa não apresentar os maiores valores de consistência (mais fluida) e também, por ser trabalhável em um espaço de tempo mais adequado.

4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microestrutura das argamassas selecionadas, obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), estão apresentadas na Figura 59.

A argamassa de referência, Figura 59a, apresenta na interface entre o agregado e a pasta de cimento o aparecimento de fissuras, característica típica das argamassas à base de cimento Portland.

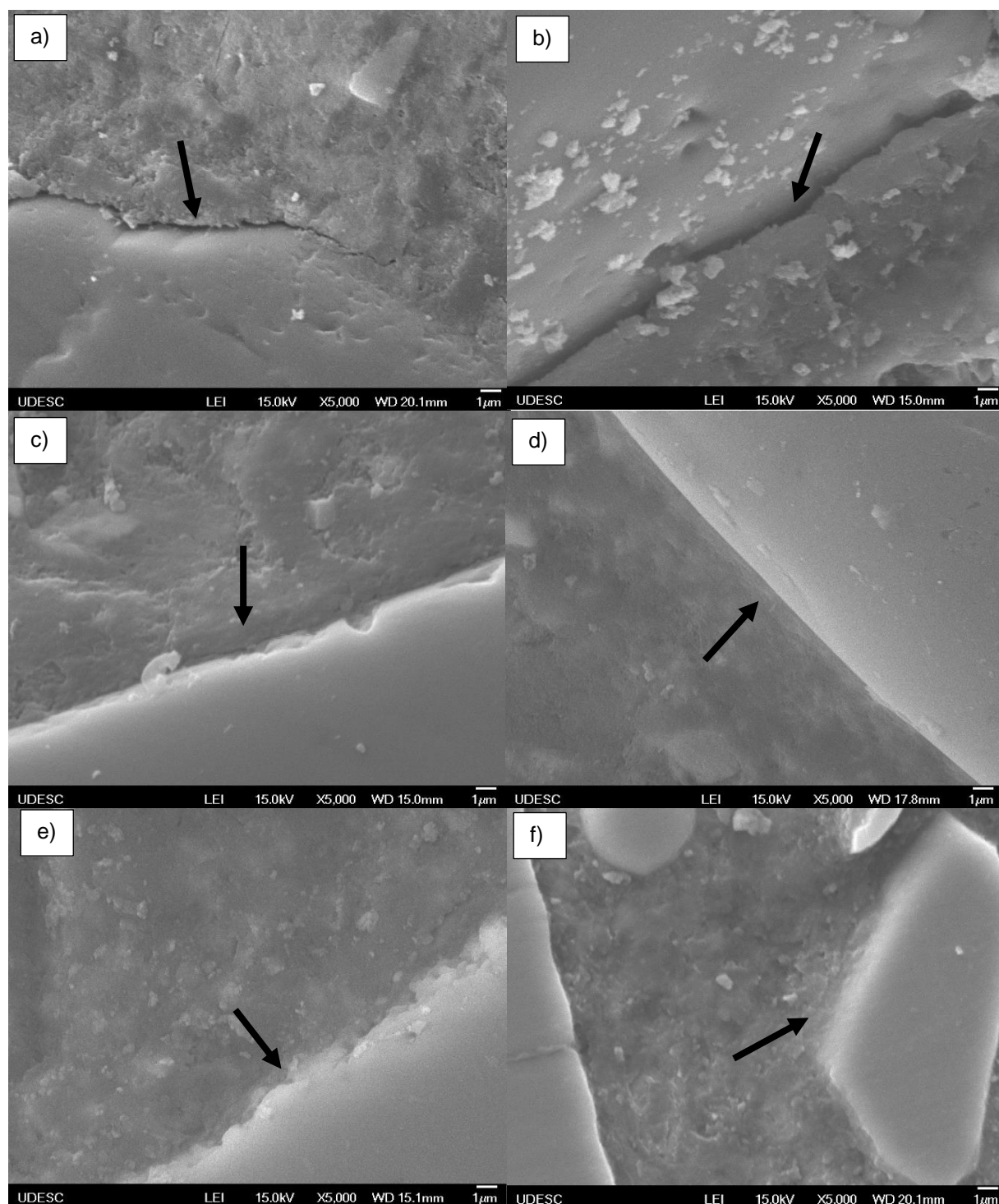
Para as argamassas com substituição parcial de 10% e 30%, R690T10 e R690T30, Figuras 59b e 59c respectivamente, observa-se uma diminuição nas fissuras na interface da pasta e agregado conforme o aumento da substituição.

Já para as argamassas com 50% de substituição do cimento Portland pelo cimento geopolimérico, R690T50, R611T50 e R769T50, Figuras 59d, 59e e 59f, a interface entre o agregado e a pasta de cimento está bem homogênea, mais densa, sem trincas em evidências, indicando melhor adesão entre a matriz cimentícia e as partículas.

Basicamente, a microestrutura das argamassas geopoliméricas com 10%, 30% ou 50% é similar, o que é consistente com a estreita variação na resistência à compressão. Conforme pesquisas, a microestrutura de geopolímeros torna-se mais

compacta e homogênea quando composta por cinza volante e escória granulada de alto forno, fator esse, que tem influência direta no aumento do ganho de resistência.

Figura 59 – Microscopia eletrônica de varredura: a) Referência, b) R690T10, c) R690T30, d) R690T50, e) R611T50, f) R769T50



Fonte: A Autora (2020) e Schwaab (2019)

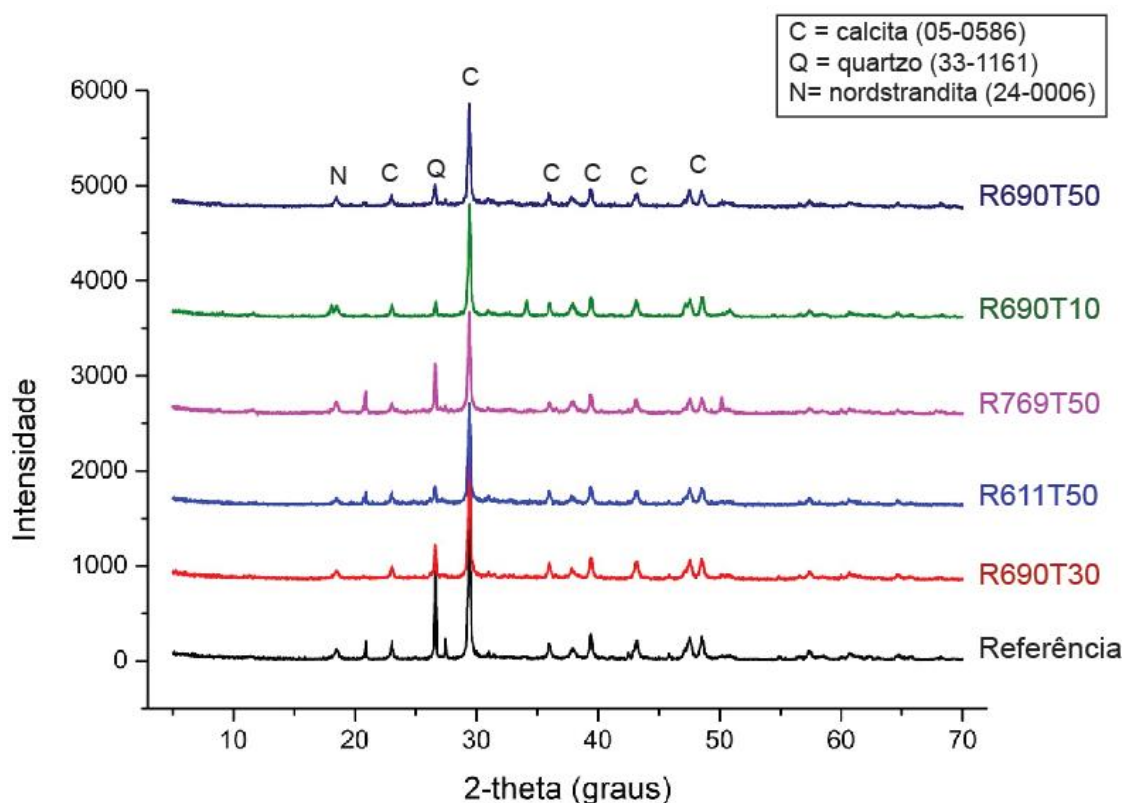
Os geopolímeros compostos por EGAF e CV liberam silicatos e aluminatos, além de cálcio, devido à dissolução das fases reativas das partículas destes componentes, como pode ser confirmado nos resultados obtidos por DRX (YAZDI *et al.*, 2018). A matriz cimentícia torna-se mais compacta e densa com o aumento na quantidade de Ca(OH)_2 (DOMBROWSKI, BUCHWAL, WEIL, 2007).

Conforme estudos de Riahi *et al.* (2020), em geopolímeros à base de metacaulim, quanto menor for a razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sua estrutura será menos densa, com partes não reagidas e maiores poros. Enquanto que, quando a razão molar for acima de 3.25, a estrutura será mais densa e homogênea. Entretanto, para valores acima de 3.75, a estrutura pode vir a formar pequenos poros e trincas, devido à retração.

4.2.2 Difratometria de raios X

Com o intuito de identificar as principais fases cristalinas presentes em cada mistura foi realizado o ensaio de difratometria de raio X (DRX) nas 6 argamassas, conforme Figura 60.

Figura 60 - Difratometria de raios X (DRX)



Fonte: A Autora (2020) e Schwaab (2019)

É possível observar que o principal pico de intensidade em todas as argamassas é do carbonato de cálcio, também conhecido como calcita (CaCO_3) e do quartzo (SiO_2). Em, aproximadamente, $2\theta \sim 30$ graus, todas as composições apresentaram um pico de calcita, e pequenos picos de norsdtrandita [$\text{Al}(\text{OH})_3$] são identificados em todas as argamassas. De modo geral, não se constatou alteração significativa entre os difratogramas das composições.

As argamassas apresentam fases mineralógicas características da matéria-prima, como o quartzo, da areia, metacaulim e cinza volante. Ainda, a calcita está relacionada às fases comuns do clínquer (ROMANO *et al.*, 2016).

A difratometria revelou a presença de CaCO_3 em forma de calcita, como produto cristalino, que geralmente é encontrado em geopolímeros com alta quantidade de EGAF. Este produto, juntamente com o gel formado pela geopolimerização (N-A-S-H e C-A-S-H), podem ser a razão pela qual as composições apresentam maior resistência mecânica e menor porosidade (YAZDI *et al.*, 2018).

A presença de fases de geopolímeros é associada em picos de $28-35^\circ 2\theta$, e as fases de C-S-H e C-A-S-H são associadas principalmente no pico de $30^\circ 2\theta$. Os produtos de hidratação do cimento coexistem com os produtos dos geopolímeros e contribuem para o desenvolvimento da resistência (PANGDAENG *et al.*, 2014).

4.2.3 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

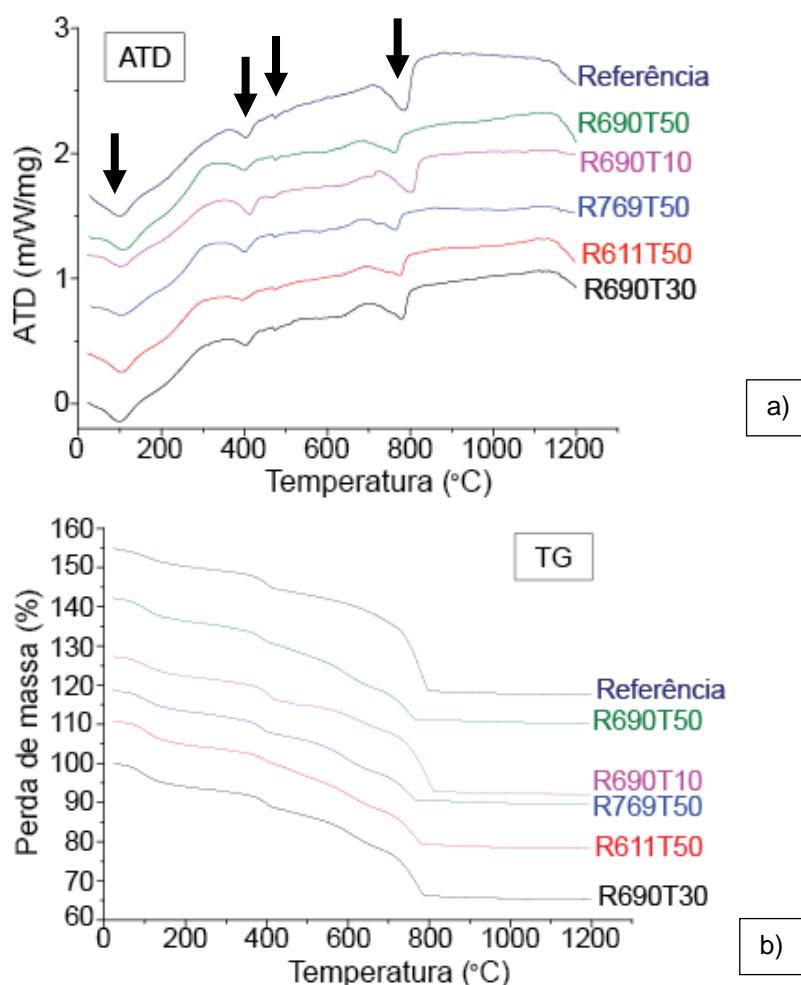
As Figuras 61a e 61b mostram as curvas de ATD (análise térmica diferencial) e TG (termogravimetria) do comportamento térmico dos compostos analisados entre as temperaturas de 20°C a 1200°C .

Conforme Figura 61a, ambas as amostras possuem 4 picos endotérmicos. O primeiro na faixa entre 100°C e 110°C é atribuído à desidratação parcial (perda de água) da etringita, sendo mais proeminente na mistura padrão (ADAMOPOULOUA *et al.*, 2011). O segundo pico, próximo a 400°C , pode ser relacionado aos cristais de portlandita que sofrem desidratação, influenciando na retração e microfissuração da pasta (FERNANDES *et al.*, 2017). O terceiro pico endotérmico próximo a 475°C é conferido ao hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$. À medida que a concentração de geopolímero aumentou, houve uma redução desse pico (VEIGA; GASTALDINI, 2012). O quarto pico, que ocorre entre 700°C e 800°C , é atribuído à perda de CO_2 e à

presença de carbonato de cálcio, também chamado de calcita (ADAMOPOULOUA *et al.*, 2011).

Em relação à perda de massa, Figura 61b, a argamassa de referência foi a que mais sofreu perda, uma diminuição de aproximadamente 37,6% antes da degradação do material, conforme observado no gráfico da TG. A argamassa com maior quantidade de cimento geopolimérico e maior índice de agregado/cimento (R769T50) foi a que obteve menor perda, de cerca de 29,4%.

Figura 61 - Análise térmica: a) ATD, b) TG

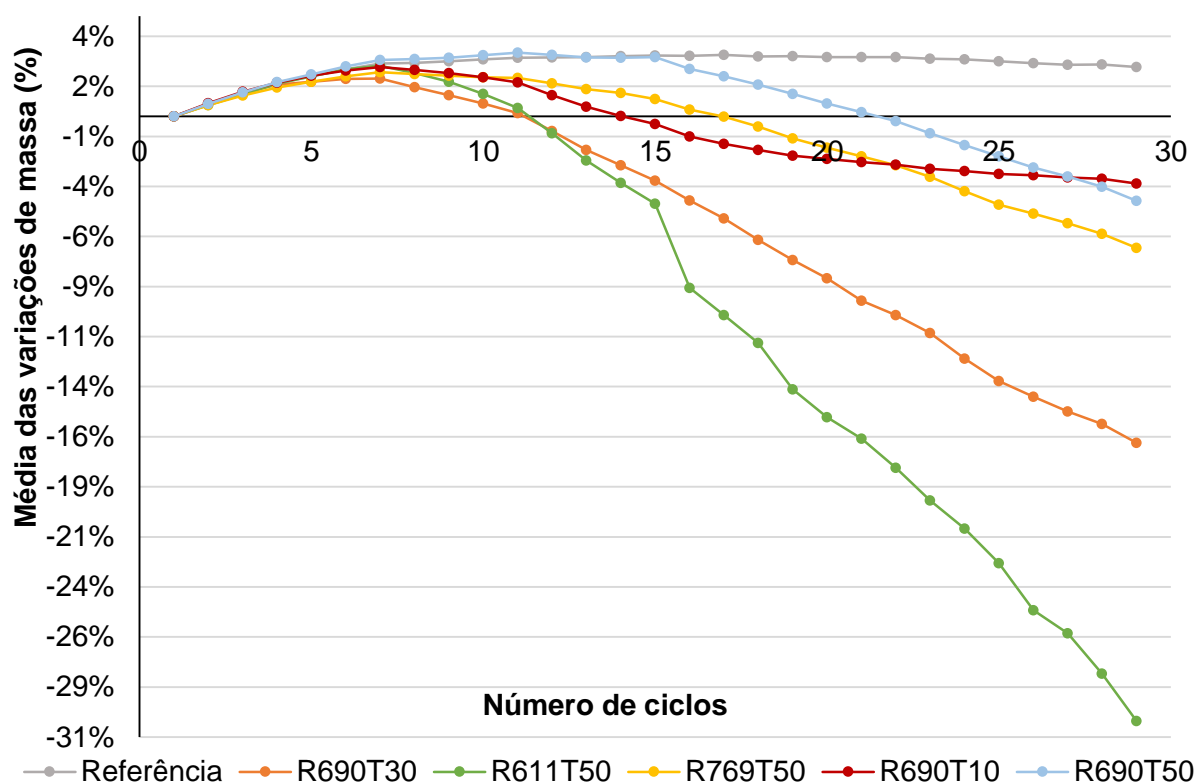


Fonte: A Autora (2020) e Schwaab (2019)

4.2.4 Durabilidade

O resultado da variação de massa de cada tipo de argamassa ao ataque de sulfato de sódio através de ciclos de molhagem e secagem é apresentado na Figura 62. No total, foram realizados 30 ciclos até total degradação das argamassas.

Figura 62 - Resistência das argamassas ao ataque de sulfato de sódio



Fonte: A Autora (2020).

A argamassa de referência teve um aumento de massa até o 17º ciclo e a argamassa R690T50 até o 11º ciclo. Todas as outras argamassas aumentaram a massa apenas até o 7º ciclo. O aparecimento de pequenos danos começou logo em seguida, iniciando a deterioração das argamassas e eventual perda progressiva de massa.

Até o 29º ciclo, a argamassa de referência não teve perda de massa em relação à massa inicial (sua massa ainda estava 2,46% maior que a inicial). Enquanto que, a argamassa R611P50 apresentou uma perda de aproximadamente 31% da massa comparando com a massa inicial. No início do ensaio, um dos corpos de prova da argamassa R611P50 estava quebrado, fato que pode ter contribuído para a maior perda de massa, devido ao aumento da área superficial da amostra suscetível ao ataque do sulfato de sódio.

No 30º ciclo, após a aceleração do processo de deterioração, as argamassas tiveram um grande aumento de massa, e posterior degradação. Não foi possível pesar as amostras, sendo assim, o fator de deterioração foi determinado visualmente.

Nas argamassas geopoliméricas, quando expostas ao sulfato de sódio, pode ter ocorrido um equilíbrio químico entre os compostos à base de sódio das

argamassas e a solução de sulfato de sódio, sendo provavelmente o motivo pelo qual apresentou maiores perdas de massa (MAURI *et al.*,2009).

Na Figura 63 é possível observar todo o processo de deterioração das argamassas: a perda de massa gradativa, o aparecimento de pequenos danos, o aumento da massa devido a aceleração, e por último, a aparência final das argamassas.

Figura 63 - Processo de deterioração das argamassas no ataque de sulfato: (a) 18/03; (b) 27/03; (c) 15/04; (d) 24/04; (e) 26/04; (f) 27/04.



* Nomenclatura dos corpos de prova do ensaio de durabilidade:

2A= R690T30; 3A= R611T50; 6A= R769T50; 7A = R690T10; 9A = R690T50

** medida dos corpos de prova: 160 x 40 x 40 mm

Fonte: A Autora (2020).

As argamassas com maior quantidade de geopolímeros apresentam bom desempenho em relação à resistência do ponto de vista da durabilidade ao ataque de sulfatos, conforme estudo realizado com geopolímero à base de metacaulim e ativado por KOH e SS (MAURI *et al.*, 2009). Por possuir uma microestrutura com rede mais densa, a matriz geopolimérica tem sua durabilidade menos comprometida do que a matriz de CP (MAZZA, 2010)

Relacionando a perda de massa e as características visuais, a argamassa R690T50 apresentou os melhores resultados. Foi a única argamassa que suportou a aceleração da deterioração, sendo possível erguer e manusear o corpo de prova. Após a observação da microestrutura e associação com os resultados de durabilidade, as duas argamassas selecionadas para os ensaios da Fase III foram: argamassa de referência e argamassa R690T50.

4.3 FASE III

Os ensaios realizados na Fase III foram selecionados para analisar a viabilidade de aplicação da argamassa geopolimérica como uma argamassa de revestimento. Para esta fase, apenas a argamassa R690T50 e a argamassa de referência foram selecionadas por apresentarem as melhores propriedades e características na fase II.

Foi necessário um aperfeiçoamento da argamassa geopolimérica. Os ensaios da fase III foram executados com a nova argamassa geopolimérica R690T50S (alterado a quantidade de água e cal).

No total, foram selecionados 9 ensaios da fase III: tempo de pega, calor de hidratação, retenção de água, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração, absorção de água, condutividade térmica, variação dimensional e módulo de elasticidade. Ainda, os ensaios de índice de consistência e resistência à compressão foram repetidos devido à alteração da composição da argamassa geopolimérica.

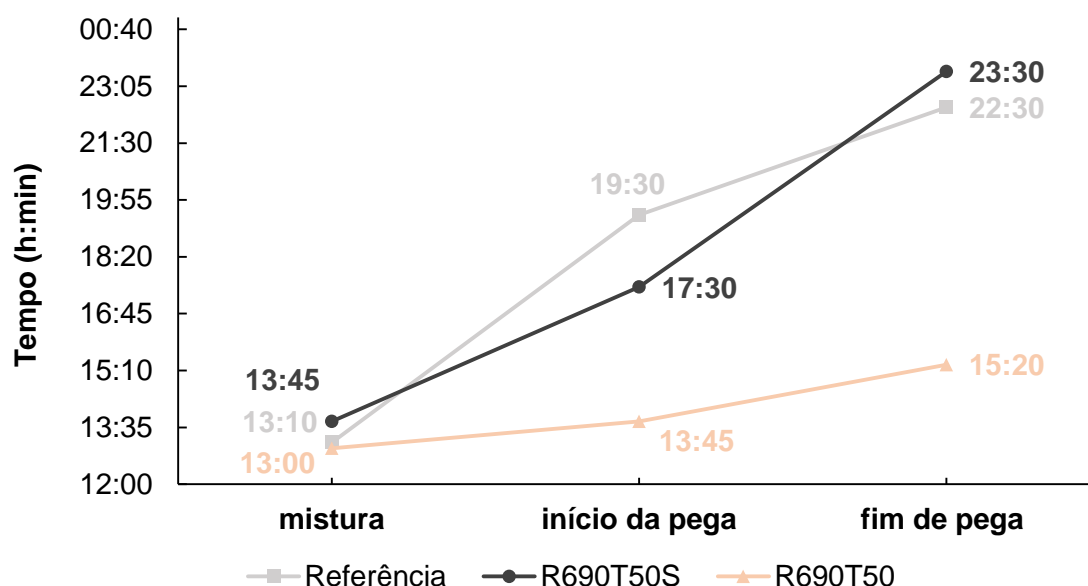
A seguir, estão apresentados os resultados obtidos em cada etapa da Fase III.

4.3.1 Tempo de pega

O ensaio de tempo de pega foi realizado com 3 argamassas. Primeiramente com as 2 argamassas escolhidas da Fase II, e após o aperfeiçoamento da argamassa

geopolimérica devido ao valor obtido no tempo de pega, com a argamassa R690T50S, conforme observado na Figura 64.

Figura 64 – Tempo de pega das argamassas



Fonte: A Autora (2020)

A argamassa de referência iniciou a pega após 6 horas e 20 minutos, e o final de pega ocorreu 3 horas depois, após o total de 9 horas e 20 minutos de ensaio.

A argamassa R690T50 teve um tempo de início e fim de pega extremamente rápido. Em apenas 45 minutos a pega teve início, e apenas 1 hora e 35 minutos depois, ocorreu o final da pega. A argamassa não apresentou tempo hábil para utilização, não sendo possível seu manuseio e aplicação.

Após a retirada da cal, a argamassa R690T50S teve um aumento considerável no tempo de início e fim de pega. Foram 3 horas e 45 minutos para iniciar a pega, e 9 horas e 45 minutos para o fim de pega.

Conforme Zhang *et al.* (2018), geopolímeros alcançam alta resistência à compressão nos primeiros dias devido ao seu rápido tempo de cura. O tempo de pega para cimentos Portland tradicionais é em média de 10 à 12 horas, enquanto, para geopolímeros é em torno de 2 à 4 horas.

Sabe-se que o tempo de pega é alterado com a adição da cal. Com o aumento da quantidade de cal, o tempo de pega diminuiu consideravelmente (NATH; SARKER, 2017). Segundo Pangdaeng *et al.* (2014), a adição significativa de cálcio acelera o

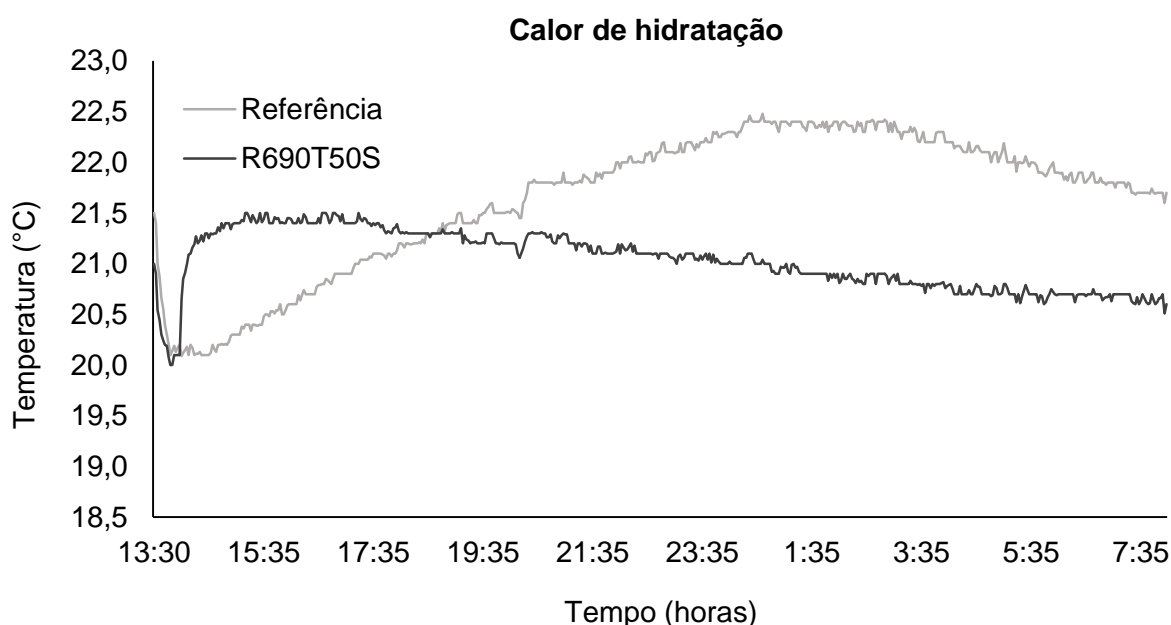
tempo de pega e endurecimento pois fornece locais extras de nucleação para a precipitação de espécies dissolvidas, o que aumenta a taxa de solidificação.

Durante a realização dos ensaios foi observado que a reação de tempo de pega na argamassa geopolimérica R690T50S não ocorria simultaneamente em todo o corpo de prova da amostra. Dependendo do ponto em que a agulha Vicat descia, a argamassa já havia dado pega, e em outros pontos a argamassa ainda estava fluida. Este fato pode estar relacionado à quantidade de água na mistura. A falta de água pode causar uma incompleta ativação, ou ainda, o excesso de água pode vir a reduzir a taxa de geopolimerização devido ao efeito de diluição (ZUHUA *et al.*, 2009). A quantidade de água inicial da mistura é um fator que afeta a densidade e a porosidade de geopolímeros após o período de cura e envelhecimento (RAPHAËLLE *et al.*, 2019).

4.3.2 Calor de hidratação

O gráfico da Figura 65 apresenta o calor de hidratação da argamassa de referência e da argamassa R690T50S.

Figura 65 – Resultados do calor de hidratação



Fonte: A Autora (2020)

Observa-se que a argamassa de referência tem um pequeno tempo de dormência, de aproximadamente 1 hora, e em seguida, o crescimento da temperatura é progressivo e constante. A argamassa atinge sua temperatura máxima de 22,5°C

após 11 horas da mistura, à 00 hora e 45 minutos. Esta mantém a temperatura constante por um breve período, até às 3 horas da manhã, e então começa a cair, atingindo a temperatura constante de 21,6°C às 8 horas da manhã do dia seguinte da mistura.

A argamassa geopolimérica tem um pico de aquecimento logo após mistura, atingindo a temperatura máxima de 21,5°C às 15 horas e 17 minutos, apenas 2 horas após a mistura. Essa temperatura se mantém estável por mais 2 horas, e decresce lentamente, até atingir a constância, de aproximadamente 20,6°C, também às 8 horas da manhã.

As duas argamassas partiram da temperatura de 20°C. Enquanto a argamassa de referência teve um aumento de 2,5°C na temperatura, a argamassa geopolimérica R690T50S aumentou apenas 1,5°C no total. Ou seja, as argamassas geopoliméricas liberaram menor quantidade de calor do que as argamassas de cimento Portland, em torno de 40% a menos. A menor variação de temperatura é preferida, pois o aumento do calor liberado está ligado ao aparecimento de microfissuras, muitas vezes responsáveis por diminuir a resistência e a vida útil das argamassas e concretos (MAUÁ, 2019).

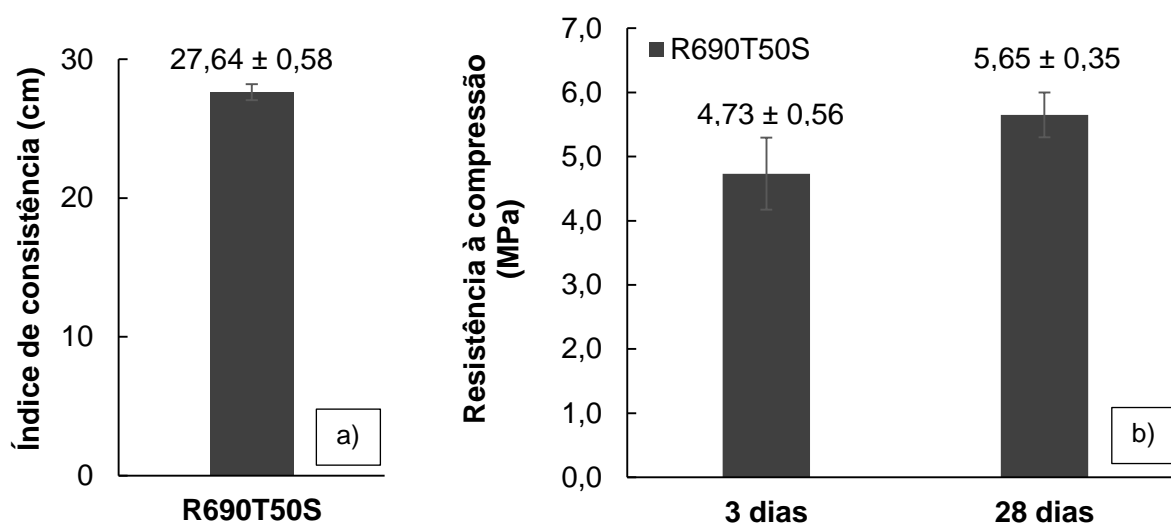
De acordo com Bigno *et al.* (2005), quando compararam o calor de reação de argamassas geopoliméricas de diferentes razões molares, entre reagentes e óxidos, e argamassas de cimento Portland, todas as argamassas geopoliméricas tiveram calor de hidratação inferior à argamassa de referência. Quando comparando os precursores, a cinza volante libera menor quantidade de calor durante a reação em relação ao metacaulim e à escória granulada de alto forno (BIGNO, 2008).

4.3.3 Resistência à compressão (RC) e Índice de Consistência (IC)

Os ensaios de resistência à compressão (RC) e índice de consistência (IC) foram repetidos para a nova argamassa geopolimérica selecionada, R690T50S. Os resultados obtidos para estes dois ensaios estão apresentados nas Figuras 66a e 66b.

Conforme observado, com a retirada da cal e definida a nova quantidade de água, o índice de consistência estabelecido foi de $27,65 \pm 0,58$. Foi optado por manter um IC acima do definido em norma devido à rápida expulsão da água por exsudação, tentando assim, manter a argamassa trabalhável por mais tempo.

Figura 66 – Resultados Fase III – R690T50S: a) índice de consistência, b) resistência à compressão,



Fonte: A Autora (2020)

Em relação à resistência à compressão, com a retirada da cal, a argamassa R690T50S alcançou um valor de $4,73 \pm 0,56$ MPa aos 3 dias, e de $5,65 \pm 0,35$ MPa aos 28 dias. Ou seja, alcançou aproximadamente 84% de sua resistência final logo nos primeiros dias.

Comparando as duas argamassas, R690T50 e R690T50S, após a retirada da cal e ajuste da quantidade de água, a nova argamassa teve um acréscimo de 1,0 MPa na resistência final, um aumento em torno de 23%. A RC da R690T50 foi de $4,60 \pm 0,40$ MPa e da R690T50S foi de $5,65 \pm 0,35$ MPa.

A quantidade de cal nas misturas de argamassas geopoliméricas é um fator importante a ser observado. Alguns autores afirmam que o cálcio tem um impacto positivo nas propriedades mecânicas de ligantes geopoliméricos (YIP, LUKEY, DEVENTER, 2005). Em argamassas de CP e CG, os elementos de cálcio reagem e formam C-S-H e C-A-S-H adicionais que, coexistem com os produtos de geopolímeros e contribuem para o desenvolvimento da resistência das argamassas (PANGDAENG *et al.*, 2014). Outros autores atentam que existe uma quantidade considerada como ótima para ser inserida nas misturas que levam à formação de mais fases cristalinas, e, portanto, maior resistência. Quando em grandes quantidades, pode ocorrer encolhimento intenso e fissuração, com consequentes menores valores de resistência (DOMBROWSKI, BUCHWAL, WEIL, 2007).

Outro fator importante na determinação da resistência em argamassas com alto teor de cálcio é a quantidade de água inserida devido à diminuição da trabalhabilidade,

que leva a um aumento da porosidade das pastas hidratadas, e consequente diminuição da resistência (WINNEFELD *et al.*, 2010).

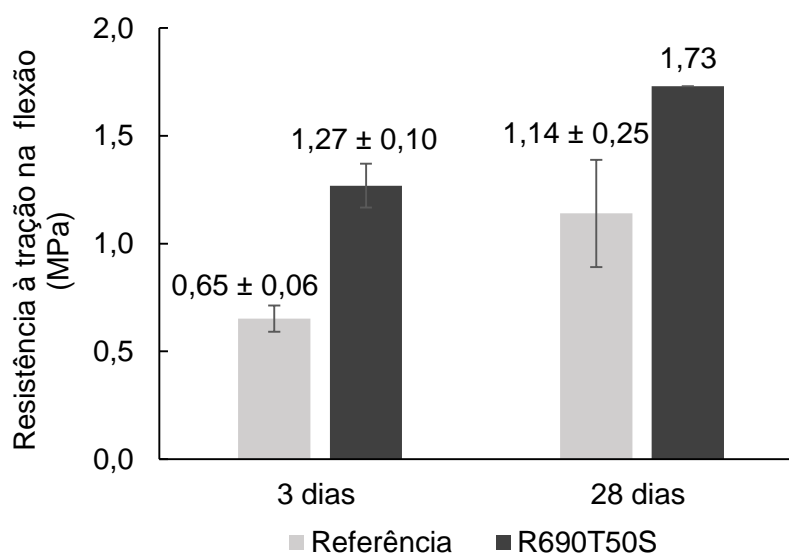
Desta forma, o aumento na resistência à compressão da nova argamassa geopolimérica pode estar vinculado a duas situações: a quantidade de cal inserida na R690T50 estava acima do ideal e/ou a quantidade de água estava muita alta. Como consequência, após a correção, a resistência da R690T50S aumentou.

A resistência à compressão de geopolímeros é determinada pelas propriedades de reação dos produtos, pelos materiais que não reagiram e ainda, pela porosidade. Um exemplo nos estudos de Yazdi *et al.* (2018) é que, geopolímeros com 30% de EGAF e 70% de CV atingiram 43MPa e porosidade de 18% em comparação aos geopolímeros com 100% de CV com resistência de 17MPa e 17% de porosidade.

4.3.4 Resistência à tração na flexão

Os resultados referentes ao ensaio de resistência à tração na flexão (RTF) estão apresentados na Figura 67.

Figura 67 – Resultados da resistência à tração na flexão



Fonte: A Autora (2020)

Aos 3 dias de idade, a argamassa de referência alcançou 0,65 MPa e a argamassa geopolimérica 1,27 MPa. Comparando as duas, a argamassa R690T50S obteve praticamente o dobro da resistência. Aos 28 dias, a argamassa de referência atingiu o valor de 1,14 MPa e a R690T50S o valor de 1,73 MPa, isto é, a argamassa

de referência atingiu em torno de 65% da resistência final atingida pela argamassa geopolimérica.

Relacionado as resistências atingidas, a R69T50S atingiu aproximadamente 73% da resistência final aos 3 dias, enquanto que, a argamassa de referência atingiu em torno de 57%. Para argamassas de cimento Portland, geralmente quando a argamassa tem alta resistência à compressão a argamassa também apresenta alta resistência à flexão.

A quantidade de areia tem significativo efeito na resistência à flexão de argamassas geopoliméricas: com o aumento da quantidade de areia, até um teor de 78% do total da pasta, a resistência à flexão tende a aumentar (ZHANG *et al.*, 2018). Nos estudos de Al-Majidi *et al.* (2016), a resistência à flexão pode ser aumentada com a substituição de CV por EGAF, em temperatura ambiente, em porcentagens de 10% para 40%.

O aumento do teor de EGAF sugere um aumento na resistência à flexão. Este fato pode ser atribuído, parcialmente, ao efeito dos cristais de CaCO_3 dissolvidos da reação da EGAF, em combinação com uma adequada ligação entre os cristais e as fases amorfas. Entretanto, ainda são necessários estudos mais aprofundados para fornecer maiores evidências para este fato (YAZDI *et al.*, 2018).

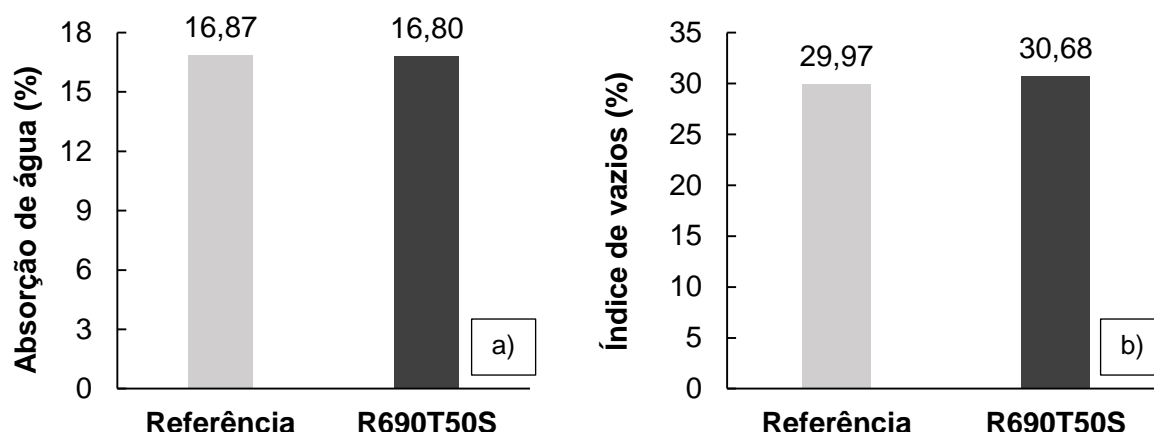
A mesma teoria para a resistência à compressão é aplicada para a resistência à tração na flexão. A quantidade de cal inserida na mistura afeta diretamente a resistência. Nos estudos de Dombrowski, Buchwal e Weil (2007), os cimentos geopoliméricos à base de cinza volante apresentaram melhores resultados de resistência à tração na flexão quando a adição de Ca(OH)_2 foi de 8%, comparando com os resultados sem nenhuma adição ou acima de 20% de Ca(OH)_2 .

4.3.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água e índice de vazios estão dispostos nas Figuras 68a e 68b, respectivamente.

As duas argamassas apresentaram resultados similares para ambas as análises. Enquanto que a argamassa de referência teve a absorção de água em 16,87%, a R690T50S alcançou um valor de 16,80%. Já para o índice de vazios, a argamassa de referência obteve um valor de 29,97%, e a argamassa geopolimérica R690T50S de 30,68%.

Figura 68 – Resultados: a) absorção de água, b) índice de vazios



Fonte: A Autora (2020)

Nos estudos de Pangdaeng *et al.* (2014), geopolímeros à base de CV com alto teor de cálcio e ativados por hidróxido de sódio e silicato alcalino de sódio, quando comparados com argamassas geopoliméricas com cimento Portland, obtiveram resultados muito próximos para a absorção de água.

Em relação à massa específica real (ρ_r), as argamassas também tiveram resultados parecidos, conforme indicado na Tabela 29. O valor obtido para a argamassa de referência foi de 2,54g/cm³, enquanto que, para a argamassa R690T50S foi de 2,64g/cm³.

Tabela 29 – Resultados referentes à massa específica

Argamassa	Massa específica real (g/cm ³)
Referência	2,54
R690T50S	2,64

Fonte: A Autora (2020)

Conforme os estudos de Nath e Sarker (2017), concretos geopoliméricos à base de cinza volante, quando comparados com concretos de cimento Portland, possuem densidades similares.

Para Yazdi *et al.* (2018), existe uma relação entre a quantidade de escória e a porosidade: quanto mais escória adicionada à mistura, menor será a porosidade, e consequentemente, maior a resistência à compressão. Ambas as resistências, à compressão e à tração, apresentam uma evidente diminuição com o aumento da porosidade. Existe uma relação entre a densidade e a resistência à compressão: quanto mais denso, maior a resistência à compressão atingida (NATH; SARKER, 2017).

Para os cimentos geopoliméricos, estudos indicam que o tamanho do poro varia conforme a razão de Si/Al, e a estrutura dos poros será determinada pela dimensão e natureza dos polissialatos e entre a interação das fases do material (KAMSEU *et al.*, 2012).

4.3.6 Retenção de água

Conforme a ASTM C270 (ASTM, 2007), as argamassas devem reter no mínimo 75% da água. Entretanto, a NBR 13281 (2005e) divide as argamassas em 6 classes diferentes, com índices de retenção diferentes da ASTM, conforme a Tabela 30.

Tabela 30 - Retenção de água

Classe	Retenção de água %
U1	≤ 78
U2	72 a 85
U3	80 a 90
U4	86 a 94
U5	91 a 97
U6	95 a 100

Fonte: NBR 13281 (2005e)

A retenção de água tem influência tanto no estado fresco quanto no endurecido. Quanto maior a retenção de água, melhor será sua trabalhabilidade e acabamento, assim como, permite que a hidratação do cimento aconteça de forma gradativa e resulte em melhores resultados de aderência entre substrato e argamassa (CARASEK, 2007).

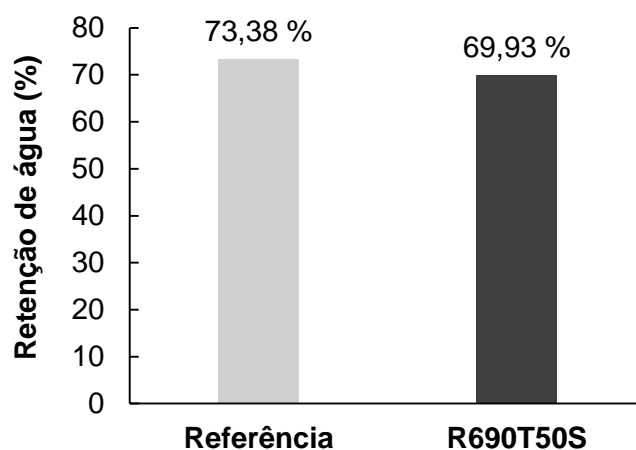
Os resultados obtidos para o ensaio de retenção de água das argamassas estudadas estão apresentados na Figura 69. A argamassa de referência reteve 73,4% da água, enquanto que, a argamassa geopolimérica R690T50S reteve apenas 69,9%.

Nenhuma das argamassas alcançou a retenção mínima de 75%, conforme norma estrangeira citada acima, entretanto, a argamassa de referência foi a que atingiu valores mais próximos. As duas argamassas podem ser classificadas como U1 ou U2 conforme os requisitos da norma brasileira NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Grande parte da água foi expelida por exsudação na argamassa geopolimérica, conforme observado durante os ensaios. Em concordância com a literatura, a água introduzida em cimentos geopoliméricos não participa da formação de hidratos, como é no caso do cimento Portland. Como consequência, a adição de água em excesso

em geopolímeros implica no enfraquecimento do material, supostamente aumentando a porosidade (RAPHAËLLE *et al.*, 2019).

Figura 69 – Resultados da retenção de água



Fonte: A Autora (2020)

Entretanto, a água tem importante função durante o processo de geopolimerização. Ela auxilia nas reações de dissolução, hidrólise e policondensação durante a síntese de geopolímeros, proporcionando meios para a dissolução dos aluminossilicatos e o transporte de vários íons (ZUHUA *et al.*, 2009).

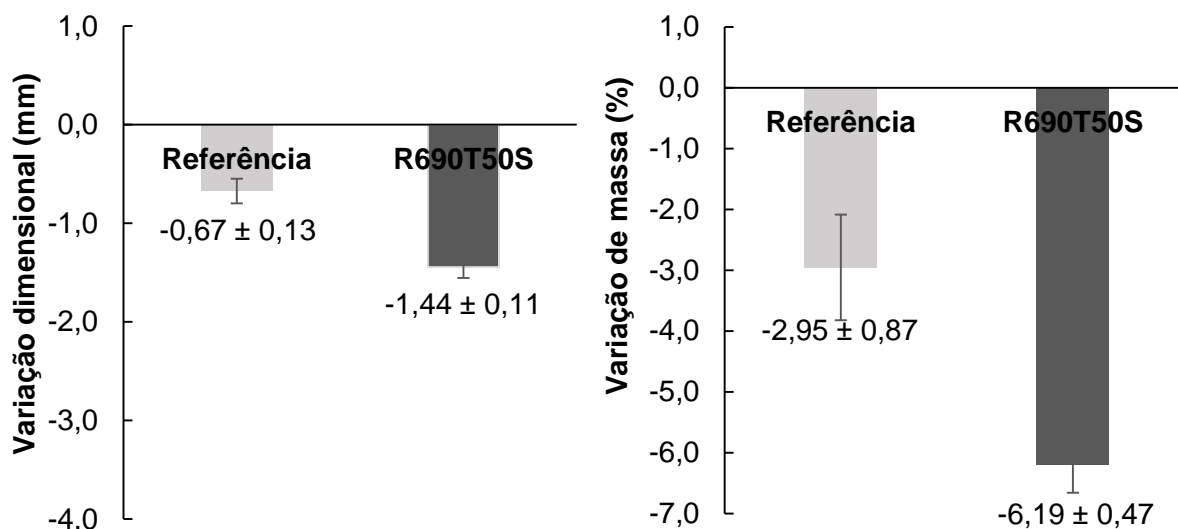
Relacionando os resultados, as duas argamassas tiveram a mesma absorção de água e índice de vazios, entretanto, a argamassa geopolimérica não reteve a água da mistura. A baixa retenção de água na argamassa geopolimérica pode estar vinculada à falta de adição de cal na mistura. Conforme Mendes *et al.* (2019), a cal tem alto índice de retenção de água.

4.3.7 Variação dimensional

As Figuras 70a e 70b apresentam os resultados obtidos, aos 28 dias de idade, da variação dimensional e variação da massa, respectivamente.

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 70a, as duas argamassas sofreram retração, ou seja, a dimensão final diminuiu quando comparada com a dimensão inicial. Comparando as duas argamassas, a argamassa de referência teve uma retração média de $0,67 \pm 0,13\text{mm}$, enquanto que, a média obtida para a argamassa geopolimérica foi de $1,44 \pm 0,11\text{mm}$. A argamassa R690T50S teve uma variação dimensional maior que a argamassa de referência, aproximadamente 114%.

Figura 70 – Resultado: a) variação dimensional (mm), b) variação de massa (%)



Fonte: A Autora (2020)

De acordo com Nath e Sarker (2017), os íons de silicatos das soluções ativadoras melhoram a resistência e o módulo de elasticidade, entretanto, causam um pequeno efeito desfavorável em relação às propriedades de ligação e retração.

Em relação à variação de massa, Figura 70b, a diferença entre as duas argamassas seguiu o mesmo padrão. Ambas tiveram uma diminuição da massa total: a argamassa de referência diminuiu 2,95% do seu total, enquanto que, a R690T50S diminuiu 6,19%. Comparando as duas, a argamassa geopolimérica também teve uma diminuição de massa maior, praticamente 110%.

Nos estudos de variação de massa e retração/expansão de Hosan *et al.* (2016), foi observado que geopolímeros contendo ativador à base de sódio tem maior perda de massa quando comparadas com equivalentes à base de potássio. Em relação à variação dimensional, os resultados são semelhantes à variação de massa, onde, o geopolímero à base de potássio apresenta menor retração do que seu equivalente à base de sódio. Sendo assim, os geopolímeros à base de sódio apresentaram sinais de trincas na superfície das amostras em temperaturas mais baixas do que os geopolímeros à base de potássio.

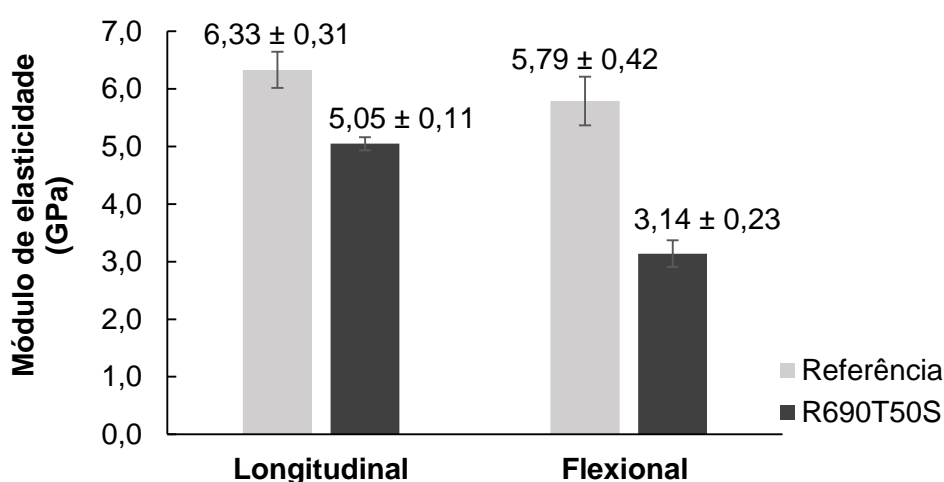
Em cimentos geopoliméricos à base de EGAF foi relatado alcance de alta resistência, entretanto, problemas relacionados ao rápido tempo de pega, insuficiente trabalhabilidade, além de altos valores à retração (AL-MAJIDI *et al.*, 2016). Conforme Chi e Huang (2013), quando comparado cimento geopolimérico à base de EGAF e cimento Portland, houve uma maior retração no CG.

4.3.8 Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

Conforme Diógenes (2016), o módulo de elasticidade está ligado à aparição de fissuras, em uma relação inversamente proporcional: quanto maior o valor do módulo de elasticidade, menor é a capacidade de deformação, ou seja, é um material mais rígido.

A Figura 71 apresenta os resultados obtidos para o ensaio do módulo de elasticidade longitudinal e flexional na idade de 28 dias para a argamassa de referência e para a argamassa geopolimérica.

Figura 71 - Resultado do módulo de elasticidade das argamassas



Fonte: A Autora (2020)

Analisando o gráfico do módulo de elasticidade, a argamassa geopolimérica obteve valores inferiores à argamassa de referência tanto no modo longitudinal quanto no flexional. A substituição do cimento Portland pelo cimento geopolimérico diminuiu o módulo de elasticidade, indicando que as argamassas geopoliméricas absorvem melhor pequenas deformações. Conforme Diógenes (2016), quanto maior a quantidade de cimento Portland, maior o módulo de elasticidade.

O módulo longitudinal teve uma pequena distinção dos resultados: a argamassa de referência obteve $6,33 \pm 0,31$ GPa, e a argamassa R690T50S alcançou $5,05 \pm 0,11$ GPa. A diferença foi mais considerável no módulo flexional, onde a argamassa de referência obteve média de $5,79 \pm 0,42$ GPa, enquanto que, a média da argamassa R690T50S foi de $3,14 \pm 0,23$ GPa.

Conforme Nath e Sarker (2017), o módulo de elasticidade tende a ser menor em concreto geopoliméricos, cerca de 25 a 30%, quando comparado com concretos de cimento Portland de mesma qualidade, em cura ambiente.

Nos estudos de França *et al.* (2018), com geopolímero à base de metacaulim e ativado por KOH e SS, foi encontrado valores para o módulo de elasticidade longitudinal de $6,8 \pm 0,3$ GPa, estando dentro de valores encontrados por outros autores, que variavam entre 5 e 11 GPa. Estes estudos indicam que o módulo de elasticidade é também determinado por sua microestrutura, e não apenas pela composição ou resistência.

Algumas características do próprio corpo de prova podem interferir nos resultados, como exemplo: vazios no concreto, presença de desmoldantes ou sujeiras, segregação e fissuras (PACHECO *et al.*, 2014).

4.3.9 Condutividade térmica

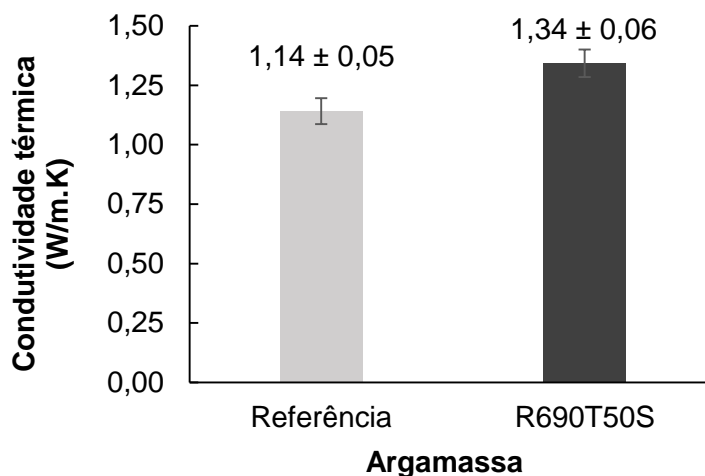
A condutividade térmica é uma propriedade específica de cada material e está relacionada ao transporte de calor constante através de um corpo (ISOVER, 2019). Um material deve ter baixa condutividade térmica para agir como um eficiente isolante térmico (NARAYANAN; SHANMUGASUNDARAM, 2017).

O isolamento térmico é definido como a habilidade que um material tem de suavizar a entrada ou saída de calor de um espaço para outro, com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica dos aparelhos de climatização. Em regiões frias, evita a perda de calor do ambiente, e para regiões quentes, mantém o calor externo ao ambiente (ISOVER, 2019).

Os resultados obtidos durante o ensaio de condutividade térmica para a argamassa de referência e para a argamassa R690T50S estão dispostos na Figura 72. A NBR 15220-2 (ABNT, 2005f) apresenta valores de referência, de forma não restritiva, para a condutividade térmica (λ), de uma argamassa comum, no valor de 1,15 (W/m.K).

Conforme observado, a argamassa de referência, com condutividade de $1,14 \pm 0,05$ W/m.K, apresenta valores ligeiramente inferiores à argamassa com adição de cimento geopolimérico, que obteve um resultado de $1,34 \pm 0,06$ W/m.K. Sendo assim, é possível observar que a argamassa de referência apresentou melhores características de isolante térmico.

Figura 72 – Resultado da condutividade térmica das argamassas



Fonte: A Autora (2020)

Esse resultado pode estar atribuído à quantidade de cal da mistura. Conforme Mendes *et al.* (2019), quanto maior a quantidade de cal na mistura, menor será a condutividade térmica, provavelmente relacionada ao alto índice de retenção deste aglutinante. Uma significativa quantidade de água demandada não irá reagir dentro das argamassas e, por evaporação, contribuirá para a formação de poros.

A porosidade é uma característica que influencia na condutividade térmica de concretos. Quanto maior a quantidade de poros, menor será a condutividade térmica devido à baixa condutividade do ar (SENGUL *et al.*, 2011). Deve ser observado o impacto que o aumento de poros pode vir a causar: aumento da permeabilidade e difusividade térmica, porém, diminuição da resistência mecânica (FONGANG *et al.*, 2015).

Relacionando os resultados da massa específica (ρ) e da condutividade (λ), observa-se que a argamassa geopolimérica, 2,64g/cm³, teve um resultado levemente superior à argamassa de referência, 2,54g/cm³, ou seja, a R690T50S é uma argamassa ligeiramente mais densa. Essa modesta diferença de massa específica pode ter ocasionado a pequena diferença na condutividade.

Nos estudos de Narayanan e Shanmugasundaram (2007), uma argamassa geopolimérica composta por cinza volante, hidróxido de sódio e silicato de sódio, em cura ambiente, teve a condutividade térmica estabelecida em 0,91W/mK (NARAYANAN; SHANMUGASUNDARAM, 2017). Os resultados foram próximos aos obtidos nesta pesquisa. A diferença pode ser atribuída às características dos precursores e dos ativadores, ou ainda, pela densidade do material. Em cimentos

geopoliméricos, a sílica, que está ligada à policondensação, é identificada como um dos parâmetros básicos que governam a variação da condutividade térmica (KAMSEU *et al.*, 2012).

4.3.10 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado aos 45 dias de idade, e os resultados obtidos para a argamassa de referência e para a argamassa geopolimérica R690T50S estão representados nas Figuras 73 e 74 e apresentados nas Tabelas 31 e 32.

Figura 73 – Ruptura dos corpos de prova da argamassa de referência



0 25 50mm

Fonte: A Autora (2020)

Figura 74 - Ruptura dos corpos de prova da argamassa R690T50S



0 25 50mm

Fonte: A Autora (2020)

Tabela 31 - Resultado do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa de referência

Corpo de Prova			Local do ensaio		Carga de Ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Forma de ruptura	Profundidade de ruptura (mm)
Nº	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Bloco	Junta				
1	49	1885,74		X	790	0,42	D (chapisco/argamassa)	23
2	49	1885,74	X		420	> 0,22	A (no substrato)	23
3	49	1885,74	X		300	> 0,16	A (no substrato)	19
4	49	1885,74			290	> 0,15	A (no substrato)	20
5	49	1885,74	X		440	> 0,23	A (no substrato)	22
6	49	1885,74	X		370	> 0,20	A (no substrato)	18
7	49	1885,74	X		410	> 0,22	A (no substrato)	20
8	49	1885,74		X	440	> 0,23	E (na argamassa)	10
9	49	1885,74	X		450	> 0,24	A (no substrato)	20
10	49	1885,74	X		420	> 0,22	A (no substrato)	20
11	49	1885,74		X	560	> 0,30	A (no substrato)	19
12	49	1885,74	X		370	> 0,20	A (no substrato)	19

Média Tensão de Ruptura = $0,23 \pm 0,07$ MPaUmidade média do revestimento = $3,21 \pm 0,77$ %

Fonte: A Autora (2020)

Tabela 32 - Resultado do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa R690T50S

Corpo de Prova			Local do ensaio		Carga de Ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Forma de ruptura	Profundidade de ruptura (mm)
Nº	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Bloco	Junta				
1	49	1885,74		X	810	> 0,43	E (superfície da argamassa)	22
2	49	1885,74		X	320	> 0,17	A (no substrato)	1
3	49	1885,74	X		300	> 0,16	A (no substrato)	20
4	49	1885,74	X		570	> 0,30	A (no substrato)	21
5	49	1885,74		X	350	> 0,19	A (no substrato)	20
6	49	1885,74		X	510	0,27	D (chapisco/argamassa)	18
7	49	1885,74	X		360	> 0,19	A (no substrato)	19
8	49	1885,74			310	> 0,16	E (superfície da argamassa)	1
9	49	1885,74			540	> 0,29	E (superfície da argamassa)	1
10	49	1885,74			310	> 0,16	A (no substrato)	1
11	49	1885,74	X		910	0,48	D (chapisco/argamassa)	15
12	49	1885,74			730	> 0,39	E (superfície da argamassa)	1

Média Tensão de Ruptura = $0,27 \pm 0,11$ MPaUmidade média do revestimento = $3,19 \pm 0,75$ %

Fonte: A Autora (2020)

Relacionando a média das duas argamassas, a argamassa geopolimérica alcançou melhores resultados, $0,27 \pm 0,11$ MPa, enquanto que, a argamassa de referência atingiu valores de $0,23 \pm 0,07$ MPa. Analisando de forma geral, as duas

argamassas podem ser utilizadas como argamassa de revestimento interno (acima de 0,20 MPa), e a substituição do CP por CG tem um efeito positivo nos resultados de aderência à tração.

Conforme a NBR 13749 (ABNT, 2013), quando a ruptura ocorrer na interface substrato/chapisco (Tipo B) e chapisco/argamassa (Tipo D), o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio. E quando a ruptura ocorrer no substrato (Tipo A), no chapisco (Tipo C), na argamassa (Tipo E) e na interface argamassa/cola (Tipo F) o valor da resistência é maior que o valor obtido pois não determina ruptura nas camadas da argamassa. O revestimento é considerado satisfatório quando, dos 12 corpos de prova ensaiados, ao menos 8 obtenham valores iguais ou superiores à 0,20 MPa.

Na argamassa de referência, apenas 2 corpos de prova apresentarem resultados inferiores à 0,20 MPa, entretanto, como as rupturas ocorreram no substrato, o valor de resistência de aderência é maior que o resultado obtido. Já na argamassa geopolimérica R690T50S, 6 corpos de prova atingiram o valor de norma, igual ou acima de 0,20 MPa (conforme norma citada acima). Todavia, como os outros 6 corpos de prova que não atingiram o valor romperam ou no substrato ou na argamassa, o valor de resistência é também maior que o obtido.

Analisando as formas de ruptura, é possível indicar que a argamassa de referência possui maior resistência de aderência. A maior parte dos corpos de prova romperam no substrato, sinalizando que a argamassa possui elevada resistência de aderência, pois a ruptura aconteceu na peça cerâmica, e não na interface argamassa/chapisco.

Dois fatos foram observados durante o preparo e a realização dos ensaios. Primeiro, no dia da aplicação da argamassa na parede, quando comparada à argamassa de referência, a argamassa R690T50S era uma argamassa mais difícil de espalhar, seca, com maior desperdício de massa. Já no dia da realização do ensaio de aderência, após a cura, a R690T50S estava pulverulenta em algumas partes, era possível sentir os grãos sobressaindo da parede. Fato que pode ser identificado nos resultados do ensaio, onde alguns corpos de prova tiveram ruptura na argamassa (superfície).

Os resultados encontrados para a argamassa R690T50S ainda apontam a necessidade de otimizar a mistura e realizar mais ensaios. A quantidade de cal e/ou

de água inseridas podem estar relacionadas aos resultados obtidos na resistência de aderência à tração, do mesmo modo que afetou outros ensaios desta pesquisa.

Conforme observado nos ensaios de tempo de pega, o endurecimento da pasta não foi simultâneo, podendo ser um indicativo de que a reação química não ocorreu de forma igualitária em toda a pasta, ou seja, algumas partes podem ter atingido maior resistência à aderência que outras partes.

“Melhorias tanto na extensão como no valor da resistência de aderência podem ser obtidas pela adição de pequenas porções de cal às argamassas de cimento Portland” (CARASEK, 2007, p.890). O mesmo tende a ocorrer com argamassas geopoliméricas, onde a cal tem o propósito de melhorar as propriedades de aderência (NATH; SARKER, 2017). Em argamassas de CP e CG, o cálcio reage e forma os géis C-S-H e C-A-S-H, que contribuem para o desenvolvimento da resistência das argamassas (PANGDAENG *et al.*, 2014).

5 CONCLUSÕES

A utilização de cimento geopolimérico em substituição parcial ao cimento Portland apresentou resultados promissores em relação às propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

A inclusão do cimento geopolimérico não alterou a consistência das argamassas, apresentando resultados compatíveis com os exigidos em normas, desde que, atente-se à quantidade de agregado/cimento e água/cimento. Argamassas com 10% de cimento geopolimérico e relação A/C de 6,11, 6,90 e 7,69 tiveram o índice de consistência em $336,0 \pm 5,3$ mm, $273,3 \pm 18,9$ mm, $265,0 \pm 5,0$ mm, respectivamente. Enquanto que, argamassas com diferentes teores de substituição, 10, 30 e 50%, e a mesma relação A/C de 6,11, tiveram índice de consistência de $336,0 \pm 5,3$ mm, $325,0 \pm 5,0$ mm, e $335,0 \pm 10,0$ mm, respectivamente.

Em relação à resistência à compressão, houve uma melhora nos resultados conforme se aumentava o teor de substituição parcial do cimento Portland pelo cimento Geopolimérico. Argamassas com relação A/C de 6,90 e teor de substituição de 10, 30 e 50%, apresentaram a resistência à compressão de $2,68 \pm 0,29$ MPa, $3,48 \pm 0,17$ MPa e $4,60 \pm 0,40$ MPa, respectivamente. Por meio do método de análise estatística, foi possível determinar o teor de substituição como o fator mais influente na resistência à compressão.

Na análise microestrutural, notou-se uma diminuição de fissuras e aumento na homogeneidade das pastas conforme o aumento do teor de substituição de 10, 30 e 50%. As análises térmicas mostraram que tanto as argamassas geopoliméricas quanto a argamassa de referência apresentaram os mesmos picos de fases cristalinas, e o mesmo padrão de perda de massa e de fases endotérmicas. Quanto ao ataque de sulfato de sódio, a argamassa com relação A/C de 6,90 e teor de substituição de 50% foi a que apresentou menor degradação.

O alto teor de cal na argamassa geopolimérica não permitiu o manuseio da argamassa antes de seu endurecimento, com um tempo de pega de apenas 45 minutos. Desta forma, a cal foi retirada da mistura, e a nova argamassa, R690T50S, apresentou tempo de pega de 3 horas e 45 minutos, viável para utilização. A argamassa geopolimérica apresentou menores valores de calor de hidratação, com uma variação total de $1,5^{\circ}\text{C}$, enquanto, a argamassa de referência variou $2,5^{\circ}\text{C}$.

Em relação à resistência à compressão e a resistência à tração na flexão, a argamassa R690T50S obteve, aos 28 dias, valores de $5,65 \pm 0,35$ MPa e 1,73 MPa, respectivamente. Os resultados obtidos para a absorção de água, índices de vazios e massa específica foram similares aos encontrados para a argamassa de cimento Portland.

A argamassa R690T50S apresentou maiores valores de variação dimensional e de massa, 114% e 110% respectivamente, quando comparada com a argamassa de referência, e teve uma baixa retenção de água, de apenas 69,93%.

Os resultados de módulo de elasticidade indicam que a argamassa R690T50S absorve melhor pequenas deformações. Entretanto, é uma argamassa que apresentou maiores valores para a condutividade térmica em comparação à argamassa de referência.

Com relação à resistência de aderência, a argamassa geopolimérica alcançou um valor de $0,27 \pm 0,11$ MPa. Mas, os resultados mostram que sua camada superficial é mais fraca quando comparada com a argamassa de referência, indicando ainda a necessidade de otimização do traço para melhorar a utilização da argamassa como argamassa de revestimento.

Os resultados da pesquisa indicam a possibilidade produzir argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cimentos Geopoliméricos, mas ainda é necessário estudar a incorporação de aditivos, da cal e da quantidade de água para atingir melhores resultados em todas as propriedades analisadas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que este trabalho auxilie em pesquisas futuras para o estudo de geopolímeros como material para aplicação em diversas áreas da construção civil. Desta forma, para aprimorar os estudos de viabilidade de aplicação das argamassas geopoliméricas como argamassas de revestimento, propõe-se como sugestões:

- Realizar estudos das propriedades no estado endurecido após a cura úmida e cura em altas temperaturas;
- Verificar os teores de adição da cal hidratada nas propriedades físicas, químicas e mecânicas.
- Avaliar as argamassas geopoliméricas em relação à resistência ao fogo e ao calor.

REFERÊNCIAS

AL-MAJIDI, Mohammed Haloob; LAMPROPOULOS, Andreas; CUNDY, Andrew; MEIKLE, Steve. Development of geopolymers mortar under ambient temperature for in situ applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 20, p. 198-211, 2016.

ALMEIDA, Cristina C. de; NOTHÉ, Cheila G. Avaliação de Compósitos Odontológicos por Análise Térmica e microscopia Eletrônica de Varredura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Vol. 19, p. 85-93. 2009.

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono. **Caderno 3**. Nota técnica Cimento. Brasília, DF. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-270**: Standard specification for mortar for unit masonry. United States, 2007.

_____. **C518**: Standard Test Method for Steady-state Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. United States, 2017.

_____. **C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. United States, 2019.

_____. **C1012**: Standard Test Method for Length Change of hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. United States, 2004.

_____. **E1876**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. United States, 2015.

Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. Cimento. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/>>. Acesso em: 22 de fev. 2019.

_____. Manual de revestimentos de argamassa. 2002? Disponível em: <<http://www.comunidade-da-construcao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>>. Acesso em: 18 de fev. 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005d.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005e.

_____. **NBR 13528:** Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações – Parte 2: métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005f.

_____. **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005g.

_____. **NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. **NBR 16967:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER, K.; ARAUJO JR., A. G. de; SILVA, C. A. da. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na_2O e Na_2SiO_3 . **Cerâmica**. Vol. 63, p. 143-151. 2017.

BARRETO, Matheus de Faria e Oliveira. **Caracterização micro-nanoestrutural e química de argamassas de cimento Portland**. 2014. 248f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232. Vol. 1. 2011.

BAUER, Elton. Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. Brasília: LEM-UnB/Sinduscon-DF. 2005. Disponível em: <<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/123/anexo/revesar.pdf>>. Acesso em: 20 de nov. 2018

BIGNO, Izabella Castro. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. 2008. 280f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BIGNO, I.C.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, F. J. da; THAUMATURGO, C. Calor de reação de cimentos geopoliméricos. **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. São Pedro, SP. 2005.

BRAGA, Ataulpa A.C.; MORGON, Nelson H. Descrições estruturais cristalinas de zeólitos. **Química Nova**. Vol. 30, p. 178-188, 2007.

BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A. Estatística básica. 6. ed. São Paulo : Saraiva, 2010.

BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Universidade Estadual de Campinas, 2005. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/%7Esergio1/pos-graduacao/IM317/apostila.pdf>>. Acesso em: 05 de mar. 2020.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA. Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 893-941. Vol. 5. 2007.

CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; MELO, Luciane. Cimento – Panoramas Setoriais: Mudanças Climáticas. 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7207/1/Cimento_P.pdf>. Acesso em: 08 de abr. 2019

CIMENTO ORG. Cimento.Org - O mundo do cimento. 2013. Disponível em: <<https://cimento.org/cimento-no-brasil/>>. Acesso em: 10 de abr. 2019

CHI, Maochieh; HUANG, Ran. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. **Construction and Building Materials**. Vol. 40, p. 291-298. 2013.

CINTRA, C.L.D.; PAIVA, A.E.M.; BALDO, J.B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus – Propriedades relevantes. **Cerâmica**. Vol. 60, p. 69-76, 2014.

Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Santa Catarina – CREA-SC. Concreto com sustentabilidade. 2013. Disponível em: <<http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalle&id=2660#.XLCBWNh7mpo>>. Acesso em: 12 de abr. 2019

COSSOLINI, Leiliane Cristina; PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Módulos elásticos: visão geral e métodos da caracterização. **Informativo Técnico-Científico**, ITC-ME/ATCP, 2010. Disponível em: <<https://sonelastic.com/pt/fundamentos/bases/modulos-elasticos.html>>. Acesso em: 29 de abr. 2019.

COSTA, Eugênio Bastos da; NOBRE, Thiago Ricardo Santos; GUERREIRO, Agenara Quatrin; MANCIO, Mauricio; KIRCHHEIM, Ana Paula. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**. Vol. 13, p. 75-86, 2013.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições Minerais. In. ISAIA. Geraldo Cechella. Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232. Vol. 1. 2011.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Properties. Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France. 1988

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, Joseph. Properties of Geopolymer Cements. In.: First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev, Ukraine. p. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Cement review. In.: Geopolymer Science and technics. Technical Paper. **Geopolymer Institute Library**. Vol. 21, p. 1-11. 2013.

DAVIDOVITS, J. False values on CO2 emission for geopolymer cement/concrete. Technical Paper. **Geopolymer Institute Library**. Vol. 24, p. 1-9. 2015.

DEMBOVSKA, Laura; BAJARE, Diana; DUCMAN, Vilma; KORAT, Lidija; BUMANIS, Girts. The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials. **Construction and Building Materials**. Vol. 135, p. 315-322. 2017.

DEVORE, Jay L.; [Tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva]. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DIÓGENES, Afrânia Gadelha. **Estudo do comportamento de argamassas de revestimento com areia de britagem da região metropolitana de fortaleza**. 2016. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.

DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A.; WEIL, M. The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. **Journal of Materials Science**. Vol. 42, p. 3033–3043. 2007.

DUXSON, P.; JIMÉNEZ, A. Fernández; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; DEVENTER, J. S. J. Van. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**. Vol. 42, p. 2917-2933. 2007.

EFFTING, C. **Desenvolvimento de revestimentos cerâmicos confortáveis termicamente**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

ELYAMANY, Hafez E. ; ELMOATY, Abd Elmoaty M.Abd ; ELSHABOURY, Ahmed M. Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**. Vol. 184, p. 111-127, 2018.

ERDOGAN, S.T. Properties of ground perlite geopolymer mortars. **Journal of Materials Civil Engineering**. Vol. 27, p. 1-10, 2015.

FAN, Fenghong; LIU, Zhen; XU, Guoji; PENG, Hui; CAI C.S. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**. Vol. 160, p. 66-81, 2018

FENG, Dingwu; PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie s. J. Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers. **Journal of the American Ceramic Society**. Vol.95, p. 565–572, 2012.

FRANÇA, Fernando Cesar Coelho; DIAS, Dylmar Penteado; GARCIA, Sergio Luiz González; ROCHA, Thais da Silva. Vigas de concreto reparadas com argamassa geopolimérica. **Matéria**. Vol. 23, n.3, 2018.

FREITAS JR, José de Almeida. Materiais de Construção – A estrutura do concreto. 2013. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/3/36/TC030_EstrutIntern_x.pdf>. Acesso em: 14 de abr. 2019

FRICAL. Fricol – a melhor cal. Cal hidratada CH-III. Disponível em:< http://calfrical.com.br/index.php?id=Cal_Hidratada_CHIII>. Acesso em: 30 de abr. 2019.

FONGANG, R.T.T.; PEMNDJE, J.; LEMOUGNA, P.N.; CHINJEMELO, U.; NANSEU, C.P.; NAIT-ALI, B.; KAMSEU, E.; LEONELLI, C. Cleaner production of the lightweight insulating composites: Microstructure, pore network and thermal conductivity. *Energy and Buildings*. Vol. 107, p. 113-122. 2015.

FUKUDA, Isa Martins; PINTO, Camila Francini Fidelis; MOREIRA, Camila dos Santos; SAVIANO, Alessandro Moraes; LOURENÇO, Felipe Rebello. Design of Experiments (DoE) applied to Pharmaceutical and Analytical Quality by Design (QbD). *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. Vol.54. 2018.

Geo-Pol – GEO-POL. Cimento Geopolimérico. Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br/>>. Acesso em 15 de abr. 2019

GEOPOLYMER. Geopolymer Institute. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org>> Acesso em: 15 de abr. 2019.

GIANNOPOULOU, Ioanna; PANIAS, Dimitrios. Geopolymers: a new generation of inorganic polymeric novel materials. In: **First International Conference on Advances in Mineral resources management and environmental geotechnology**. p. 407-412. 2004.

GOMES, Maria Idália; GONÇALVES, Teresa Diaz; FARIA, Paulina. Evaluación de la influencia del contenido de agua em la trabajabilidad del mortero de tierra. **Apuntes**. Vol. 25, p. 258-277, 2012.

GONÇALVES, Dayana Keitty Carmo. **Síntese e Caracterização de cimentos geopoliméricos comerciais**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016..

GOUVEIA, João Carlos Mateus. **Degradação do betão por fenómenos de carbonatação: consequências nas armaduras das edificações após anos 50 na cidade Lisboa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2010.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002.

HARDJITO, D.; RANGAN, B.V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report GC 1. Faculty of Engineering. Curtin University of Technology. 2005. 103 páginas.

HASNAOUI, Abdelaziz; GHORBEL, Elhem; WARDEH, George. Optimization approach of granulated blast furnace slag and metakaolin based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**. Vol. 198, p. 10-26. 2019.

HOSAN, Anwar; HAQUE, Sharany; SHAIKH, Faiz. Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. **Journal of Building Engineering**. Vol. 8, p.123-130. 2016.

HUSEIEN, G.F.; MIRZA, J.; ISMAIL, M.; HUSSIN, M.W. 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**. Vol. 125, p.1229-1240, 2016.

HUYNH, Trong-Phuoc. VO, Duy-Hai. HWANG, Chao-Lung. Engineering and durability properties of eco-friendly mortar using cement-free SRF binder. **Construction and Building Materials**. Vol. 160, p. 145-155, 2018

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Informação ao consumidor: Cal hidratada, 2004. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/calHidratada.asp>>. Acesso em: 25 de abr. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8301**: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus. United States, 2014.

ISLAM, A.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M.k.; BASHAR, I.I., 2014. The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. **Materials and Design**. Vol. 56, p.833-841, 2014.

ISMAIL, M.; YUSUF, T.O.; NORUZMAN, A.H.; HASSAN, I.O. Early strength characteristics of palm oil fuel ash and metakaolin blended geopolymer mortar. **Advanced Materials Research**. Vol. 690–693, p. 1045-1048, 2013.

ISOVER. Isover Saint-Gobain. Disponível em: <<https://www.isover.com.br>>. Acesso em: 13 abr. 2019

ITAMBÉ. Cimento Itambé. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br>>. Acesso em: 13 abr. 2019.

ITAMBÉ. Carbonatação do concreto. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/carbonatacao-do-concreto/>>. Acesso em: 28 de abr. 2019.

IZZAT, A.M.; BAKRI, A.M.M.; KAMARUDIN, H.; MOGA, L.M.; RUZAIDI, G.C.M.; FAHEEM, M.T.M.; SANDU, A.V. Microstructural analysis of geopolymer and ordinary Portland cement mortar exposed to sulfuric acid. **Mater Plast**. Vol. 50, p. 171-174, 2013.

JOHN, Vanderley Moacir; CINCOTTO, Maria Alba; GOMES DA SILVA, Maristela. Cinzas e Aglomerantes Alternativos. In. FREIRE, Wesley Jorge; BERALDO, Antonio Ludovico. **Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção**. 3. ed. Campinas, SP: UNICAMP, 2003.

JUMRAT, S.; CHATVEERA, B.; RATTANADECHO, P. Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 38, p. 242-248, 2011.

KABIR, S.M.A.; ALENGARAM, U.J.; JUMAAT, M.Z.; SHARMIN, A.; ISLAM, A. Influence of molarity and chemical composition on the development of compressive strength in POFA based geopolymer mortar. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol.2015, p.1-15, 2015.

KAMSEU, E.; NAIT-ALI, B.; BIGNOZZI, M.C.; LEONELLI, C.; ROSSIGNOL, S.; SMITH, D.S. Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements. **Journal of the European Ceramic Society**. Vol.32, p. 1593-1603. 2012.

KEN, Part Wei; RAMLI, Mahyuddin; BAN, Cheah Chee. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products.

Construction and Building Materials. Construction and Building Materials. Vol. 77, p.370-395, 2015.

KRETZER, Manuela Bazzani; SCHWAAB, Samoel; EFFTING, Carmeane; CORREIA, Sivaldo Leite. Modelagem de propriedades de argamassas contendo geopolímero em substituição parcial ao cimento Portland. **Anais do 63º Congresso Brasileiro de Cerâmica.** Bonito, MS. 2019. p. 840-849.

KWASNY, Jacek; SOUTSOS, Marios N.; MCINTOSH, John A.; CLELAND, David J. Comparison of the effect of mix proportion parameters on behaviour of geopolymer and Portland cement mortars. **Construction and Building Materials.** Vol. 187, p. 635-651, 2018.

LASKAR, S.M.; TALUKDAR, S. Development of ultrafine slag-based geopolymer mortar for use as repairing mortar. **J Mater Civ Eng.** Vol. 29, p. 1-11, 2017.

LUUKKONEN, Tero; ABDOLLAHNEJAD, Zahra; YLINIEMI, Juho; KINNUNEN, Paivo; ILLIKAINEN, Mirja. One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research.** Vol. 103, p. 21-34, 2018.

MALKAWI, A.B.; NURUDDIN, M.F.; FAUZI, A.; ALMATTARNEH, H.; MOHAMMED, B.S. Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. **Procedia Engineering.** Vol. 148, p. 710-717, 2016.

MAUÁ. Cimento Mauá. Disponível em: <<https://cimentomaua.com.br/blog/calor-de-hidratacao-do-cimento/>>. Acesso em: 19 de abr. 2019

MAURI, J.; DIAS, D.P.; CORDEIRO, G.C.; DIAS, A.A. Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. **Revista Matéria.** Vol.14, p.1039-1046, 2009.

MARMOL, I.; BALLESTER, P. CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement and Concrete Composites.** Vol. 32, p. 617-622, 2010.

MAZZA, Silvio de Cerqueira. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª ed. Editora IBRACON, São Paulo, 2014.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Estatística Aplicada e Probabilidade para engenheiros [Tradução Verônica Calado]. 4. ed. Rio de Janeiro, 2009.

MYERS, R. M., MONTGOMERY, D. C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. New York: John Wiley and Sons, 2002.

NAKAKURA, Elza Hissae; CINCOTTO, Maria Alba. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP.** Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2004.

NARAYANAN, A.; SHANMUGASUNDARAM, P. An experimental investigation on flyash-based geopolymer mortar under different curing regime for thermal analysis. **Energy Build.** Vol. 138, p. 539-545, 2017.

NATH, Pradip; SARKER, Prabir Kumar. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials.** Vol. 130, p. 22-31. 2017.

OLIVEIRA, Hélio Martins. Cimento Portland. In. BAUER, L.A. Falcão. Materiais de construção. 5.ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2005. p. 35-62. Vol.1, 2005.

PACHECO, Jéssika; BILESKY, Pedro; MORAIS, Tereza Rachel; GRANDO, Fernanda; HELENE, Paulo. Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC**, 2014. IBRACON. 14 páginas.

PAES, Isaura Nazaré Lobato. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. 2004. 265f. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil) – Universidade de Brasília, Brasília. 2004.

PANGDAENG, Saengsuree; PHOO-NGERNKHAM, Tanakorn; SATA, Vanchai; CHINDAPRASIRT, Prinya. Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. **Materials & Design.** Vol. 53, p.269-274. 2014.

PAULON, Vladimir; KIRCHHEIM, Ana Paula. Nanoestrutura e Microestrutura do concreto endurecido. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 585-614. Vol. 1. 2011.

PINTO, A.T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila real. p. 92. 2006.

POLI-USP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO₂. 2013. Disponível em: <<https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2.html>>. Acesso em: 11 de abr. 2019

POSSAN, Edna. GAVA, Giovanna Patrícia. PETRAUSKI, Sandra Couri. Estudo comparativo do desempenho de argamassas de revestimento produzidas em obra e industrializadas em diferentes substratos. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Foz do Iguaçu, Paraná. 2002.

QUARCIONI, Valdecir Ângelo; CINCOTTO, Maria Alba. Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, 6, 2005. Florianópolis, Santa Catarina. Anais...Florianópolis, 2005, p.233-250.

QUIMIDROL. Disponível em: <<https://www.quimidrol.com.br>>. Acesso em: 28 de fev. 2020

RAGO, Fabiola; CINCOTTO, Maria Alba. Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 1999.

RAMOS, Giovanni Antonio. **Cimento Geopolimérico contendo resíduo do polimento de placas cerâmicas**. 2017. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2017.

RAPHAËLLE, Pouhet; MARTIN, Cyr; RAPHAËL, Bucher. Influence of the initial water content in flash calcined metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. Vol. 201, p. 421-429. 2019.

RIABI, S.; NEMATI, A.; KHODABANDEH, A.R.; BAGHSHAHI, S. The effect of mixing molar ratios and sand particles on microstructure and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Materials Chemistry and Physics**. Vol. 240, p. 122-223. 2020.

ROMANO, R. C. O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**. São Paulo, vol.62, n.363, pp.215-223. 2016.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016.

SANTOS, E. A.; MELO, M. A. F.; MELO, D. M. A.; FREITAS, J. C. O.; MARTINELLI, A. E.; MELO, V. R. M.; MEDEIROS, R. L. B. A. Influência da adição de diatomita nas propriedades de pastas geopoliméricas: volume de filtrado, tempo de espessamento e resistência à compressão. **Cerâmica**. Vol. 61, p.309-316, 2015.

SCHACKOW, Adilson. **Efeito das características pozolânicas de rejeitos de tijolos nas propriedades de argamassas**. 2015. 287 p. Tese (Doutorado) -Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2015.

SCHWAAB, Samoel. **Desenvolvimento, caracterização e aplicação de cimentos geopoliméricos a partir de rejeitos industriais**. 2020. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. 2020.

SENGUL, Ozkan; AZIZI, Senem; KARAOSMANOGLU, Filiz; TASDEMIR, Mehmet Ali. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. **Energy and Buildings**. Vol. 43, p. 671–676. 2011.

SILVA, Narciso Gonçalves da; CAMPITELI, Vicente Coney. Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento. **2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos gerais**. 2000.

SILVA, F.J. da; OLIVEIRA, M.C. de; MACHADO, M.V.S.; DUARTE, F.P.; THAUMATURGO, C. **Cimento geopoliméricos**. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10055/>>. Acesso em: 13 de maio 2019.

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

SINGH, Sarbjeet. NAGAR, Ravindra. AGRAWAL, Vinay. RANA, Aditya. TIWARI, Anshuman. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**. Vol.116, p. 223-235, 2016.

SINGH, Jagmeet; SINGH, S. P. Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review. **Journal of Environmental Management**. Vol. 251. 2019.

SONAFRANK, GH COLE. Investigating 21Century Cement Production. **Cold Climate**. Housing Research Center (CCHRC). Alaska, p.114, 2010

SREEVIDYA, V.; ANURADHA, R.; THOMAS, T.; VENKATASUBRAMANI, R. Durability studies on fly ash geopolymer mortar under in ambient curing condition **Asian J Chem**. Vol. 25, p. 2497-2499, 2013.

STATSOFT Inc. STATISTICA Ultimate Academic, v.13.0; License Number 135-726-299. 2015. Disponível em: <<http://www.statsoft.com.br>>.

STEINEROVA, M. Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure. **Ceramics**. Vol. 55, p. 362-372, 2011.

SUPREMO. Cimento Portland Composto. Disponível em: <<http://www.supremocimento.com.br>>. Acesso em: 10 de fev. 2019.

TECNOSIL. Calor de hidratação: qual a importância para o concreto, 2017. Disponível em:<<https://www.tecnosilbr.com.br/calor-de-hidratacao-qual-a-importancia-para-o-concreto-2/>>. Acesso em: 29 de abr. 2019.

TEMUJJIN, J.; RIESSEN, A. van.; MACKENZIE, K.J.D. Preparation and characterization of fly ash based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**. Vol. 24, p. 1906-1910, 2010.

TIRONI, Alejandra; TREZZA, M.A.; IRASSAR, Edgardo Fabian; SCIAN, A.N. Thermal Treatment of Kaolin: Effect on the Pozzolanic Activity. **Procedia Materials Science**. Vol. 1, p. 343-350, 2012.

TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. Ligantes Geopoliméricos – Uma alternativa ao cimento Portland. **Ingenium**. p. 66-68, 2009.

TRISTÃO, Fernando Avancini. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 1995. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

VASCONCELOS, E.; FERNANDES, S.; AGUIAR, J.L. Barroso de.; TORGAL, F. Pacheco. Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP. **Construction and Building Materials**. Vol. 25, p. 3213-3221, 2011.

VASSALO, Érica Antunes de Souza. **Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado**. 2013. 104 f.. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

VEIGA. Mineração Veiga. Areia MF. 60/70 (argamassa). Disponível em: <<http://www.mineracaoveiga.com.br/areias/areia-mf-60-70-argamassa>>. Acesso em: 30 de abr. 2019.

WALLAH, S.E.; RANGAN, B.V. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties. Research Report GC2. Faculty of Engineering. **Curtin University of Technology**. Perth, Austrália. 107p. 2006.

WINNEFELD, Frank; LEEMANN, Andreas; LUCUK, Martin; SVOBODA, Pavel; NEUROTH, Markus. Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. **Construction and Building Materials**. Vol.24, p.1086-1093. 2010.

YAZDI, Mohammad Ali; LIEBSCHER, Marco; HEMPEL, Simone; YANG, Jian; MECHTCHERINE, Viktor. Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature. **Construction and Building Materials**. Vol. 191, p.330-341. 2018.

YIP, C.K.; LUKEY, G.C.; DEVENTER, J.S.J.van. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**. Vol. 35, p. 1688-1697. 2005.

ZHANG, Peng; ZHENG, Yuanxun; WANG, Kejin; ZHANG, Jinping. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**. Vol. 152, p. 79-95, 2018.

ZUHUA, Z.; XIAO, Y.; HUAJUN, Z.; YUE, C. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. **Applied Clay Science**. Vol.43, p. 218-223. 2009.