

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

LUIZ RICARDO WEIMANN ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA AUTONIVELANTE
GEOPOLÍMERICA**

JOINVILLE

2025

LUIZ RICARDO WEIMANN ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA AUTONIVELANTE
GEOPOLÍMERICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Prof^a. Dra. Carmeane Effting

JOINVILLE

2025

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Weimann Araujo, Luiz Ricardo
Desenvolvimento de Argamassa Autonivelante
Geopolimérica / Luiz Ricardo Weimann Araujo. -- 2025.
115 p.

Orientadora: Carmeane Effting
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2025.

1. Geopolímero. 2. Metacaulim. 3. Escória Granulada de
Alto Forno. 4. Argamassa autonivelante. I. Effting, Carmeane.
II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

LUIZ RICARDO WEIMANN ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA AUTONIVELANTE
GEOPOLÍMERICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Carmeane Effting - Orientadora

UDESC

Membros:

Dr. Adilson Schackow - CCT/UDESC

Dr. Samoel Schwaab – Membro Externo

Joinville, 27 de Fevereiro de 2025.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de argamassas autonivelantes geopoliméricas, utilizando EGAF e MC como precursores, juntamente com uma solução ativadora composta por hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino. A formulação inicial foi definida na proporção de 1:1:0,40:0,80 em massa (precursores, agregado miúdo, hidróxidos e silicato de sódio), com molaridades da solução ativadora variando entre 5M, 7,5M e 10 M. Foram avaliados por meio do ensaio de espalhamento e resistência à compressão. Foi realizada a análise de Fluorescência de Raios X (FRX) para caracterizar os precursores. As argamassas que atenderam aos critérios de espalhamento e resistência à compressão foram então submetidas a uma série de testes complementares, incluindo retenção de fluxo, tempo de regeneração, tempo de pega, parâmetros reológicos, resistência à compressão e à tração, retração linear, massa específica, índice de vazios, absorção de água e eflorescência. Observou-se que as argamassas apresentaram eflorescência e retração linear acentuada desde os primeiros dias de cura, indicando a necessidade de ajustes na formulação. Com base nos resultados obtidos, foi formulado um novo traço, com a proporção em massa 1:0,47:0,25:0,51 (precursores, agregado miúdo, hidróxidos e silicato de sódio) e a molaridade da solução ativadora em 7,5M. Esse ajuste resultou em uma melhora significativa das propriedades, especialmente na redução da eflorescência e da retração linear, além de um aumento nas resistências mecânicas. A resistência à compressão atingiu 69 MPa aos 28 dias, indicando que há também a possibilidade de aplicação em outros contextos, especialmente em reparos estruturais, como reparos em vigas, pilares, lajes e fundações. A análise da sustentabilidade das argamassas indicou que há redução de CO₂ nas argamassas geopoliméricas quando comparados ao CP, porém há aumentos substanciais das emissões de SO_x e NO_x, que podem gerar impactos ambientais adicionais, como chuva ácida e piora na qualidade do ar. A pesquisa conclui que os geopolímeros sintetizados possuem grande potencial para esta aplicação.

Palavras-chave: Geopolímero; Metacaulim; Escória Granulada de alto forno; Argamassa autonivelante.

ABSTRACT

The present study aimed to develop self-leveling geopolymeric mortars using EGAF and MC as precursors, along with an activating solution composed of Sodium Hydroxide, Potassium Hydroxide, and Alkaline Sodium Silicate. The initial formulation was defined in a mass ratio of 1:1:0.40:0.80 (precursors, fine aggregate, hydroxides, and Sodium Silicate), with the molarity of the activating solution varying between 5M, 7,5 M, and 10M. The mortars were evaluated through flow spread and compressive strength tests. X-Ray Fluorescence (XRF) analysis was performed to characterize the precursors. The mortars that met the criteria for flow spread and compressive strength were then subjected to a series of complementary tests, including flow retention, regeneration time, setting time, rheological parameters, compressive and tensile strength, linear shrinkage, specific mass, void index, water absorption, and efflorescence. It was observed that the mortars exhibited efflorescence and significant linear shrinkage from the early curing days, indicating the need for adjustments in the formulation. Based on the obtained results, a new mix design was formulated with a mass ratio of 1:0.47:0.25:0.51 (precursors, fine aggregate, hydroxides, and Sodium Silicate) and an activating solution molarity of 7,5M. This adjustment resulted in a significant improvement in properties, particularly in reducing efflorescence and linear shrinkage, as well as an increase in mechanical strengths. The compressive strength reached 69 MPa at 28 days, indicating the possibility of application in other contexts, particularly in structural repairs, such as repairs in beams, columns, slabs, and foundations. The sustainability analysis of the mortars indicated a reduction in CO₂ emissions in geopolymeric mortars compared to CP; however, there were substantial increases in SO_x and NO_x emissions, which may generate additional environmental impacts, such as acid rain and deterioration of air quality. The research concludes that the synthesized geopolymers have great potential for this application.

Keywords: Geopolymer; Metakaolin; Ground Granulated Blast Furnace Slag; Self-Leveling Mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Identificação dos ligantes cimentícios	22
Figura 2 - Fluxograma do mecanismo de geopolimerização.....	22
Figura 3 - Representação esquemática da estrutura dos geopolímeros	23
Figura 4 - Primeiro edifício residencial feito com concreto álcali ativado	24
Figura 5 - Eflorescência	26
Figura 6 - Exemplo de um sistema de piso e seus elementos	27
Figura 7 - Espalhamento em mesa em relação ao teor de aditivo	28
Figura 8 - Imagem MEV EGAF	30
Figura 9 - Imagem MEV MC.....	31
Figura 10 - Comportamento reológico de um fluido Newtoniano	37
Figura 11 - Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo	38
Figura 12 - Viscosidade dinâmica e aparente de um fluido	39
Figura 13 - Materiais com suas respectivas funções.....	40
Figura 14 – EGAF	42
Figura 15 - Hidróxido de Sódio (NaOH) em solução	43
Figura 16 - Hidróxido de Potássio (KOH) em solução 10M.....	44
Figura 17 - Fluxograma resumido	45
Figura 18 - Fases do experimento.....	49
Figura 19 - Fluxograma de preparação do geopolímero	50
Figura 20 - Frasco Volumétrico com amostras de MC e Escória	52
Figura 21 - Equipamento Analisador de tamanho de partículas.....	54
Figura 22 - Fluxograma de ensaios no estado fresco	55
Figura 23 - Ensaio do tempo de pega automático com aparelho de Vicat	57
Figura 24 - Fluxograma de ensaios no estado endurecido	59
Figura 25 - Equipamento para medição retração linear	60
Figura 26 – Distribuição granulométrica da areia	64
Figura 27 - Distribuição granulométrica do MC	65
Figura 28 - Distribuição granulométrica da EGAF	66
Figura 29 – Espalhamento	71
Figura 30 - Resistência a compressão aos 7 dias.....	72
Figura 31 - Tempo de pega das argamassas.....	75
Figura 32 - Taxa de estruturação	76

Figura 33 - Viscosidade aparente.....	77
Figura 34 - Resistência a compressão	78
Figura 35 - Corpo de prova prismático geopolimérico.....	79
Figura 36 - Resistência à Tração na flexão.....	80
Figura 37 - Retração Linear	82
Figura 38 - T1M5 Retração linear.....	83
Figura 39 - T1M6 Retração Linear	83
Figura 40 - T1M9 Retração Linear	84
Figura 41 - Perda de massa.....	85
Figura 42 - Viscosidade aparente das argamassas	91
Figura 43 - Curva de fluxo das argamassas.....	91
Figura 44 - Tensões de escoamento ajustadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.....	93
Figura 45 - Viscosidade das argamassas ajustadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.	93
Figura 46 - Resistência a tração aos 1 e 28 dias	94
Figura 47 - Resistência a compressão aos 1, 7 e 28 dias.....	94
Figura 48 - Eflorescência nos corpos de prova após 14 dias.....	97
Figura 49 - Resistência ao fogo	98
Figura 50 - Corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas.....	99
Figura 51 – Diagrama dos dois processos paralelos de ganho e perda de resistência à elevadas temperaturas.....	100
Figura 52 - Resistência ao fogo geopolímero submetido a temperatura de 1000°C	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições das argamassas realizadas	28
Tabela 2 - Composição química da EGAF	29
Tabela 3 - Composição química do MC de estudos anteriores.....	30
Tabela 4 - Composição química do MC	41
Tabela 5 – Dosagem das argamassas elaboradas	46
Tabela 6 - Relações Molares	47
Tabela 7 - Emissão média de CO ₂ , SO _x e NO _x por material	62
Tabela 8 - Resumo propriedades da areia	63
Tabela 9 - Ensaio de granulometria da areia	64
Tabela 10 - Análise química por FRX da Escória.....	67
Tabela 11 - Análise química por FRX do MC	67
Tabela 12 - Resumo das principais características das argamassas estudadas	69
Tabela 13 - Ensaio tempo de regeneração	73
Tabela 14 - Tempo de regeneração	74
Tabela 15 – Tempo de pega das argamassas	74
Tabela 16 - Análise de variância	79
Tabela 17 - Análise da variância para resistência à tração na flexão.....	80
Tabela 18 - Teste de Tukey para resistência à tração na flexão.....	81
Tabela 19 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica	85
Tabela 20 - Traços consolidados do estudo.....	87
Tabela 21 - Ensaio de espalhamento.....	88
Tabela 22 - Tempo de regeneração	89
Tabela 23 - Tempo de pega	90
Tabela 24 - Taxa de estruturação	90
Tabela 25 - Retração linear	95
Tabela 26 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água	95
Tabela 27 - Análise de variância	98
Tabela 28 - Massa específica dos materiais	101
Tabela 29 - Consumo de materiais por m ³ de argamassa geopolimérica	101
Tabela 30 - Emissão de CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)	102
Tabela 31 - Emissão de SO _x (g.SO _x /m ³)	102

Tabela 32 - Emissão de NO _x (g.SO _x /m ³)	103
Tabela 33 - Emissão de poluentes por traço de cimento	103
Tabela 34 - Emissão de poluentes consolidada	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Requisitos químicos (valores expressos em porcentagem).....	31
Quadro 2 - Requisitos físicos.....	32
Quadro 3 - Limites de resistência de aderência à tração (Ra) para emboço.	35
Quadro 4 - Especificações Hidróxido de Sódio (NaOH)	43
Quadro 5 - Composição química do Silicato de Sódio.....	44
Quadro 6 - Classificação dos agregados miúdos	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al_2O_3	Alumina
Ca	Cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio - calcita
CaO	Óxido de cálcio – cal virgem
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio – cal hidratada
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferro aluminato tetracálcico
C_2S	Silicato dicálcico
C_3S	Silicato tricálcico
Cl	Cloreto
CO_2	Dióxido de carbono - Gás carbônico
FeO	Óxido ferroso
Fe_2O_3	Óxido férrico - hematita
H_2CO_3	Ácido carbônico
H_2O	Óxido de hidrogênio
K	Potássio
K_2CO_3	Carbonato de Potássio
K_2O	Óxido de Potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
MC	Metacaulim

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
SS	Silicato de Sódio alcalino
Na ₂ SO ₄	Sulfato de Sódio
O	Oxigênio
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício - Sílica

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/L	Água / ligante
A/P	Água / precursor
A/S	Água / sólidos
CCA	Cinza da casca de arroz
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
CG	Cimento Geopolimérico
CH	Hidróxido de cálcio
CP	CP
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CV	CV
CZP	Cinza pesada
DOE	Design of Experiments
EGAF	EGAF
MC	MC
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
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
pH	Potencial hidrogeniônico
SS	Silicato de Sódio
µm	Micrometro
W/C	Relação água/cimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1.	JUSTIFICATIVA	19
1.2.	OBJETIVOS	20
1.2.1.	Objetivo Geral.....	20
1.2.2.	Objetivos Específicos	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1.	GEOPOLÍMEROS	21
2.1.1.	Aplicações de concreto geopolimérico.....	24
2.1.2.	Limitações e desafios	25
2.2.	ARGAMASSA AUTONIVELANTE	26
2.2.1.	Estudo desenvolvido com geopolímeros.....	27
2.2.2.	Precursors	29
2.2.3.	Propriedades físicas e mecânicas	33
2.3.	REOLOGIA.....	36
2.3.1.	Modelos reológicos.....	37
3	METODOLOGIA	40
3.1.	MATERIAIS UTILIZADOS	40
3.1.1.	Metacaulim.....	40
3.1.2.	Escória Granulada de alto forno	41
3.1.3.	Areia	42
3.1.4.	Ativadores Alcalinos.....	42
3.2.	DOSAGEM DO TRAÇO INICIAL.....	45
3.3.	SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS	48
3.4.	PREPARAÇÃO DO GEOPOLÍMERO	49
3.5.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	50
3.5.1.	Determinação da massa específica e massa unitária da areia.....	50
3.5.2.	Determinação da massa específica EGAF e MC.....	51
3.5.3.	Análise granulométrica da areia	52
3.5.4.	Granulometria a laser.....	53
3.5.5.	Caracterização Química por Fluorescência de Raios X (FRX)	54
3.6.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	55
3.6.1.	Ensaios no estado fresco	55
3.6.2.	Ensaios no estado endurecido	59

3.7.	EFEITOS DE ALTAS TEMPERATURAS NO GEOPOLÍMERO	61
3.8.	SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1.	Caracterização dos materiais	63
4.1.1.	Caracterização da areia	63
4.1.2.	Caracterização dos precursores	65
4.2.	FASE 1 – DOSAGEM DAS ARGAMASSAS TRAÇO T1	68
4.3.	FASE 2 – ARGAMASSAS SELECIONADAS TRAÇO T1.....	72
4.3.1.	Retenção de fluxo e tempo de regeneração	72
4.3.2.	Tempo de pega	74
4.3.3.	Reologia	75
4.3.4.	Resistência à compressão	77
4.3.5.	Resistência a tração na flexão	79
4.3.6.	Retração linear	81
4.3.7.	Massa específica, índice de vazios e absorção de água	85
4.4.	FASE 3 – TRAÇO ALTERNATIVO T2.....	86
4.4.1.	Fluidez inicial.....	88
4.4.2.	Retenção de fluxo e tempo de regeneração	89
4.4.3.	Tempo de pega	89
4.4.4.	Reologia	90
4.4.5.	Resistências a compressão e a tração.....	94
4.4.6.	Retração linear	95
4.4.7.	Massa específica, índice de vazios e absorção de água	95
4.4.8.	Eflorescência	96
4.5.	FASE 4 – RESISTÊNCIA À ALTAS TEMPERATURAS	98
4.5.1.	Resistência ao fogo.....	98
4.6.	SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS	101
5	CONCLUSÕES.....	105
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS		107

1 INTRODUÇÃO

A classe de materiais álcali-ativados é produzida a partir da ativação alcalina de classes de ligantes subdivididos de acordo com sua composição química: ricos em cálcio e os ricos em aluminossilicatos, o qual faz parte a classe dos geopolímeros (Marvila *et al.*, 2021). O material geopolimérico é uma alternativa amplamente estudada para substituição do CP em determinadas situações: seja pela melhora das características físico-químicas ou pela possibilidade de redução das emissões de dióxido de Carbono (CO_2), visto que sua produção não exige calcinação à altas temperaturas (Davidovits, 2002).

À medida que a demanda de concreto vem aumentando, a produção mundial de cimento aumentou consideravelmente nas últimas três décadas. Estima-se que a indústria cimenteira seja responsável entre 5% e 8% de todas as emissões de CO_2 . Aproximadamente 0,9 toneladas de CO_2 podem ser emitidas para a atmosfera, quando uma tonelada de CP é produzida (Andrew, 2018). A produção dos geopolímeros não necessita da utilização de CP, sendo constituído por materiais ricos em aluminossilicatos (os mais utilizados são as cinzas volantes, metacaulim e a escória granulada de alto forno) e uma fonte de solução alcalina hidróxido de sódio (NaOH) e/ou potássio (KOH), que pode dificultar a produção deste material nos canteiros de obras.

Os geopolímeros trazem também a possibilidade do reaproveitamento de resíduos ou subprodutos industriais, que seriam descartados ou lançados à natureza, para a produção de cimentos de menor impacto ambiental, comparativamente ao processo de produção do CP (Vargas *et al.*, 2015). São obtidos pela policondensação em meio alcalino, desde que observados critérios de escolha dos materiais precursores, parâmetros de dosagem e condições de cura (Livi; Repette, 2015). Nas devidas proporções entre os aluminossilicatos e ativadores poderá ser conseguida uma policondensação eficiente dos aluminossilicatos, obtendo desta forma um material sólido com propriedades mecânicas interessantes para a construção civil (Vargas *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a produção de argamassa autonivelante convencional demanda grande quantidade de cimento (25 à 45% da massa total), sendo a substituição por argamassa autonivelante geopolimérica uma alternativa que possa

agregar ao desenvolvimento sustentável. As argamassas autonivelantes são produzidas com grande fluidez sendo capazes de nivelar a superfície pela ação do seu peso próprio, sem requerer nenhuma energia de compactação. São argamassas com baixa viscosidade, aplicadas em camadas finas de 1-10mm para produzir um substrato liso e uniforme, sobre o qual pode ser aplicado um revestimento final (De Gasparo *et al.*, 2009). As principais propriedades requeridas são: alta fluidez; estabilidade dimensional; resistência a segregação e exsudação; capacidade autonivelante e resistência de adesão ao substrato.

O estudo das propriedades no estado fresco é de suma importância para a formulação da argamassa autonivelante, assim avaliar a reologia permite que se otimize as características do material no estado fresco, avaliando-se os principais parâmetros reológicos: viscosidade plástica e tensão de escoamento. Diante do contexto, este trabalho destina-se ao estudo de desenvolvimento de argamassas geopoliméricas autonivelantes produzidas a partir dos precursores MC e EGAF, utilizando-se solução composta de hidróxido de sódio (NaOH), potássio (KOH) e silicato de sódio alcalino (SS), avaliando-se o seu comportamento reológico.

1.1. JUSTIFICATIVA

A revisão da literatura revelou uma lacuna significativa de pesquisa em relação à aplicação específica do geopolímero discutida neste estudo. Embora os geopolímeros tenham sido amplamente estudados, a maioria das pesquisas existentes foca predominantemente em seu uso no concreto geopolímérico. Isso destaca a oportunidade de pesquisa sobre aplicações alternativas dos materiais geopoliméricos, o que poderia revelar seu potencial e contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis.

Além disso, a produção de argamassa autonivelante demanda uma grande quantidade de cimento, um dos materiais de construção com maior impacto ambiental devido às emissões significativas de CO₂ associadas ao alto consumo de CP. O presente estudo evidencia a necessidade e a oportunidade de validar o uso de materiais mais sustentáveis para essa aplicação. A utilização de geopolímeros surge como uma alternativa promissora, pois, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, aproveita subprodutos industriais, como a escória de alto-forno. A utilização não apenas minimiza os impactos ambientais, mas também tem o potencial

de oferecer desempenho técnico equivalente ou superior, atendendo aos requisitos de resistência, fluidez e durabilidade exigidos para argamassas autonivelantes.

A avaliação da sustentabilidade das argamassas permitirá confirmar a premissa estabelecida por diversos estudos sobre o tema, que defendem a viabilidade sustentável dessas composições. Essa análise será fundamental para verificar não apenas a redução das emissões de CO₂ em comparação aos materiais tradicionais, como o CP, mas também para identificar possíveis impactos ambientais adicionais, obtidos na calcinação dos materiais e fabricação dos ativadores: as emissões de SO_x e NO_x que muitas vezes são negligenciadas em outros estudos. Portanto o estudo objetiva quantificar o real impacto ambiental das argamassas geopoliméricas e suas aplicações, reforçando ou ajustando a premissa de sustentabilidade associada a elas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de argamassa autonivelante geopolimérica a partir da ativação alcalina do metacaulim e da escória granulada de alto forno em solução de hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar a concentração molar e mássica adequada de hidróxido de sódio (NaOH) e de hidróxido de potássio (KOH) da argamassa geopolimérica;
- b) Caracterizar física, químico e morfologicamente o metacaulim e a escória granulada de alto forno;
- c) Otimização das dosagens de argamassas autonivelantes, proporcionando fluidez para se autonivelar sem que ocorra exsudação e segregação;
- d) Caracterizar o comportamento reológico e a evolução da hidratação das argamassas autonivelantes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão abordados os conceitos relacionados a geopolímeros, suas limitações e seus desafios. Na sequência será apresentado a argamassa autonivelante, seus componentes, requisitos e propriedades. Também será conceituado o comportamento reológico e os ensaios utilizados para conduzir esse estudo.

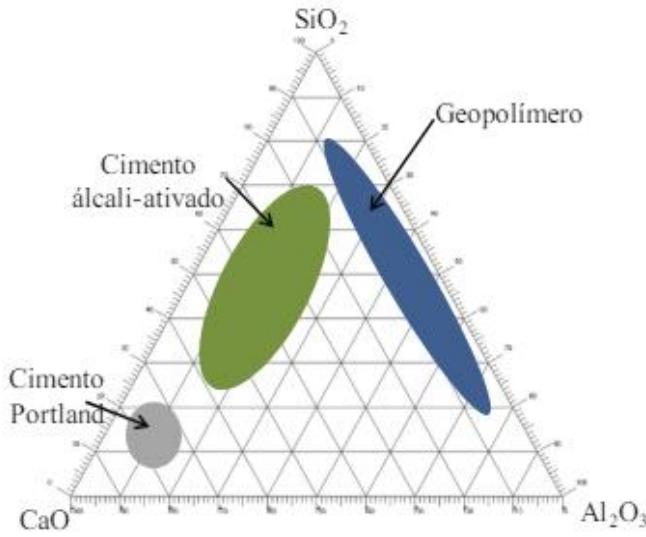
2.1. GEOPOLÍMEROS

O surgimento dos geopolímeros é atribuído ao pesquisador Joseph Davidovits, na França, que motivado pelos incêndios ocorridos na década de 70, tinha como objetivo desenvolver um material que pudesse resistir melhor ao calor (Davidovits, 1991). Davidovits então produziu um material que dependesse de um meio altamente alcalino com presença de aluminossilicatos, gerando um novo aglomerante que não havia sido utilizado anteriormente (Davidovits, 1991).

Os geopolímeros são formados basicamente de dois componentes: aluminossilicato mineral (conhecido como precursor) e uma solução altamente alcalina (Shi *et al.*, 2011). O papel principal do ativador é promover a dissolução dos óxidos (Si e Al) do precursor. Podem ser sintetizados a partir de uma grande variedade de precursores geralmente descartados da indústria, tal como a CV (Ye *et al.*, 2014). Contudo, devido ao consumo dos materiais suplementares pela indústria de CP, um promissor precursor é obtido pela calcinação da argila, o MC, um dos materiais mais utilizados para a tecnologia de geopolímeros, devido a sua pureza e grande reatividade (Shilar *et al.*, 2023).

Lecomte *et al.* (2006) afirmam que o termo “ligante álcali-ativado” é normalmente empregado para se referir aos sistemas ricos em CaO, enquanto o termo “geopolímero” é utilizado para os sistemas com predominância de SiO₂ e Al₂O₃ e baixo teor de CaO. O diagrama ternário da Figura 1 apresenta uma classificação dos ligantes cimentícios, de acordo com seu conteúdo de CaO, Al₂O₃ e SiO₂.

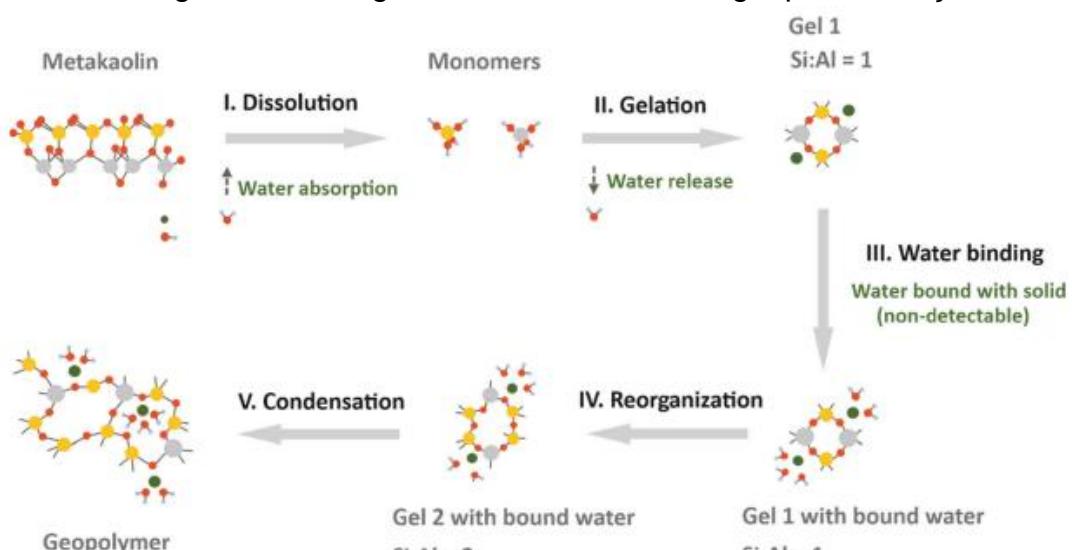
Figura 1 - Identificação dos ligantes cimentícios



Fonte: Zhang *et al.* (2020)

O processo de síntese dos geopolímeros é denominado de geopolimerização, processo pelo qual é formada uma matriz tridimensional de aluminossilicatos, resultantes da condensação da alumina e sílica em ambiente de elevado PH e temperatura ambiente. O material formado é caracterizado pelas altas resistências mecânicas e estabilidade em altas temperaturas (Mackenzie, 2012). O gel aluminossilicato formado é relativamente resistente à quebra em solução e forma a fase ligante do geopolímero (Shilar *et al.*, 2023). Na Figura 2 é apresentado o fluxograma do mecanismo de geopolimerização.

Figura 2 - Fluxograma do mecanismo de geopolimerização



Fonte: Li *et al.* (2022)

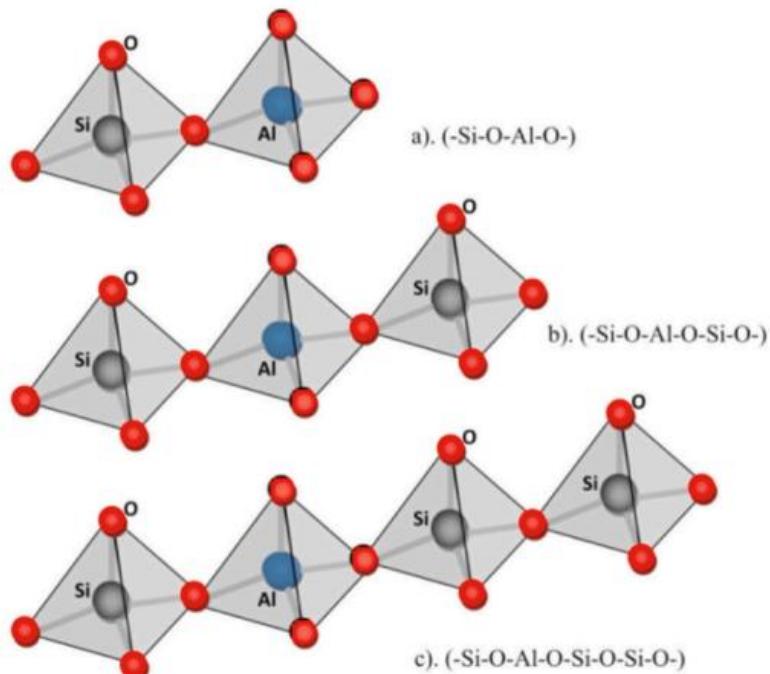
O processo de geopolimerização ocorre por meio de uma reação química que produz ligações poliméricas de átomos de silício (Si), oxigênio (O) e alumínio (Al), também chamados de sílico-óxido-aluminato (sialato), conforme a equação 1, fórmula empírica dos geopolímeros (Geo-Pol, 2019).



Onde, “M” é o elemento alcalino (Na^+ , K^+ ou Ca^{2+}), “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.

Sua nomenclatura é designada conforme a razão de Si/Al: Polissialato ou sialato (-Si-O-Al-O-), Polissiloxossalato (-Si-O-Al-O-Si-O-), e Polidissiloxossalato (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-), conforme representação na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Representação esquemática da estrutura dos geopolímeros



Fonte: Jiang *et al.* (2024)

Os geopolímeros podem ser sintetizados por uma grande variedade de materiais aluminossilicatos, geralmente o MC e um ativador tal como o hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio alcalino (SS).

2.1.1. Aplicações de concreto geopolimérico

O desenvolvimento dos geopolímeros iniciou-se na Ucrânia, no final da década de 50, quando o cientista Ucraniano Glukhovsky descobriu a possibilidade de produzir ligantes utilizando aluminossilicatos e soluções de metais alcalinos, denominando o ligante de solo cimento e foi utilizado em Mariupol, Ucrânia, nos anos 1960 (Xu *et al.*, 2008).

O primeiro edifício residencial feito de materiais álcali ativados foi construído na Rússia em 1989. A edificação possui 20 andares e utilizou como precursor a EGAF ativada com hidróxido de sódio (NaOH) (Almutairi *et al.*, 2021). A Figura 4 apresenta a foto do edifício.

Figura 4 - Primeiro edifício residencial feito com concreto álcali ativado



Fonte: Xu *et al.* (2008)

Os geopolímeros apresentam aplicações mais avançadas em obras pré-moldadas, visto a série de requisitos e cuidados para o manuseio de materiais perigosos e o ambiente de cura controlado em alta temperatura, que melhora a resistência físico-química do material. Como resultado, as primeiras aplicações do concreto geopolimérico foram em tubulações de esgoto. A alta durabilidade do

material em ambientes agressivos é característica desejada para a produção de tubos, muitas vezes enterrados em solos agressivos (Almutairi *et al.*, 2021).

O concreto geopolimérico possui alta resistência aos cloretos, portanto pode ser utilizado em estruturas de concreto como pontes, cais e outras aplicações sujeitas à água salgada, propiciando maior durabilidade às estruturas (Almutairi *et al.*, 2021). O geopolímeros se destacam por sua alta resistência mecânica, resistência ao gelo-degelo, elevada inércia química e comportamento ao fogo (Pinto, 2006).

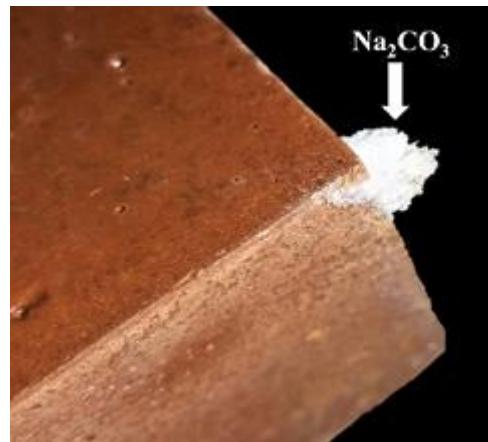
2.1.2. Limitações e desafios

A necessidade de cura térmica e a utilização de ativadores alcalinos são as maiores limitações para aplicação dos geopolímeros. A variabilidade de acordo com a fonte e o tipo de produção dos precursores resultam em variação das propriedades físicas e químicas, dificultando a sistematização da dosagem dos ativadores (Mehta; Siddique, 2016).

Apesar da utilização de precursores que sejam resíduos industriais ou matérias-primas com baixo custo, as soluções alcalinas com a utilização dos ativadores químicos encarecem a sua produção. Associado também às soluções alcalinas, há risco de saúde no seu manuseio devido à sua elevada alcalinidade e também durante a mistura e aplicação dos geopolímeros, evidenciando a necessidade da padronização de métodos seguros de dosagem e equipamentos próprios para manuseio deste material (Aleem; Arumairaj, 2012).

As principais limitações, características nos ligantes álcali-ativados, são a formação de eflorescências e a retração ao longo do tempo. A eflorescência é um fenômeno que consiste no depósito de sal na superfície de um material poroso, geralmente promovido pela reação do cátion Na^+ lixiviado, com o dióxido de carbono da atmosfera, resultado no carbonato de Sódio (Provis; Bernal, 2014). A Figura 5 apresenta a eflorescência na superfície geopolimérica.

Figura 5 - Eflorescência



Fonte: Santana *et al.* (2020)

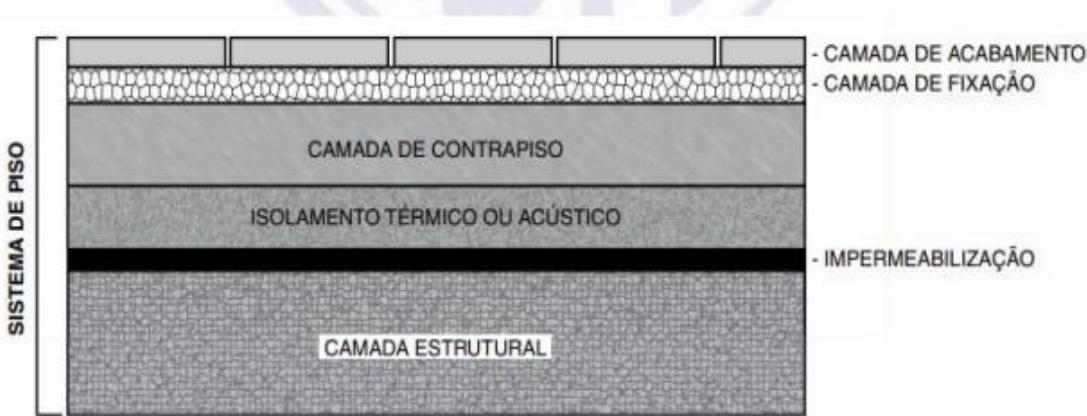
A eflorescência é geralmente associada a microestrutura porosa da matriz geopolimérica e a fraca ligação do sódio na estrutura da matriz (Ribeiro, 2021).

2.2. ARGAMASSA AUTONIVELANTE

As argamassas autonivelantes são produzidas com grande fluidez sendo capazes de nivelar a superfície pela ação do seu peso próprio, sem requerer nenhuma energia de compactação (De Gasparo *et al.*, 2009). São argamassas com baixa viscosidade, aplicadas em camadas finas de 1-10mm para produzir um substrato liso e uniforme, sobre o qual pode ser aplicado um revestimento final (De Gasparo *et al.*, 2009).

As principais propriedades requeridas para argamassas autonivelantes são: alta fluidez, estabilidade dimensional, resistência à segregação e exsudação, capacidade autonivelante e resistência de adesão ao substrato (Silva, 2016). A Figura 6 apresenta um sistema de piso e seus elementos.

Figura 6 - Exemplo de um sistema de piso e seus elementos



Fonte: NBR 15575-3 (ABNT, 2013).

2.2.1. Estudo desenvolvido com geopolímeros

Júnior (2016) buscou desenvolver argamassa autonivelante híbrida contendo baixo teor de CP para avaliar seu comportamento mecânico e durabilidade. Para a formulação da argamassa foram utilizados como precursores a cinza pesada e a cinza da casca do arroz, obtida de queima controlada. O CP CP-V ARI foi utilizado em substituição de cinza pesada (CZP) por teores de 30%, 10%, 5% e 2,5% e argamassas ternárias substituindo o teor de 10% de CP por 25%, 50% e 75% de cinza de casca de arroz (CCA). A solução alcalina utilizada foi a base de hidróxido de sódio (NaOH) de 14M com a solução de silicato de sódio alcalino em proporção 1:2. Foram utilizados dois aditivos superplastificantes, para estudo de compatibilidade, á base de policarboxilato e outro á base de naftaleno, descartado devido a elevada perda de consistência em curto período de tempo.

O autor realizou ensaios preliminares com dosagens de 8M, 14M e 18M de hidróxido de sódio (NaOH), levando-se em consideração a melhor relação mássica de 1:2 de hidróxido e silicato obtido em estudos prévios. Conforme análises realizadas, foram observados melhores resultados de resistência para amostras utilizando 14M de hidróxido de sódio (NaOH). A Tabela 1 apresenta as composições das argamassas realizadas no estudo.

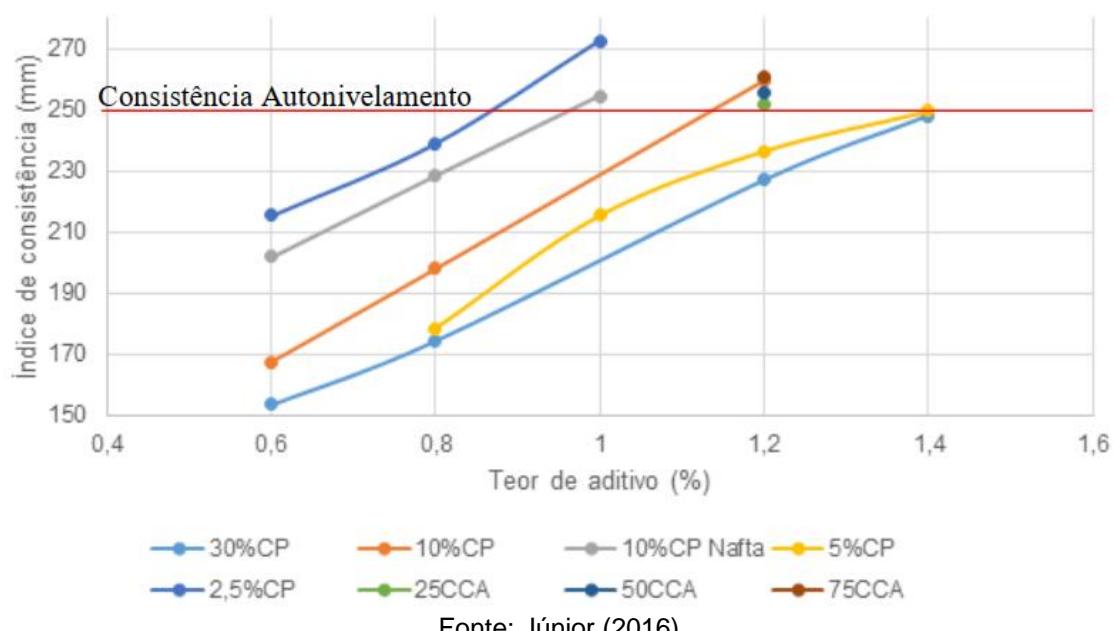
Tabela 1 - Composições das argamassas realizadas

Misturas	Composições para 100g de materiais cimentante						Relações molares	A/L
	CZP	CP	CCA	Areia	NaOH	SS		
2,5% CP	97,5	2,5	-				2,6	
5% CP	95	5	-				2,64	
10% CP	90	10	-				2,71	
30% CP	70	30	-	200	30	60	3,08	0,42
25% CCA	90	7,5	2,5				2,81	
50% CCA	90	5	5				2,91	
75% CCA	90	2,5	7,5				3,02	

Fonte: Adaptado de Júnior (2016)

A Figura 7 apresenta a relação do espalhamento e o teor de aditivo Policarboxilato utilizado para cada composição estudada. O estudo no estado fresco revelou a tendência de maiores espalhamentos para as composições com menores quantias de CP (exceto para a argamassa de 5% CP, que obteve menor consistência que a amostra 10% CP).

Figura 7 - Espalhamento em mesa em relação ao teor de aditivo



Fonte: Júnior (2016)

2.2.2. Precursors

2.2.2.1. Escória Granulada de Alto Forno

A escória granulada de alto forno (EGAF) é um subproduto obtido a partir da produção do ferro gusa no alto-forno, formada essencialmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e de outras bases. A EGAF, quando finamente moída, apresenta excelentes propriedades cimentícias usadas com CP ou materiais álcali ativados (ACI, 2006). A Tabela 2 a seguir apresenta a composição química da EGAF utilizada no trabalho de Asghari *et al.* (2023).

Tabela 2 - Composição química da EGAF

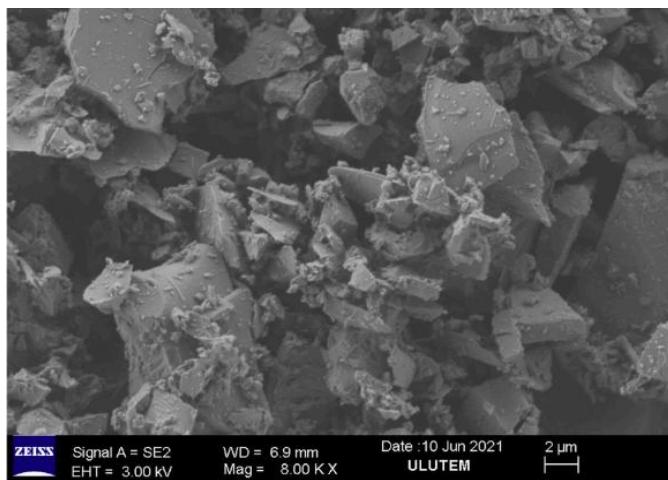
Composição	% do Peso total
SiO ₂	36,50
Al ₂ O ₃	11,00
CaO	38,50
Fe ₂ O ₃	1,00
MgO	7,80
SO ₃	0,30
K ₂ O	0,80
Na ₂ O	0,65
TiO ₂	1,50
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	48,50

Fonte: Asghari *et al.* (2023)

Porém, quando hidratada somente com água, sua hidratação é significativamente menor que o CP. Portanto, álcalis ou cal são utilizados como ativadores para acelerar a taxa de reação (Ozbay *et al.*, 2016).

A escória é uma adição suplementar utilizada em substituições parciais no CP, pela qual apresenta propriedades ligantes devido a presença do hidróxido de cálcio da Portlandita, iniciando o processo de hidratação (Amran *et al.*, 2021). A Figura 8 ilustra imagem obtida em MEV da EGAF.

Figura 8 - Imagem MEV EGAF



Fonte: Abed *et al.* (2024)

2.2.2.2. *Metacaulim*

O metacaulim (MC) é classificado como um material pozolânico, com elevados teores de sílica e alumina, considerado o precursor mais utilizado devido a sua elevada reatividade em temperatura ambiente. É obtido a partir da calcinação da argila caulinítica rica em aluminossilicatos em uma faixa de temperatura entre 500 e 850°C (Provis; Bernal, 2014). A Tabela 3 apresenta a composição química do MC.

Tabela 3 - Composição química do MC de estudos anteriores

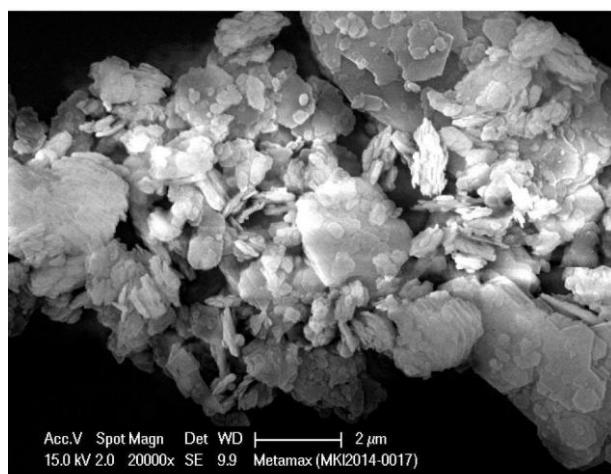
Composição	% do Peso total
SiO ₂	53,50
Al ₂ O ₃	40,90
CaO	0,20
Fe ₂ O ₃	1,00
MgO	0,20
K ₂ O	0,30
Na ₂ O	0,10
TiO ₂	1,20
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	95,4

Fonte: Asghari *et al.* (2023)

O grau de reatividade e sua tonalidade é afetado pela pureza do caulim. De maneira que quanto menor for a quantidade de sílica e alumínio, menor será a reatividade e sua tonalidade será mais escura (Dal Molin, 2011).

Sua utilização como geopolímero propicia ao material grandes resistências nas idades iniciais (Duxson, 2006). No entanto, sua formulação depende de grande quantidade de água e exibe baixa trabalhabilidade no estaco seco devido ao seu formato lamelar e alta superfície específica das partículas quando comparado com outros precursores utilizados (Provis *et al.*, 2010). A Figura 9 ilustra a imagem obtida em MEV do MC.

Figura 9 - Imagem MEV MC



Fonte: Sullivan *et al.* (2018)

A NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece os requisitos para a classificação dos materiais pozolânicos. O MC é classificado como material pozolânico de classe N, que se configura por pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos químicos e físicos constantes nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 - Requisitos químicos (valores expressos em porcentagem)

Propriedades	Classe N
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70
SO_3	≤ 4
Teor de umidade	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$

Fonte: NBR 12653 (2014)

Quadro 2 - Requisitos físicos

Propriedades	Classe N
Material retido na pereira com abertura de malha de 45 µm	≤20%
Índice de desempenho com CP aos 28 dias, em relação ao controle	≥90%
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6 MPa

Fonte: NBR 12653 (2014)

2.2.2.3. Ativadores

A utilização de ativadores alcalinos é essencial para as reações de geopolimerização. Basicamente são soluções líquidas de elementos alcalinos (Na, K ou Li), sendo os ativadores mais comuns consistindo numa solução de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) com água destilada e o silicato de sódio alcalino (SS) industrializado (Mohajerani *et al.*, 2019).

O hidróxido de potássio (KOH) e o silicato de potássio são utilizados com menor frequência, devido ao elevado custo quando comparados ao hidróxido de sódio (NaOH) (Ribeiro, 2021).

Segundo Jindal *et al.* (2022) os metais íons das soluções afetam a reação de geopolimerização, a microestrutura e as propriedades físicas de maneira diferente. No caso do hidróxido de sódio (NaOH), os íons Na⁺ são utilizados para aumentar a taxa de dissolução, melhorar a estabilização dos silicatos comparados com o íon K⁺, o qual possui como vantagens a aceleração da taxa de condensação, aceleração da cinética das reações (Toniolo *et al.*, 2018).

Segundo os autores Xu e Van Deventer (2000), os cátions de potássio são conhecidos por sua propriedade de facilitar a formação de cadeias maiores de oligômeros de silicatos, resultando em uma estrutura mais compacta e com maior resistência a compressão.

A combinação do hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) com uma fonte de silicatos de sódio (SS) ou potássio (SK) traz resultados mais interessantes de performance do que o seu uso isolado. Para maior reatividade das soluções é indicada a sua preparação com pelo menos 24 horas de antecedência para o seu uso em temperatura ambiente (Jindal *et al.*, 2022).

A utilização de silicatos nos geopolímeros se deve a nucleação que ocorre de maneira mais rápida, permitindo uma solidificação mais rápida (Provis; Lukey; Van Deventer, 2005).

2.2.2.4. *Aditivos químicos*

Os aditivos químicos superplastificantes (SP) são responsáveis por alterar a cinética da hidratação do CP. A adição do aditivo a base de policarboxilato ou de naftaleno sulfonado, resulta no prolongamento do período de indução e retardo no tempo de pega, devido a adsorção do aditivo nas partículas de cimento, conferindo repulsão eletrostática e o aumento de fluidez. O aditivo também dificulta a dissolução da alita e do C₃A seja pelo próprio mecanismo de adsorção ou pelo consumo de íons Ca²⁺ da solução, retardando a hidratação do cimento (Jansen *et al.*, 2012).

Segundo Fan *et al.* (2023) os superplastificantes à base de naftaleno (NS), alifáticos (AS) e à base de policarboxilato (PS) não conseguem melhorar efetivamente a fluidez da pasta álcali ativada, e até mesmo tornam a pasta mais espessa. Porém, quando os SP's são misturados à argamassa álcali ativada, há certo aumento na fluidez. O autor conclui em seu estudo que os SP's possam reduzir a coesão da areia na argamassa e não no precursor aluminossilicato.

O autor utilizou MC, escória, CV como precursores. Como ativadores foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH) 10M e silicato de sódio alcalino (SS) na razão 1:3 com o hidróxido.

2.2.3. Propriedades físicas e mecânicas

2.2.3.1. *Trabalhabilidade*

Define-se o conceito de trabalhabilidade como a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que a mesma pode ser misturada, transportada, aplicada, consolidada e acabada, em uma condição homogênea. Popularmente o conceito é associado a como o material se comporta na prática, ou seja, uma argamassa é chamada “trabalhável” quando permite que o aplicador execute bem o seu trabalho. No caso de revestimento, que ele possa executar o

serviço com boa produtividade, garantindo que o revestimento fique adequadamente aderido à base e apresente o acabamento superficial especificado (Casarek, 2007).

2.2.3.2. *Viscosidade*

A viscosidade é a grandeza que expressa a resistência do fluido ao escoamento, considerada como o atrito interno, resultante quando uma camada do fluido é迫使ada a se mover à outra adjacente (Souza; Lara, 2015).

2.2.3.3. *Segregação e exsudação*

A segregação é definida como a separação dos componentes do concreto fresco, resultando numa distribuição não uniforme. No caso de concretos secos, a segregação consiste na separação dos agregados da argamassa. A exsudação, outro caso de segregação, é característica de argamassas mais fluidas de concreto, ocorre nos compósitos cimentícios devido a água possuir menor massa específica entre os materiais constituintes da mistura, se deslocando para a superfície (Mehta; Monteiro, 2014; Carvalho, 2015).

2.2.3.4. *Retenção de água*

A retenção de água é uma propriedade associada à capacidade da argamassa manter a sua trabalhabilidade no estado fresco quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação ou pela absorção de água. O desempenho da argamassa é afetado diretamente por esta propriedade, pois uma adequada retenção de água possibilita as reações químicas de endurecimento.

Outra situação em que a propriedade é relevante refere-se quando a argamassa é aplicada sobre substratos com alta sucção de água ou quando as condições climáticas são consideradas adversas (Casarek, 2007).

Segundo Silva (2016) a presença de materiais finos na dosagem de argamassas autonivelantes pode contribuir na retenção da água da mistura.

2.2.3.5. Aderência

Conforme definição da NBR 13528 (ABNT, 2019) a aderência trata-se da propriedade do revestimento de resistir às tensões atuantes na superfície ou na interface com o substrato.

Não há norma específica que estabeleça limites para resistência ao arrancamento por tração para argamassas autonivelantes.

Contudo a NBR 13749 (ABNT, 2013) apresenta os limites de resistência de aderência à tração de revestimentos de paredes e teto, conforme mostrados na Quadro 3.

Quadro 3 - Limites de resistência de aderência à tração (Ra) para emboço

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: NBR 13749 (ABNT, 2013)

2.2.3.6. Retração

Segundo Casarek (2007) a retração está associada com a variação de volume da pasta aglomerante e apresenta papel fundamental no desempenho das argamassas aplicadas, especialmente quanto à estanqueidade e à durabilidade. A tensão de tração na argamassa oriunda da retração é diretamente proporcional ao seu módulo de elasticidade. No caso de argamassas muito ricas em cimento, estão mais sujeitas às tensões de tração que causarão fissuras.

Geralmente, a presença de um alto teor de finos ocasiona maior retração, principalmente quando os grãos possuem dimensões inferiores a 0,005mm (argila). Os finos, devido à sua alta superfície específica e à sua natureza, para uma

trabalhabilidade adequada, requerem maior quantidade de água de amassamento, gerando maior retração e fissuração, o que compromete a durabilidade dos revestimentos (Carasek, 2007).

2.3. REOLOGIA

O comportamento reológico dos materiais cimentícios no estado fresco é fator fundamental para determinar as propriedades e aplicações tecnológicas do material, tais como a capacidade de moldagem, bombeamento e trabalhabilidade (Banfill, 2003). Durante a concretagem, por exemplo, a argamassa deve apresentar a menor viscosidade para permitir um preenchimento rápido e completo das fôrmas e também a presença de tensão de escoamento adequada para reduzir a segregação dos agregados (Leonelli; Romagnoli, 2014). As propriedades reológicas dos materiais dependem de características e de diversos fatores, tais como: tensão, tempo, temperatura e pressão (Sakano, 2022).

No estudo da reologia as principais grandezas são: a tensão de escoamento e a viscosidade. A tensão de escoamento é caracterizada como a tensão mínima para que se inicie o escoamento, quando o material é submetido a tensão menor, se comporta como sólido elástico. A viscosidade para fluídos é definida pela relação entre a tensão e a taxa cisalhante (deformação em relação ao tempo). No caso particular de fluidos Newtonianos a relação entre tensão e taxa de cisalhamento é linear, portanto o valor de viscosidade é constante (Schramm, 2006).

Os materiais viscoplásticos apresentam tensão de escoamento e comportamento semelhante aos líquidos. O material não se recupera após a retirada da tensão. No caso dos materiais viscoelásticos, há recuperação parcial da deformação sofrida após a retirada da tensão, correspondente à deformação mecânica do material (Macosko, 1994).

Segundo Gasperi *et al.* (2021) o tempo é fator-chave e está diretamente ligado as propriedades reológicas dos geopolímeros. Geralmente sistemas com maior relação água/ligante ou concentração de ativador possuem uso mais promissor devido a sua melhor trabalhabilidade enquanto se mantém coeso para evitar a segregação. Além disso, sistemas com potássio como ativador geram aumento significativo no

comportamento viscoelástico do material e promovem atraso no tempo em aberto do material.

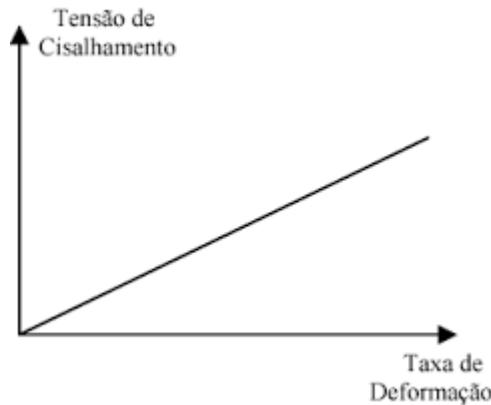
2.3.1. Modelos reológicos

Os principais modelos reológicos existentes e suas características são apresentados nesta seção.

2.3.1.1. *Modelo Newtoniano*

Os fluidos Newtonianos são aqueles em que a taxa de cisalhamento (γ) é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento. A constante de proporcionalidade entre essas duas variáveis é a viscosidade do fluido (η) (Sakano, 2016). O gráfico que relaciona as variáveis taxa e tensão de cisalhamento possui a forma de uma reta que cruza a origem, sendo a viscosidade obtida a partir do seu coeficiente angular, conforme pode ser visualizado na Figura 10 e equação (2) abaixo (Castro; Barbosa, 2010).

Figura 10 - Comportamento reológico de um fluido Newtoniano



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

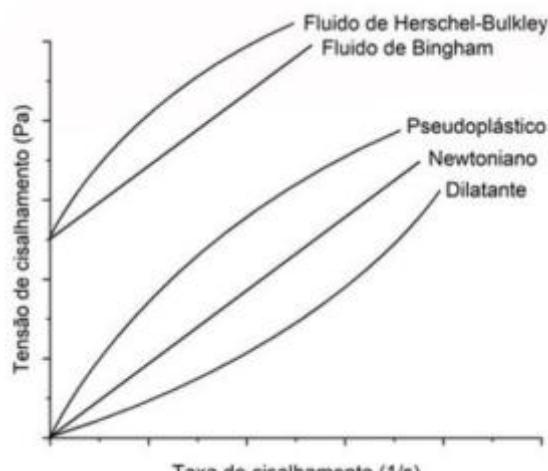
$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (2)$$

Sendo τ a tensão de cisalhamento (Pa), η é a viscosidade (Pa.s) e γ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}).

2.3.1.2. Modelos não newtonianos

Os fluidos que não seguem o modelo Newtoniano possuem uma relação não linear entre a taxa e tensão de cisalhamento, ou seja, sua viscosidade não é constante, com exceção dos fluidos de Bingham. Esta classificação divide-se em duas classes distintas: os que possuem modelo reológico dependente no tempo e os que possuem modelo reológico independente no tempo, conforme Figura 11 (Castro; Barbosa, 2010).

Figura 11 - Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo



Fonte: Carasek (2017)

Os materiais cimentícios podem ser representados pela curva de Bingham, conforme observa-se na Figura 11, são materiais que necessitam de tensão inicial para sair em repouso. O modelo reológico de Bingham é dado pela equação (3).

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (3)$$

Sendo τ é a tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 é a tensão ou limite de escoamento (Pa); μ é a viscosidade plástica; e γ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}).

O modelo de Herschel-Bulkley também permite o ajuste dos parâmetros reológicos para aplicações em argamassas. O modelo reológico é descrito pela equação (4) e a viscosidade plástica aparente conforme equação (5).

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n \quad (4)$$

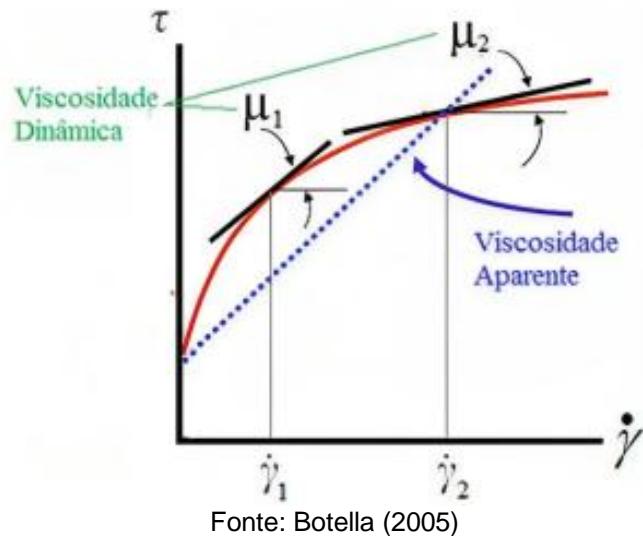
$$\mu_{eq} = \frac{3K}{n+2} \cdot (\gamma_{máx})^{n-1} \quad (5)$$

Sendo τ é a tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 é o limite de escoamento (Pa), γ é a viscosidade plástica aparente (Pa.s), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}), K é o índice de consistência, n é o índice de potência (comportamento do fluido).

Se n for diferente de 1, o comportamento do fluido é conforme o modelo de Herschel-Bulkley, no caso de n igual a 1 o modelo reológico é descrito por Bingham.

Conforme ilustrado na Figura 12, a viscosidade no modelo de Herschel-Bulkley varia com a taxa de cisalhamento, ao contrário dos modelos de Newton e Bingham.

Figura 12 - Viscosidade dinâmica e aparente de um fluido



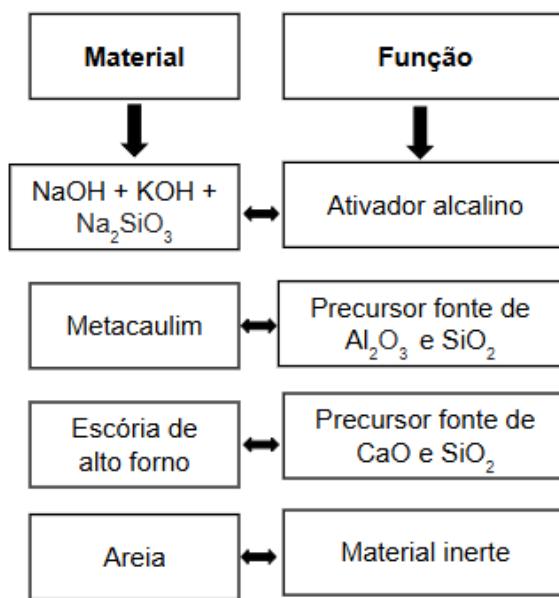
3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia para alcançar esses objetivos por meio de procedimentos experimentais conduzidos em laboratório. As análises dos materiais e da argamassa foram realizadas no Laboratório do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, na cidade de Joinville/SC.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

O programa experimental consistiu em preparar argamassas com diferentes proporções de precursor, areia natural, água e ativador com a finalidade de se obter dosagens de argamassas com a capacidade de se autonivelar. A Figura 13 abaixo mostra as funções principais de cada material na argamassa.

Figura 13 - Materiais com suas respectivas funções



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.1.1. Metacaulim

O metacaulim (MC) é um material pozolânico que possui elevados teores de sílica e alumina, sendo o precursor tradicionalmente mais utilizado devido à sua elevada reatividade nas reações de geopolimerização. É obtido por meio da ativação térmica em uma faixa de temperatura entre 500 e 850°C da argila caulinítica, rica em aluminossilicatos e encontrada próximo à crosta terrestre (Provis; Bernal, 2014). Nesta

pesquisa será utilizado o metacaulim HP ULTRA do fabricante Metacaulim do Brasil, com massa específica de 2,68 g/cm³. Sua composição química pode ser obtida por fluorescência de raios-x e é mostrada na Tabela 4 a partir dos dados do fabricante.

Tabela 4 - Composição química do Metacaulim

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO ₂	57,00%	44,00% a 65,00%
Al ₂ O ₃	34,00%	32,00% a 46,00%
CaO + MgO	< 0,10%	< 1,50%
SO ₃	< 0,10%	< 1,00%
Na ₂ O	< 0,10%	< 0,50%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,50%	< 1,50%
Fe ₂ O ₃	2,00%	-
TiO ₂	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2,00%
Perda ao Fogo	3,00%	< 4,00%
Resíduo #325	6,00%	< 10,00%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115,00%	> 105,00%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) ₂ /g	> 750mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
Massa Específica	2,68 kg/dm ³	-

Fontes: Metacaulim do Brasil (2023) e NBR15894 (2010)

3.1.2. Escória Granulada de alto forno

A escória granulada de alto forno (EGAF) utilizada no trabalho foi fornecida moída por empresa de cimento. Foram realizados ensaios para a caracterização do material.

Figura 14 – EGAF



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.1.3. Areia

O agregado miúdo utilizado nas argamassas é classificado como fino segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A areia foi ensaiada para obtenção da massa específica e diâmetro máximo, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), e massa unitária aparente, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Para a produção da argamassa foi adicionada à pasta o agregado miúdo proveniente de britagem.

3.1.4. Ativadores Alcalinos

A utilização de ativadores alcalinos é essencial para as reações de geopolimerização. Basicamente são soluções líquidas de elementos alcalinos (Na, K ou Li), sendo os ativadores mais comuns consistindo numa solução de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) com água destilada e o silicato de sódio alcalino industrializado [$\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$] (Mohajerani *et al.*, 2019)

A combinação de ativadores alcalinos com silicato de Na/K resultam nas melhores propriedades comparativamente ao uso de ativadores isolados (Jindal, 2022). O hidróxido de potássio (KOH) e o silicato de potássio (SK) são utilizados com menor frequência, devido ao elevado custo quando comparados ao hidróxido de sódio (NaOH) (Ribeiro, 2021).

3.1.5. Hidróxido de Sódio

Para a realização da solução ativadora foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH) em solução fatorada de 1L com fator de correção 1,0057 e concentração 10M (400 gramas/litro) fornecido pela empresa Éxodo Científica (Figura 15). Para sua utilização na produção da solução alcalina ativadora se faz necessário utilizar luvas e óculos de proteção para manuseá-lo, uma vez que este é um material altamente alcalino. O Quadro 4 apresenta as especificações da solução.

Quadro 4 - Especificações Hidróxido de Sódio (NaOH)

Especificações	
Solução em meio	Líquido incolor
Fator de correção	0,99 – 1,01
Densidade	1,315 – 1,355 g/cm ³
Concentração em Normalidade	9,9 – 10,1 N
Concentração em molaridade	9,9 – 10,1 M

Fonte: Éxodo Científica (2025)

Figura 15 - Hidróxido de Sódio (NaOH) em solução



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.1.5.1. Hidróxido de Potássio

O hidróxido de potássio (KOH), também conhecido como potassa cáustica, é fornecido usualmente 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%.

Foi utilizado o hidróxido de potássio (KOH) fornecido já em solução 10M ($9,99280\text{N} \pm 0,0500\text{N}$) fornecido empresa SpecSol conforme Figura 16.

Figura 16 - Hidróxido de Potássio (KOH) em solução 10M



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.1.5.2. Silicato de Sódio

O silicato de sódio alcalino (SS), também conhecido como vidro líquido, 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 (Quadro 5) foi fornecida pela empresa fabricante.

Quadro 5 - Composição química do Silicato de Sódio

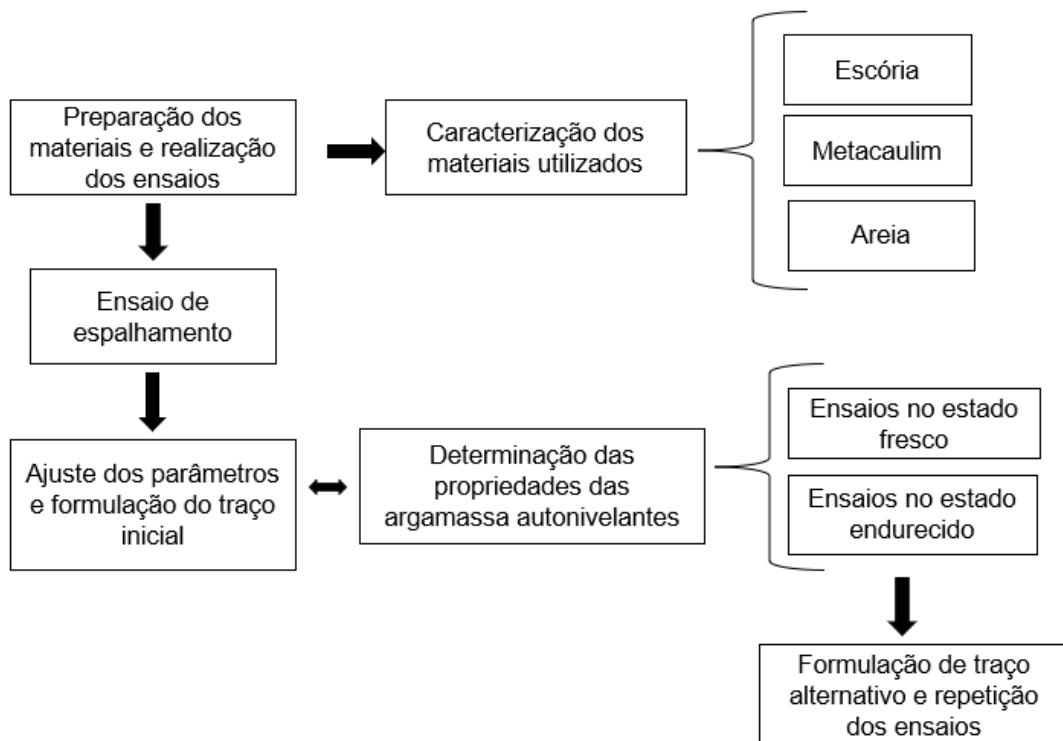
Óxidos	Porcentagem em massa (%)
Na ₂ O	14,50 a 15,50
SiO ₂	31,50 a 33,00
H ₂ O	54,00 a 51,50

Fonte: Adaptado de Quimidrol (2025)

3.2. DOSAGEM DO TRAÇO INICIAL

A formulação do traço inicial foi baseada no estudo realizado por Júnior (2016), ajustando-se os parâmetros conforme a realização dos ensaios no estado fresco, visto que no presente estudo foram utilizados outros precursores e não foram utilizados aditivos químicos. A Figura 17 esquematiza o fluxograma da pesquisa.

Figura 17 - Fluxograma resumido



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A produção dos geopolímeros foi baseada em composições com MC e EGAF como precursores e fontes de aluminossilicatos; o hidróxido de sódio (NaOH) e de potássio (KOH) como ativadores; silicato de sódio alcalino (SS) como fonte adicional de sílica e a água proveniente do ativador atuando como meio para dissolução dos materiais.

O traço inicial do experimento foi de 1:1 (precursor, agregado miúdo) em massa, os ativadores foram fixados em 0,40:0,80 (hidróxidos e silicato de sódio) também em massa. A Tabela 5 apresenta o traço inicial utilizado.

Tabela 5 – Dosagem das argamassas elaboradas

Argamassa nº.	Precursors (g)		Ativador alcalino (g)				Agregado miúdo (g)
	MC	EGAF	NaOH	KOH	Molaridade	SS	
T1M1	60	40	20	20	5,0	80	100
T1M2	50	50	20	20	5,0	80	100
T1M3	40	60	20	20	5,0	80	100
T1M4	60	40	20	20	7,5	80	100
T1M5	50	50	20	20	7,5	80	100
T1M6	40	60	20	20	7,5	80	100
T1M7	60	40	20	20	10,0	80	100
T1M8	50	50	20	20	10,0	80	100
T1M9	40	60	20	20	10,0	80	100

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Conforme apresentado na Tabela 06, observa-se que as relações molares, especificamente as razões $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{R}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, aumentam progressivamente de T1M1 a T1M9. O R_2O é o resultado do somatório dos óxidos de potássio (K_2O); sódio (Na_2O) e silício (SiO_2). Esse aumento nas razões molares implica um ajuste na composição química das misturas, o que pode influenciar diretamente as propriedades do geopolímero.

Em relação a relação água/sólidos da mistura, diminui à medida que se avança de T1M1 para T1M9, passando de 0,3428 para 0,3095. De forma semelhante, ao analisar a relação específica para a fase geopolimérica, com redução relação de 0,5906 (T1M1) para 0,5239 (T1M9).

Tabela 6 - Relações Molares

	Massa em gramas						Razões Molares					Relação A/S Mistura	Relação A/S (Geopolímero)
	MC	GB	Areia	SS	KOH	NaOH	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	R ₂ O/Al ₂ O ₃	R ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	A/S	A/S
T1M1	60	40	100	80	20	20	0,646	0,437	0,220	0,138	4,698	0,342	0,590
T1M2	50	50	100	80	20	20	0,706	0,463	0,223	0,143	4,951	0,342	0,590
T1M3	40	60	100	80	20	20	0,779	0,493	0,225	0,148	5,256	0,342	0,590
T1M4	60	40	100	80	20	20	0,715	0,558	0,259	0,152	4,698	0,325	0,555
T1M5	50	50	100	80	20	20	0,782	0,593	0,263	0,158	4,951	0,325	0,555
T1M6	40	60	100	80	20	20	0,862	0,635	0,266	0,164	5,256	0,325	0,555
T1M7	60	40	100	80	20	20	0,778	0,674	0,297	0,166	4,698	0,309	0,523
T1M8	50	50	100	80	20	20	0,850	0,719	0,300	0,172	4,951	0,309	0,523
T1M9	40	60	100	80	20	20	0,937	0,771	0,305	0,178	5,256	0,309	0,523

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.3. SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS

O processo de seleção das argamassas foi estruturado em quatro fases, conforme descrito abaixo:

Fase I: Foram realizados os ensaios de resistência à compressão e índice de consistência com todas as 9 argamassas. As argamassas selecionadas para as fases subsequentes foram aquelas que atendiam à norma C 1708 (ABNT, 2016), que estabelece que o diâmetro de espalhamento mínimo deve ser de 125 mm. Além disso, foi definido que a resistência mínima à compressão deveria ser de 30 MPa aos 7 dias de idade.

Fase II: Nessa etapa, foram realizados os seguintes ensaios para as argamassas selecionadas:

- Retenção de fluxo - C 1708 (ASTM, 2019)
- Tempo de regeneração - C 1708 (ASTM, 2019)
- Tempo de pega automático - C 191 (ASTM, 2006)
- Reometria rotacional
- Resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 2019)
- Resistência à tração na flexão – NBR 13279 (ABNT, 2005); C348(ASTM, 2019)
- Retração linear – NBR 15261 (ABNT, 2005); C157(ASTM,2017)
- Massa específica, índice de vazios e absorção de água – NBR 9778 (ABNT, 2009)

A partir da observação dos resultados obtidos, foi desenvolvido um traço alternativo com o objetivo de melhorar as propriedades observadas nas argamassas.

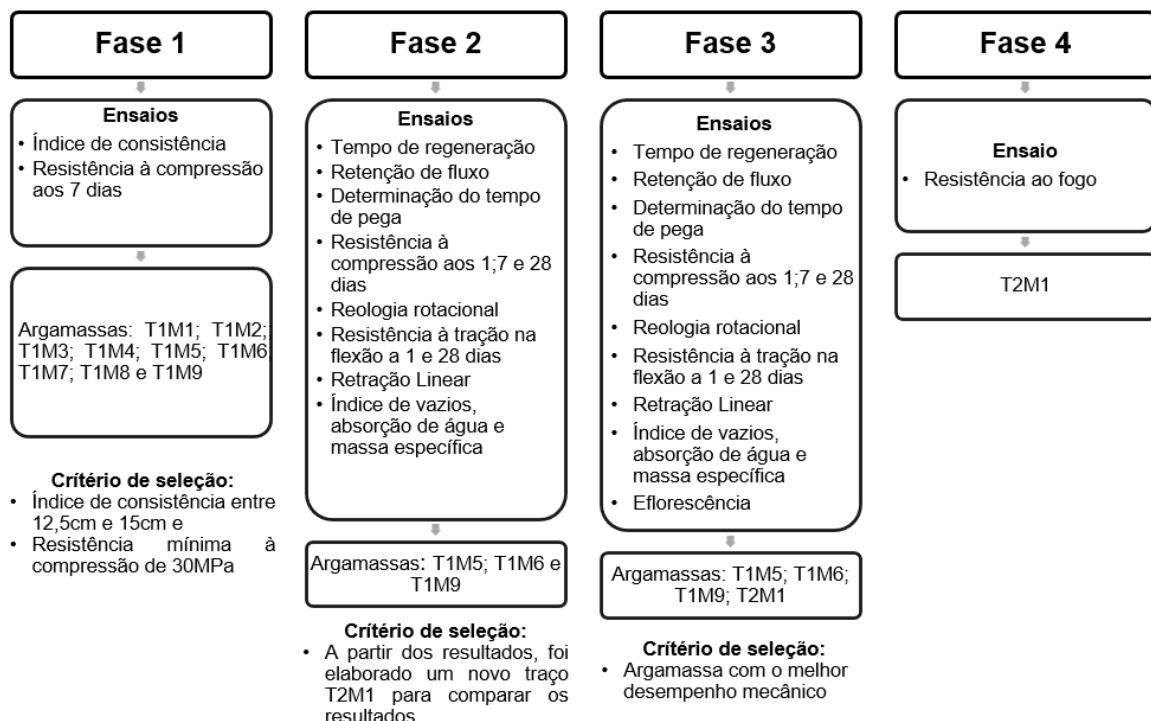
Fase III: Foram repetidos os ensaios das fases I e II com o traço alternativo, a fim de verificar as melhorias nos parâmetros da argamassa. Além disso foi realizado o ensaio de eflorescência. Os resultados foram comparados com os valores indicados em estudos correlatos e normas técnicas, bem como entre as quatro argamassas da fase II.

Fase IV: Após a avaliação e análise dos resultados das fases anteriores, foi selecionado o melhor traço do experimento. Na última fase, foi realizado o ensaio

complementar de resistência ao fogo para verificar o comportamento térmico do material em condições extremas.

Este processo de seleção visa otimizar as propriedades das argamassas, assegurando que atendam aos requisitos técnicos e normativos para aplicações práticas, como resistência mecânica, fluidez e durabilidade.

Figura 18 - Fases do experimento

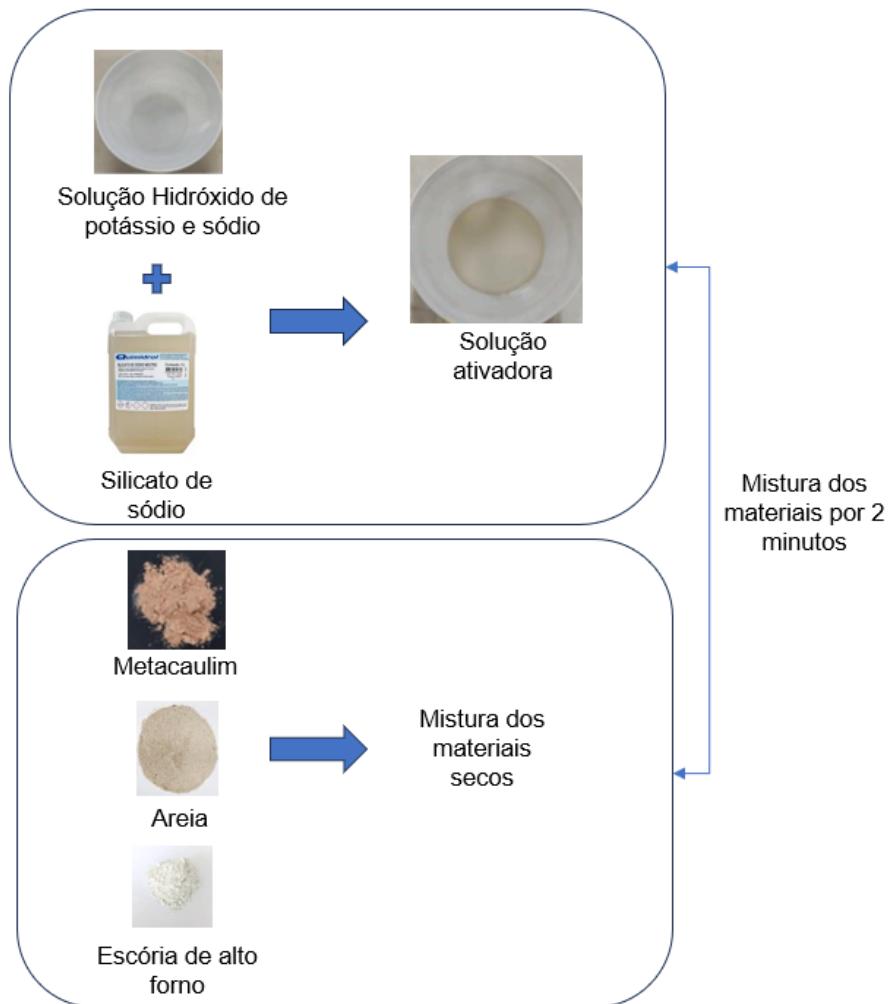


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.4. PREPARAÇÃO DO GEOPOLÍMERO

O procedimento para a produção da argamassa envolveu a mistura dos materiais anidros — Areia, MC e EGAF — em um recipiente separado, de forma a garantir uma homogeneização adequada dos componentes secos. Paralelamente, foi preparada a solução ativadora, composta pela combinação dos hidróxidos com o silicato de sódio, conforme ilustrado na Figura 19. Essa solução foi então incorporada à mistura de sólidos para iniciar o processo de ativação e formação do geopolímero.

Figura 19 - Fluxograma de preparação do geopolímero



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo serão apresentados os ensaios que foram utilizados para caracterizar os seguintes materiais: MC, EGAF e areia.

3.5.1. Determinação da massa específica e massa unitária da areia

O ensaio será realizado em conformidade com a NBR 16916 (ABNT, 2021) – Agregado miúdo – determinação da densidade e da absorção de água, para determinar a massa específica e unitária da areia.

Para realizar o ensaio é necessário colocar a água em um recipiente coberto com água e deixá-lo em repouso durante 24 ± 4 horas. Após o período é necessário

retirar o excesso de água da amostra, estendendo-a sobre uma superfície com corrente de ar contínua e misturando-a com frequência para obter uma secagem uniforme.

Na sequência é realizada a secagem do material até o agregado atingir a condição ideal para o ensaio, que é denominada de saturado superfície seca, sendo o ponto em que o agregado não tem excesso de água na superfície das partículas. Define-se este ponto como sendo aquele que o agregado desmorona parcialmente após a amostra ser colocada em um molde tronco-cônico e compactada com 25 golpes de haste distribuídos uniformemente.

Após a preparação do agregado nas condições anteriormente descritas, são colocadas 500 gramas da amostra no frasco calibrado (picnômetro), com capacidade para 500 cm³, registrando a massa do conjunto frasco + areia. Após este procedimento, o frasco é preenchido com água até a marca de 500 ml, realizando movimentos circulares para eliminar as bolhas de ar presentes. Em seguida, o conjunto deve ser deixado em repouso em um banho à temperatura de 23 ± 2°C, durante 1 hora. Decorrido este tempo, o picnômetro deve ser completado com água até a marca de 500 cm³, registrando a massa total do conjunto frasco + areia + água,

Na sequência, o agregado miúdo deve ser retirado do frasco, com cuidado para assegurar que nenhum material seja perdido, e levado para secagem em estufa à temperatura de 100 ± 5 °C durante pelo menos 24 horas ou até massa constante +- 0,5g. Aguardar esfriar a temperatura ambiente e determinar a massa da amostra seca.

3.5.2. Determinação da massa específica EGAF e MC

Os ensaios foram realizados em conformidade com a NBR 16605 (ABNT, 2017) – CP e outros materiais em pó – determinação da massa específica.

Para realização deste ensaio foi utilizado o frasco volumétrico de Le Chatelier, que deve ser preenchido com querosene, por ser um líquido que não reage quimicamente com o material, até o nível compreendido entre as marcas zero e 1 cm³. A partir desse procedimento foi registrada a primeira leitura da escala graduada do frasco.

A segunda etapa do ensaio consistiu em inserir 60 gramas de resíduo no frasco, com auxílio do funil para que não houvesse aderência de material nas paredes do frasco. O objetivo é que o nível de deslocamento do líquido atinja o intervalo compreendido entre as marcas de 18 e 24 cm³, realizando movimentos circulares com o frasco para eliminar as bolhas de ar.

Na última etapa do ensaio foi registrada a leitura do volume na escala graduada. A massa específica do material deve ser determinada através da Equação 6:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Onde: ρ é a massa específica do resíduo (g/cm³), m é a massa do material ensaiado (g) e V é o volume deslocado pelo material (cm³).

Figura 20 - Frasco Volumétrico com amostras de MC e Escória



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.5.3. Análise granulométrica da areia

Para realizar o ensaio foram seguidos os procedimentos descritos na NBR NM 48 (ABNT, 2003). A realização deste ensaio permitiu obter a distribuição granulométrica, o módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado.

Na primeira etapa foi preparado o conjunto de peneiras da série normal, com aberturas de malha de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. A massa mínima de cada amostra utilizada para o ensaio foi de 300 gramas de agregado miúdo seco em estufa, sendo necessárias pelo menos 2 amostras.

As peneiras foram dispostas com abertura da malha em ordem crescente da base para o topo, e a amostra colocada na peneira superior do conjunto. O peneiramento foi realizado manualmente e de forma contínua, através de movimentos laterais e circulares, permitindo a classificação dos diferentes tamanhos de grãos.

Na sequência foi realizada a determinação das massas retidas em cada peneira de forma que, após 1 minuto de peneiramento contínuo, a massa de material passante fosse inferior a 1% da massa de material retido.

Para cada uma das amostras de ensaio, foi calculada a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, com aproximação de 0,1%. As amostras apresentaram necessariamente a mesma dimensão máxima característica e, nas demais peneiras, os valores de porcentagem retida individualmente não diferiram mais que 4% entre si. Os agregados miúdos foram classificados segundo o Quadro 6 a seguir:

Quadro 6 - Classificação dos agregados miúdos

Agregado	Módulo de finura (MF)
Muito Grosso	$MF \geq 3,90$
Grosso	$3,3 \leq MF < 3,90$
Médio	$2,4 \leq MF < 3,30$
Fino	$MF < 2,40$

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.5.4. Granulometria a laser

A granulometria a laser é utilizada quando a técnica por sedimentação não é adequada para caracterização de materiais finos, baseada na sedimentação de partículas em suspensão, medida por intermédio da absorção de luz (Santos *et al.*, 2021).

Para a realização deste ensaio são colocadas as amostras do material dispersas em uma solução de hexametafosfato de Sódio na relação de 0,5 gramas de material para 20 ml de fluído. Após, os materiais devem ser misturados no agitador de partículas durante 15 minutos, para homogeneização da mistura.

A distribuição granulométrica será determinada através do equipamento analisador de tamanho de partículas à laser da fabricante Shimadzu – modelo SALD 2201 disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais da UDESC, Joinville/SC.

Figura 21 - Equipamento Analisador de tamanho de partículas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.5.5. Caracterização Química por Fluorescência de Raios X (FRX)

A técnica é utilizada para determinação qualitativa e quantitativa dos elementos que compõem uma amostra. Utiliza-se na caracterização de cimentos, quando o objetivo é identificar se o material produzido apresenta, na sua composição química, elementos importantes, conforme exigido na NBR 16697 (ABNT, 2018). No presente estudo, será realizada a análise de FRX na amostra de EGAF para determinar a sua composição química.

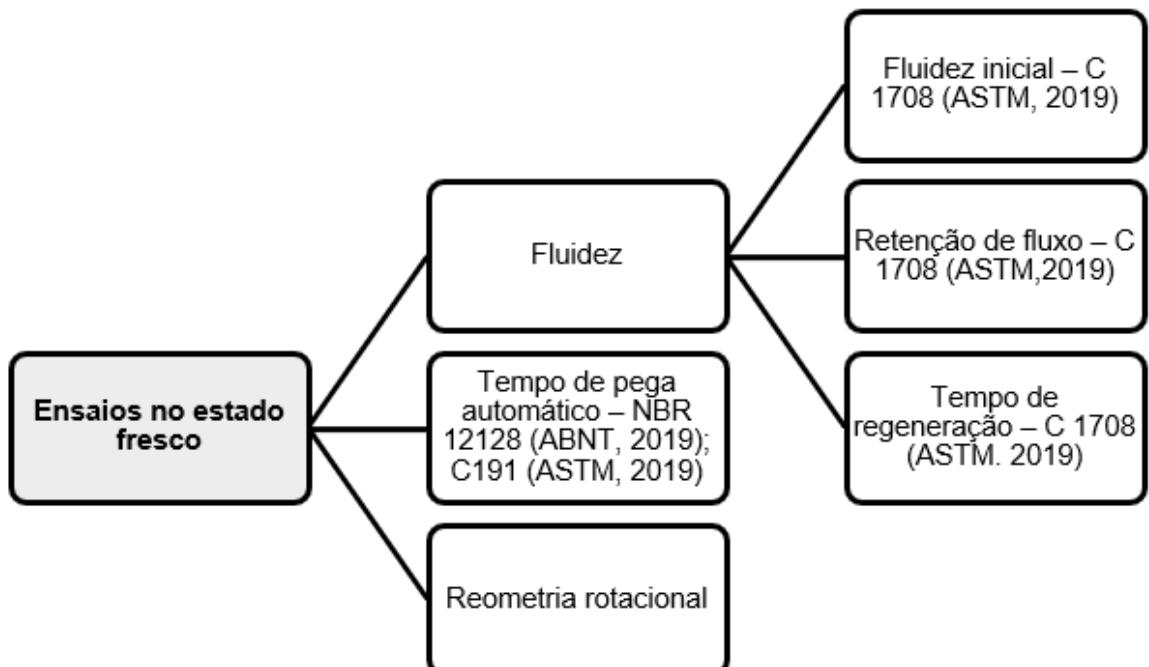
A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UDESC, em Joinville/SC, por meio do espectrômetro de fluorescência de raios-X com energia dispersiva de fabricação da SHIMADZU.

3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

3.6.1. Ensaios no estado fresco

Os ensaios no estado fresco foram realizados com o objetivo de avaliar propriedades como fluidez, tempo de pega, calor de hidratação e comportamento reológico das misturas. Para a avaliação da fluidez inicial, foi adotada a norma C1708 (ASTM, 2019), uma vez que não há uma norma brasileira específica para esta propriedade. A Figura 22, apresenta os ensaios realizados no estado fresco das misturas, juntamente com as respectivas normas adotadas para cada avaliação.

Figura 22 - Fluxograma de ensaios no estado fresco



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.6.1.1. Escoamento inicial – “Initial Flow”

O ensaio para determinação do escoamento inicial foi realizado conforme a Norma C 1708 (ASTM, 2019).

O método é utilizado para determinar o escoamento da argamassa autonivelante, visto que o escoamento inicial define a sua capacidade de espalhamento, sendo essencial estabelecer uma faixa de fluxo aceitável para o seu uso adequado.

O ensaio consistiu em colocar um anel de escoamento (cilindro com dimensões de 30 mm de diâmetro e 50 mm de altura) sobre uma placa de vidro retangular, com dimensões mínimas de 400 mm e espessura de 6 mm, em uma superfície horizontal. Decorridos 30 s da preparação da mistura, o anel de escoamento é preenchido com o material e, imediatamente após, levantado na direção vertical a uma altura entre 50 e 100 mm, permitindo o espalhamento da argamassa na placa de vidro.

O cronômetro foi acionado no momento que o anel foi levantado e a argamassa espalha-se durante 240 +- 10 s. Após este procedimento, o diâmetro de espalhamento das argamassas nas duas direções deve ser registrado, sendo que o diâmetro médio de espalhamento representa o escoamento inicial. A NBR C1708 (ASTM, 2019) define que o diâmetro médio deve estar compreendido entre o intervalo de 125 e 150 mm.

3.6.1.2. *Retenção de fluxo – “Flow retention”*

O ensaio da retenção de fluxo das argamassas foi realizado conforme a norma C1708 (ASTM, 2019). Consiste na repetição do ensaio de fluidez inicial após um intervalo entre 20 e 30 minutos do preparo das argamassas, indicando o tempo que as argamassas mantêm sua propriedade autonivelante.

As argamassas foram misturadas novamente na cuba do misturador mecânico durante 5 a 10 s em velocidade baixa. Os diâmetros de espalhamento nas duas direções aos 20 e 30 minutos devem ser registrados para avaliar a capacidade de retenção do fluxo das misturas.

Conforme recomendado pela norma, as argamassas autonivelantes com tempos de retenção de fluxo menores ou maiores que 20 a 30 minutos podem ter seus valores de espalhamento registrados em intervalos de 10 minutos, até que o material não apresente mais o escoamento mínimo.

3.6.1.3. *Tempo de regeneração – “Healing time”*

O ensaio foi realizado conforme a Norma C 1708 (2016) e consistiu em realizar cortes na argamassa até que ela não retorne ao seu estado original. A argamassa é depositada em uma forma retangular normatizada, com dimensões de 210 mm x 210 mm x 9 mm. Os cortes iniciaram após 10 minutos da argamassa dos componentes da

argamassa, os demais cortes foram realizados com a periodicidade de 5 em 5 minutos.

3.6.1.4. *Determinação do tempo de pega*

O fenômeno da pega é associado à solidificação da pasta plástica de cimento ou do material que está sendo estudado. O início e o término da pega são estágios que representam o limite de manuseio (perda de trabalhabilidade) e a solidificação completa (Santos *et al.*, 2021).

O tempo de início e fim de pega é obtido de forma automática pelo aparelho de Vicat, que registra o tempo em que a penetração da agulha na amostra corresponde a 25mm. As medições iniciaram 30 minutos após o preparo da argamassa, o intervalo entre as medições pode ser ajustado conforme a necessidade do ensaio. O tempo final foi obtido a partir do momento que a agulha não penetrou na pasta, ou seja, final de pega.

Figura 23 - Ensaio do tempo de pega automático com aparelho de Vicat



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.6.1.5. *Reologia rotacional*

Para a realização dos ensaios reológicos foi utilizado o reômetro rotacional Haake Viscotester iQair, em que foram obtidos os valores das tensões de escoamento estática e dinâmica, taxa de estruturação, viscosidade aparente e viscosidade plástica para cada mistura. Foi utilizado o rotor do tipo “vane” de quatro pás com 22,0 mm de

diâmetro, e bêquer serrilhado de 26,0 mm de diâmetro. As rotinas e parâmetros utilizados nos ensaios serão detalhados na sequência.

Para a obtenção da taxa de escoamento estática (τ_{0s}) foi aplicada uma taxa de cisalhamento mínima, com crescimento linear entre 0,001 e 0,050 s^{-1} durante 90 segundos, com leitura da tensão efetuada a cada 0,5 segundo. O objetivo de submeter a amostra a este intervalo de cisalhamento é obter o valor mínimo que deve ser aplicado ao material para iniciar o fluxo a partir do seu repouso. Portanto a taxa de escoamento estática considerada para cada amostra foi o valor máximo compreendido neste intervalo de 90 segundos. Os ensaios foram realizados para os tempos de 5, 20, 40 e 60 minutos.

Após a realização desta primeira rotina de ensaio, foram determinadas a tensão de escoamento dinâmica e as viscosidades aparente e plástica das pastas, gerando uma curva de fluxo das amostras. A rotina consistiu em (i) Aplicação de uma taxa de cisalhamento crescente com variação linear de 0 a 100 s^{-1} ao longo de 180 segundos, correspondente à porção ascendente da curva (ii) manutenção da taxa de 100 s^{-1} por 30 segundos; (iii) aplicação de uma taxa de cisalhamento decrescente com variação linear de 100 a 0 s^{-1} ao longo de 180 segundos, correspondente à parte descendente da curva de fluxo. Durante todo o procedimento, a tensão aplicada pelo reômetro foi medida a cada 0,5 segundo.

Os valores de τ_{0d} foram obtidos a partir da porção decrescente da curva de fluxo, ajustada com modelo reológico de Bingham (Equação 7) e Herschel-Bulkley (Equação 8) por meio do software Data Manager (RheoWin).

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (7)$$

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (8)$$

Sendo τ_0 é a tensão de cisalhamento (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (1/s), μ é a viscosidade (Pa.s), K é a constante de consistência e n é o índice pseudoplástico.

A medição da viscosidade aparente foi medida a partir da Equação (9), utilizando-se a parte descendente da curva de fluxo, gerando para cada argamassa um gráfico de η em função de $\dot{\gamma}$.

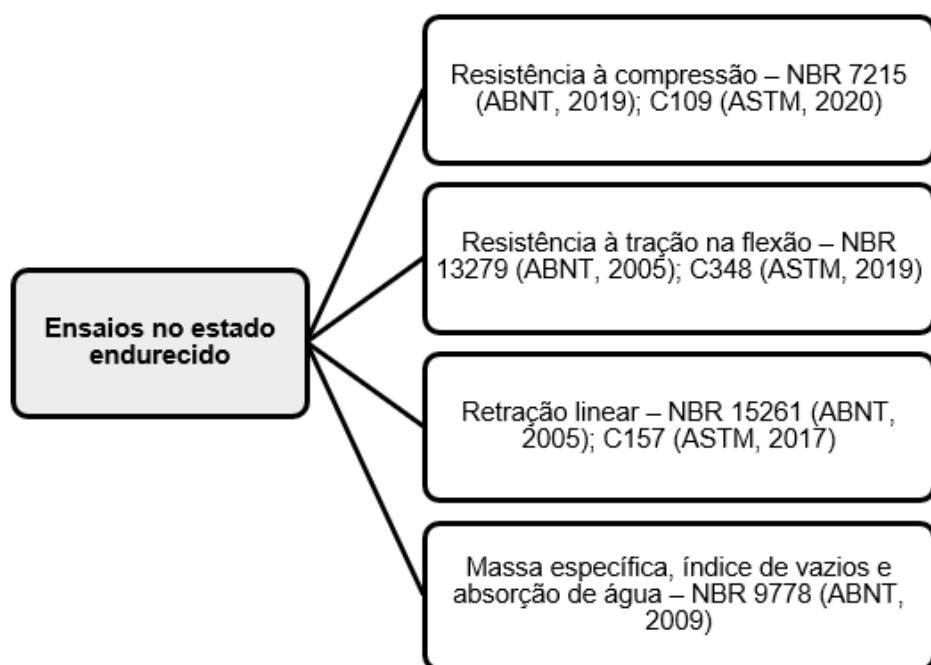
$$\eta = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (9)$$

3.6.2. Ensaios no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido foram realizados para avaliar as resistências a compressão e a tração na flexão, retração linear, massa específica, índice de vazios e absorção de água.

A Figura 24 abaixo apresenta os ensaios que foram realizados no estado endurecido e suas respectivas normas.

Figura 24 - Fluxograma de ensaios no estado endurecido



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.6.2.1. Retração linear

Com o objetivo de analisar a estabilidade dimensional das argamassas, foi utilizado o ensaio normatizado pela NBR 15261 (ABNT, 2005). O ensaio consistiu em analisar linearmente a expansão ou retração de argamassas até o tempo de cura de 28 dias.

Figura 25 - Equipamento para medição retração linear



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

3.6.2.2. Determinação da Resistência à tração e à compressão

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão foram preparados três corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada traço, ensaiados com 1, 7 e 28 dias de idade.

Para a realização do ensaio de resistência à flexão foram moldados dois corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada idade e mistura, 1 e 28 dias de cura.

3.6.2.3. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas no estado endurecido foram realizados através de dois corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada argamassa ensaiada, seguindo os procedimentos da NBR 9778.

3.7. EFEITOS DE ALTAS TEMPERATURAS NO GEOPOLÍMERO

O estudo do efeito de altas temperaturas no concreto teve por finalidade investigar a resistência à compressão residual após a exposição a elevadas temperaturas. Para realização deste ensaio, foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos com 2,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura para a argamassa T2M1.

Os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente após desforma de 1 dia. Os moldes foram aquecidos em um forno do tipo mufla, com taxa de aquecimento de 10°C/min, o que corresponde ao valor médio aproximado da taxa de aquecimento nos primeiros 120 minutos da curva de incêndio-padrão, definida pela ISO 834 (ISO, 1999). Uma vez atingido o patamar de temperatura desejado, os corpos de prova foram mantidos nesta temperatura durante 60 minutos, seguindo as recomendações do RILEM 129 (Rilem, 1995). As temperaturas analisadas foram: 400°C, 600°C e 800°C.

3.8. SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS

Com o objetivo de validar as argamassas sob a ótica da sustentabilidade do material, premissa adotada pela maioria dos estudos sobre o tema, foi utilizado o modelo proposto no artigo *Environmental Impact Assessment for Performance-Oriented Geopolymer Concrete (Talaat; Emad; Kohail, 2023). Este artigo apresenta equações para estimar as emissões de CO₂, NO_x e SO_x em geopolímeros. As equações são baseadas em estudos publicados a partir de 2015, que apresentam as emissões médias, mínimas e máximas de cada componente do geopolímero. No entanto, o modelo possui limitações, pois não considera os efeitos locais: transporte, tipo de energia e combustível utilizados, fatores que podem influenciar os resultados finais.

Primeiramente foi calculado o traço em massa de cada material para 1m³ de cada mistura, utilizando-se as equações 10 e 11:

$$F = \frac{1}{\sum(\frac{\text{Proporção do componente}}{\text{Massa específica do componente}})} \quad (10)$$

Sendo F o fator de proporção das massas do traço para cada 1 m³

$$\text{Massa do componente} = \text{Proporção do traço} \times F \quad (11)$$

A massa de cada componente foi multiplicada pela sua respectiva emissão, conforme apresentado na Tabela 7. No caso dos ativadores, foi multiplicado o valor da massa encontrada da solução pelo teor de sólidos (sóluto). Devido a ausência de valor específico de emissão de poluentes pelo hidróxido de potássio (KOH), foi utilizado o valor do hidróxido de sódio (NaOH) para ambos.

Tabela 7 - Emissão média de CO₂, SO_x e NO_x por material

Emissão CO ₂ (kg. CO ₂ /m ³)	Emissão CO ₂ (kg. CO ₂ /m ³)	Emissão SO _x (g.SO _x /m ³)	Emissão NO _x (g. NO _x /m ³)
Escória Granulada de alto forno	0,0217	0,0809	0,9190
Metacaulim	0,2575	1,0300	0,3200
Hidróxido de Sódio	1,5333	7,0400	3,8800
Hidróxido de Potássio	1,5333	7,0400	3,8800
Silicato de Sódio alcalino	1,1493	4,6990	3,6060
Cimento Portland	0,8449	0,1220	1,5500
Agregado miúdo	0,0028	0,0086	0,0059

Fonte: Elaborado pelo Autor a partir dos dados de Taalat (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados do desenvolvimento do experimento para obter argamassas autonivelantes para contrapiso. Inicialmente, estão apresentados os resultados da caracterização dos materiais, seguido da avaliação das argamassas nos estados fresco e endurecido e, por fim, a análise da sustentabilidade.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Caracterização da areia

Após a realização do ensaio de granulometria, conforme estabelecido pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), foi determinado que a areia utilizada nas argamassas possui um módulo de finura igual a 1,06 e um diâmetro máximo dos grãos de 1,18 mm, conforme apresentado na Tabela 8. A areia foi classificada como agregado miúdo fino, uma vez que seu módulo de finura é inferior a 2,40. Além disso, a massa específica da areia é de 2,35 g/cm³, e a massa unitária aparente encontrada foi de 1,49 g/cm³. A Tabela 8 apresenta um resumo detalhado da caracterização da areia utilizada nas argamassas avaliadas, enquanto a Tabela 9 mostra os resultados obtidos no ensaio de peneiramento.

Tabela 8 - Resumo propriedades da areia

Módulo de finura (MF)	Diâmetro máximo dos grãos	Massa específica	Massa unitária
1,06	1,18mm	2,35 g/cm ³	1,49 g/cm ³
NBR 248	NBR248	NBR 16916	NBR 16916

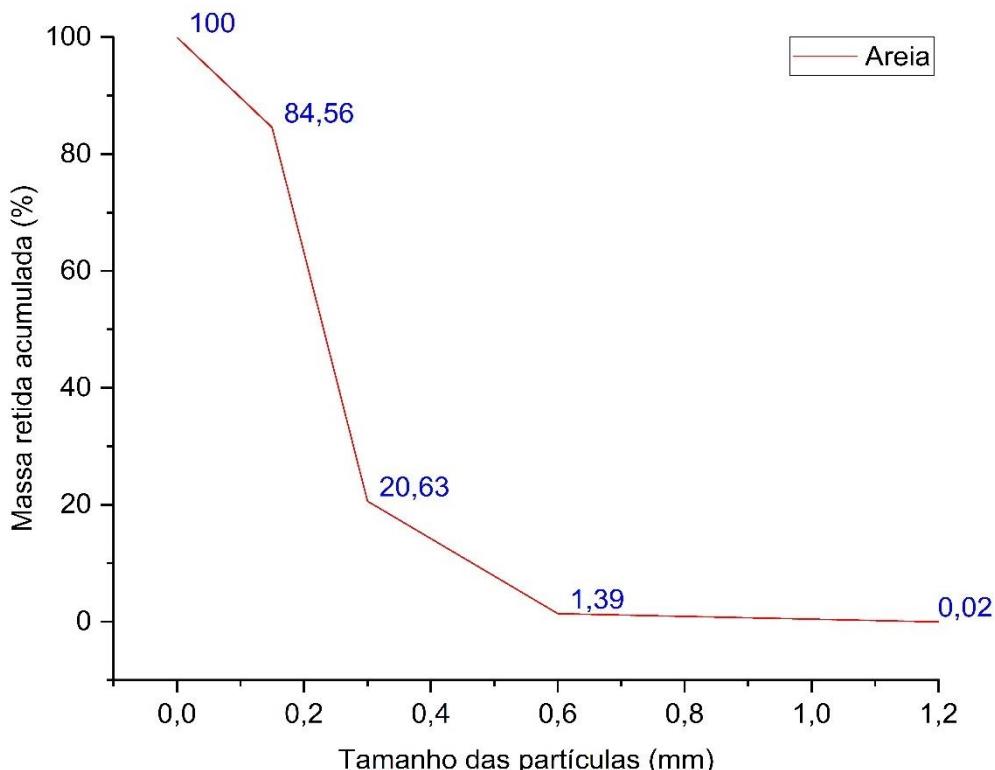
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Tabela 9 - Ensaio de granulometria da areia

Granulometria do agregado miúdo – NBR NM 248 (ABNT,2003)								
Abertura da malha das peneiras	a) Massa retida (g)	300,00	Massa retida (%)		Variações +- 4%	Massa retida Média	Massa retida Acumulada	
	b) Massa inicial seca (g)	300,00	Ensaio A	Ensaio B				
	Massa retida (g)		Massa retida (%)					
	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B		(%)	(%)	
9,5	0	0	0,00%	0,00%	0,00%			
6,3	0	0	0,00%	0,00%	0,00%			
4,75	0	0	0,00%	0,00%	0,00%			
2,36	0	0	0,00%	0,00%	0,00%			
1,18	0,07	0,04	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	
0,6	3,99	4,24	1,33%	1,41%	0,08%	1,37%	1,39%	
0,3	57,73	57,72	19,24%	19,24%	0,00%	19,24%	20,63%	
0,15	193,2	190,36	64,40%	63,45%	0,95%	63,93%	84,56%	
Fundo	45,01	47,64	15,00%	15,88%	0,88%	15,44%	100,00%	
Mt Total	300	300	Módulo de Finura			1,06		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 26 – Distribuição granulométrica da areia



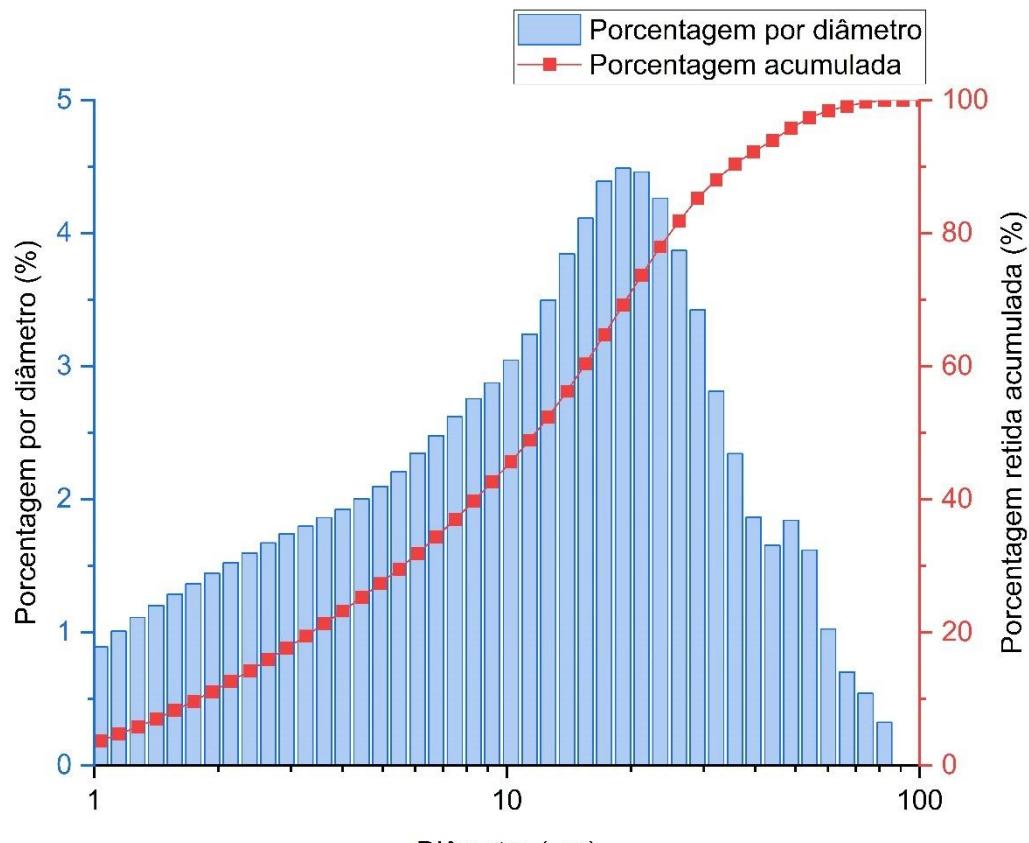
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.1.2. Caracterização dos precursores

Para a determinação da granulometria dos precursores, foi utilizado o método de difração a laser. O MC apresentou o diâmetro máximo dos grãos de 74 μm . A distribuição granulométrica do material é ilustrada na Figura 27, em que se observa que 10% das partículas possuem dimensões inferiores a 1,85 μm , enquanto 90% das partículas apresentam dimensões inferiores a 56,09 μm .

Figura 27 - Distribuição granulométrica do MC

10	%D(μm)	20	%D(μm)	30	%D(μm)	40	%D(μm)	50	%D(μm)
1,85		3,61		6,19		9,43		13,47	
60	%D(μm)	70	%D(μm)	80	%D(μm)	90	%D(μm)		
18,05		23,86		33,89		56,09			

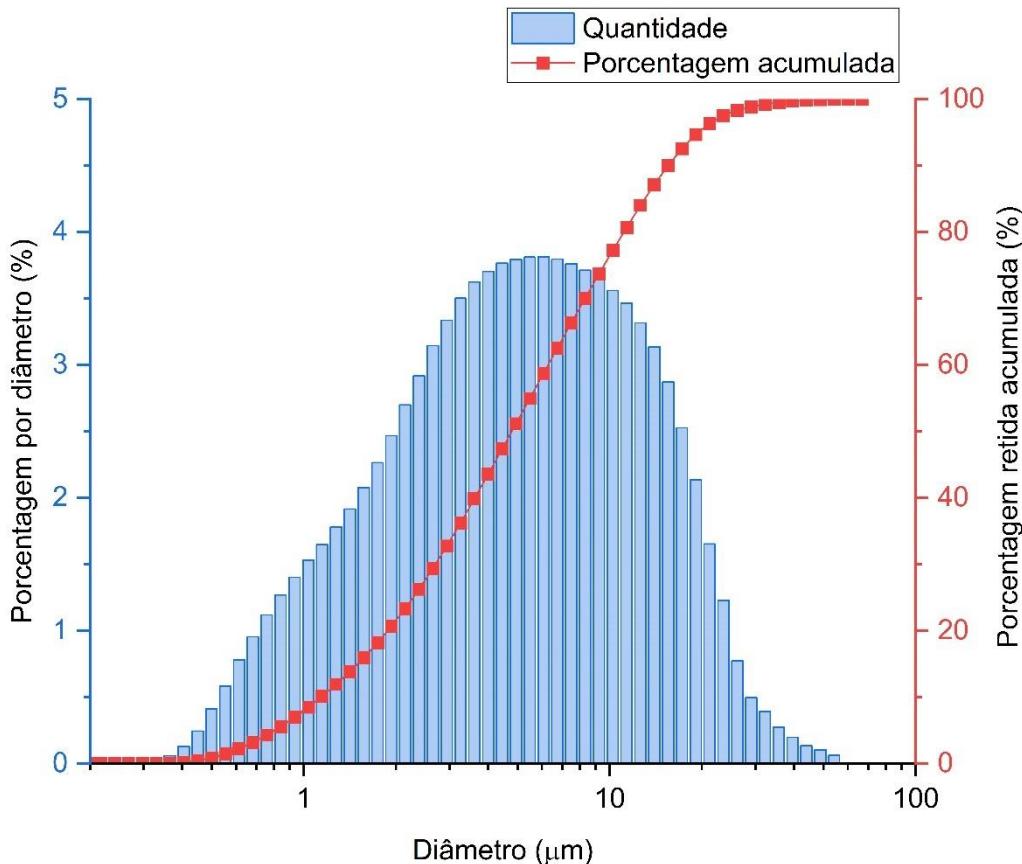


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A EGAF apresentou diâmetro máximo dos grãos de 19,12 μm . A distribuição granulométrica do material é ilustrada na Figura 28, em que se pode observar que

10% das partículas possuem dimensão inferior a 1,32 μm e 90% das partículas possuem dimensão inferior a 15,51 μm .

Figura 28 - Distribuição granulométrica da EGAF



10	%D(μm)	20	%D(μm)	30	%D(μm)	40	%D(μm)	50	%D(μm)
1,32		2,48		3,76		5,32		7,19	
60	%D(μm)	70	%D(μm)	80	%D(μm)	90	%D(μm)		
9,61		12,64		16,65		23,31			

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A massa específica obtida através do frasco volumétrico de Le Chatelier para o MC natural foi de 2,73 g/cm³ e 3,02 g/cm³ para a EGAF.

A análise química da fluorescência de raios-X (FRX) indicou que a EGAF é constituída principalmente por CaO (óxido de cálcio) e SiO₂ (dióxido de silício). Os resultados encontrados para o MC e a EGAF estão listados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 - Análise química por FRX da Escória Granulada de alto forno

Material (%)	Escória Granulada de alto forno		
Autor	Alrefaei <i>et al.</i> (2020)	Asghari <i>et al.</i> (2023)	O Autor
CaO	66,90	38,50	64,31
SiO ₂	18,90	36,50	19,80
Al ₂ O ₃	6,43	11,00	9,77
SO ₃	1,97	0,30	1,45
TiO ₂	1,88	1,50	1,36
Fe ₂ O ₃	0,74	1,00	1,18
MnO	-		0,98
MgO		7,80	
K ₂ O	1,81	0,80	0,51
SrO	0,08		0,435
ZrO ₂	-		0,128
Y ₂ O ₃	-		0,035
Na ₂ O		0,65	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Tabela 11 - Análise química por FRX do Metacaulim

Material (%)	Metacaulim		
Autor	(Wan <i>et al.</i> 2019)	(Istuque <i>et al.</i> 2019)	O Autor
SiO ₂	52,80	58,39	52,74
Al ₂ O ₃	43,70	35,47	35,15
Fe ₂ O ₃	0,60	2,71	5,52
MgO	0,20	0,30	

(continua)

(continuação)

Material (%)	Metacaulim		
	Autor (Wan et al. 2019)	(Istuque et al. 2019)	O Autor
CaO		0,01	
TiO ₂	0,50	1,51	3,59
SO ₃	-	-	0,89
K ₂ O	1,20	1,44	0,79
Outros	-	-	2,98

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

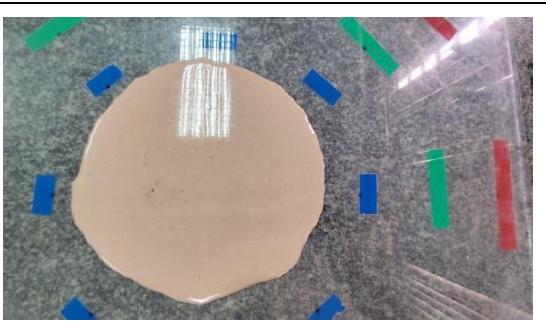
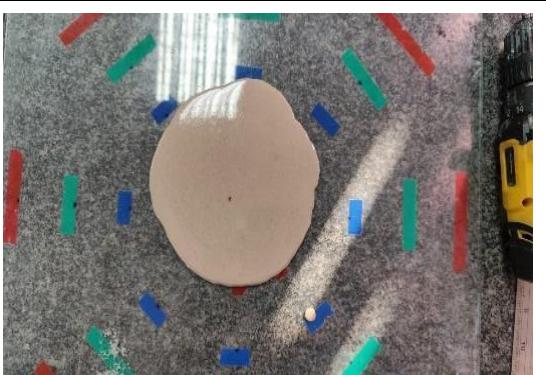
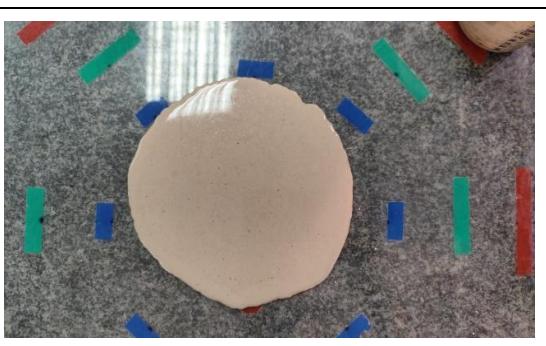
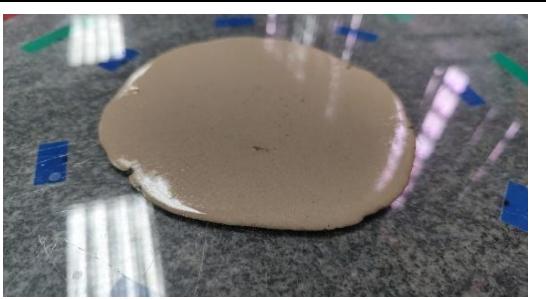
4.2. FASE 1 – DOSAGEM DAS ARGAMASSAS TRAÇO T1

A primeira fase do experimento consistiu em preparar três traços de argamassa, variando a molaridade nas seguintes concentrações: 5M, 7,5M e 10M, com o objetivo de avaliar os critérios de fluidez e resistência estabelecidos inicialmente.

Quanto à fluidez inicial, a norma C1708 (ASTM, 2019) recomenda que o diâmetro de espalhamento esteja entre 125 mm e 150 mm. As argamassas preparadas com 5M, embora apresentassem boa coesão e não sofressem segregação, atingiram um espalhamento superior ao máximo permitido, ultrapassando o limite normativo de 15 cm. Por outro lado, as argamassas com 7,5M e 10M atenderam aos requisitos normativos de espalhamento, cumprindo, portanto, o critério de fluidez da mistura.

A Tabela 12 apresenta um resumo das principais características das argamassas avaliadas.

Tabela 12 - Resumo das principais características das argamassas estudadas

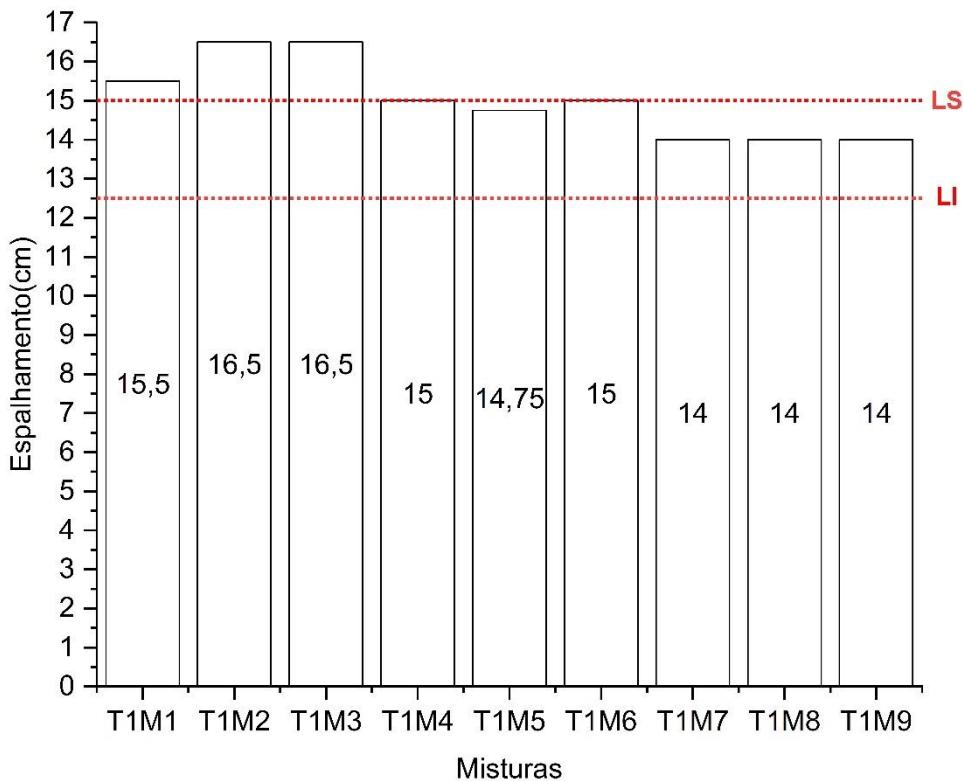
<p>T1M1 Diâmetro de espalhamento:15,50 cm A Argamassa apresentou fluidez superior ao diâmetro máximo de escoamento.</p>	
<p>T1M2 Diâmetro de espalhamento:16,50 cm A Argamassa apresentou fluidez superior ao diâmetro máximo de escoamento.</p>	
<p>T1M3 Diâmetro de espalhamento:16,50 cm A Argamassa apresentou fluidez superior ao diâmetro máximo de escoamento.</p>	
<p>T1M4 Diâmetro de espalhamento:15,00 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento e sem segregação.</p>	
<p>T1M5 Diâmetro de espalhamento:14,75 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento e sem segregação.</p>	

<p>T1M6 Diâmetro de espalhamento:14,75 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento e sem segregação.</p>	
<p>T1M7 Diâmetro de espalhamento:14,00 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento e sem segregação.</p>	
<p>T1M8 Diâmetro de espalhamento:14,00 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento</p>	
<p>T1M9 Diâmetro de espalhamento:14,00 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento</p>	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 29 apresenta os valores de espalhamento obtidos para cada mistura. As linhas horizontais na figura indicam o intervalo exigido pela norma, dentro do qual a argamassa autonivelante é considerada aceitável.

Figura 29 – Espalhamento

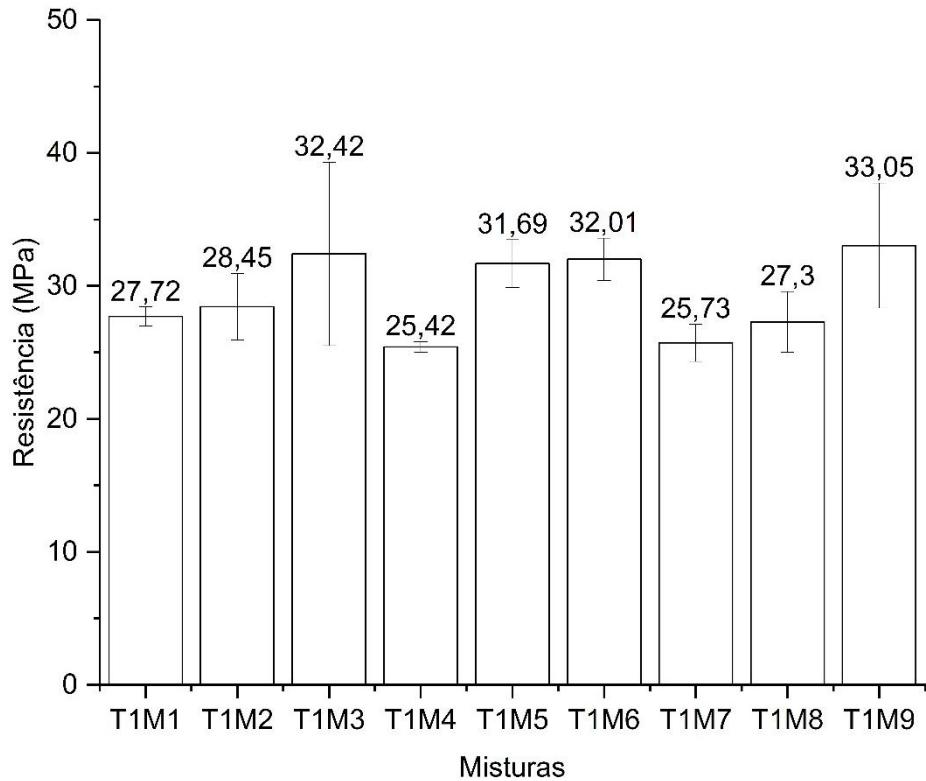


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Em relação à resistência à compressão, apenas as argamassas T1M3, T1M5, T1M6 e T1M9 atenderam ao critério estabelecido para resistência à compressão (mínimo 30 MPa). Comparativamente, o estudo interlaboratorial "ILS N° 349" da norma C1708 (ASTM, 2016) apresentou uma resistência média aos 7 dias de $32,01 \pm 1,08$ MPa. A resistência observada nas argamassas foi influenciada pela composição dos materiais, com destaque para o fato de que as menores resistências foram obtidas nas argamassas com maior percentual de MC. Por outro lado, o aumento percentual de escória resultou em um ganho de resistência para a mesma molaridade. A Figura 30 apresenta os resultados obtidos, permitindo uma análise comparativa da influência de diferentes porcentagens de MC e EGAF nas propriedades mecânicas das argamassas.

Portanto, a partir dos critérios estabelecidos inicialmente, foram excluídas as argamassas T1M1; T1M2 e T1M3 visto o não atendimento a fluidez requerida pela norma. As argamassas T1M4, T1M7 e T1M8 não atenderam o critério mínimo de resistência à compressão (30 MPa). As argamassas T1M5; T1M6 e T1M9 atenderam ambos os critérios e foram analisadas na Fase 2.

Figura 30 - Resistência a compressão aos 7 dias



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.3. FASE 2 – ARGAMASSAS SELECIONADAS TRAÇO T1

4.3.1. Retenção de fluxo e tempo de regeneração

As argamassas foram avaliadas no ensaio de retenção de fluxo, realizado 30 minutos após o preparo, e no ensaio de tempo de regeneração, o qual necessitou de adaptações em relação à recomendação normativa. Durante o ensaio, foram realizados cortes com intervalo de 1 hora a partir da primeira marcação de referência, sendo o intervalo reduzido para 30 minutos a partir da terceira hora do ensaio. Essa alteração foi necessária devido à morosidade observada no início do endurecimento da argamassa, conforme identificado em testes realizados previamente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Ensaio tempo de regeneração

<p>T1M5 Apresentou tempo de regeneração de 3 horas e 30 minutos.</p>	
<p>T1M6 Apresentou tempo de regeneração de 3 horas.</p>	
<p>T1M9 Apresentou tempo de regeneração de 4 horas.</p>	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O ensaio de retenção de fluxo é uma análise importante para as argamassas autonivelantes, embora a norma C1708 (ASTM, 2019) não estabeleça limites mínimos ou máximos específicos para esse parâmetro. A análise dessa propriedade nos três traços de argamassa revelou que, entre as argamassas avaliadas, apenas a argamassa T1M6 apresentou variação no espalhamento após 30 minutos da realização do ensaio, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Tempo de regeneração

Mistura	Inicial	30 min
T1M5	14,70	14,70
T1M6	15,00	14,00
T1M9	14,00	14,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.3.2. Tempo de pega

Os resultados do tempo de pega obtidos com o aparelho de Vicat para as três argamassas analisadas estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Tempo de pega das argamassas

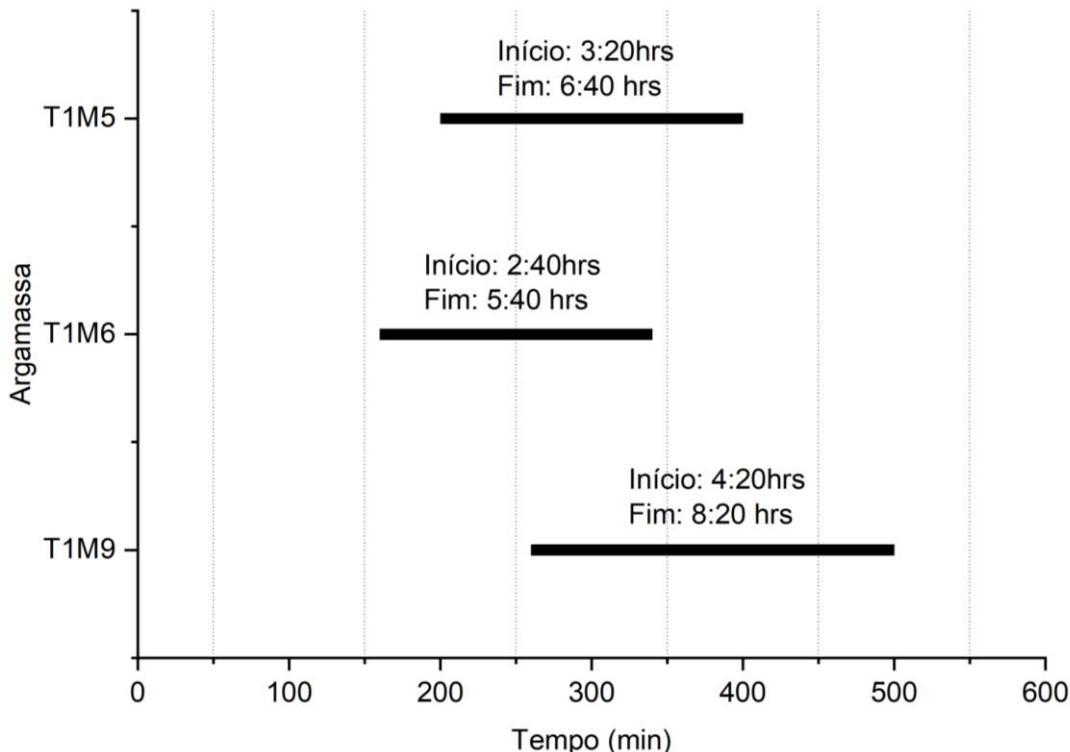
Argamassa	Tempo de Início de pega (h:min)	Tempo de Fim de pega (h:min)	Diferença (h:min)
T1M5	3:20	6:40	3:20
T1M6	2:40	5:40	3:00
T1M9	4:20	8:20	4:00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com estes resultados, pode-se observar que o menor tempo de início de pega registrado é o da argamassa T1M6, seguido do tempo de início de pega da argamassa T1M5. As argamassas T1M5 e T1M6, que possuem a mesma molaridade do ativador, apresentaram valores próximos na diferença entre o tempo de início e fim de pega.

Na análise dos tempos de fim de pega, nota-se que a argamassa T1M9 apresentou tempo consideravelmente superior às demais, resultando em um tempo de fim de pega 47% maior que o da T1M6.

Figura 31 - Tempo de pega das argamassas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

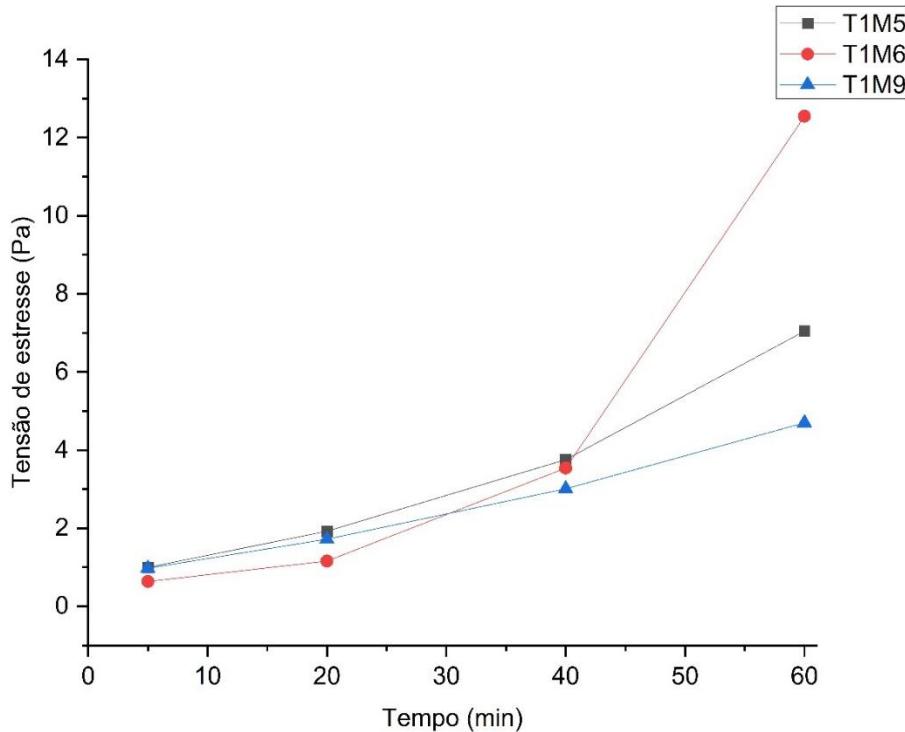
De acordo com os autores Gasperi *et al.* (2021), o aumento do teor de álcalis na solução ativadora tende a prolongar o tempo em que a pasta mantém uma trabalhabilidade adequada para ser manipulada. Os autores também destacam que sistemas ativados com potássio podem ser vantajosos quando são necessários períodos mais longos de trabalhabilidade, como no caso de transporte de material até o local de aplicação, dado que o intervalo de tempo em aberto da argamassa é maior, assim como o tempo de início de pega.

4.3.3. Reologia

O ensaio reológico permitiu avaliar a tensão de escoamento e a viscosidade das argamassas ao longo de análises realizadas para cada mistura, nos intervalos de: 5, 20, 40 e 60 minutos. As tensões de escoamento estática foram determinadas sob condições de taxa de cisalhamento controlada, sendo aferido o maior valor do ensaio

para cada tempo. A Figura 32 ilustra como cada argamassa se comporta durante o processo de endurecimento e a consequente redução da trabalhabilidade.

Figura 32 - Taxa de estruturação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Além disso, as taxas de estruturação das argamassas apresentaram consistência com os resultados do ensaio de tempo de pega. Isso sugere que as argamassas que possuem menor tempo de pega também têm maior tendência a apresentar uma estruturação mais acelerada, o que impacta diretamente na trabalhabilidade ao longo do tempo. De acordo com Jiang *et al.* (2018) a tensão de escoamento corresponde à mínima tensão de cisalhamento necessária para que o material inicie o fluxo e a deformação, sendo decorrente das forças adesivas e friccionais entre as partículas.

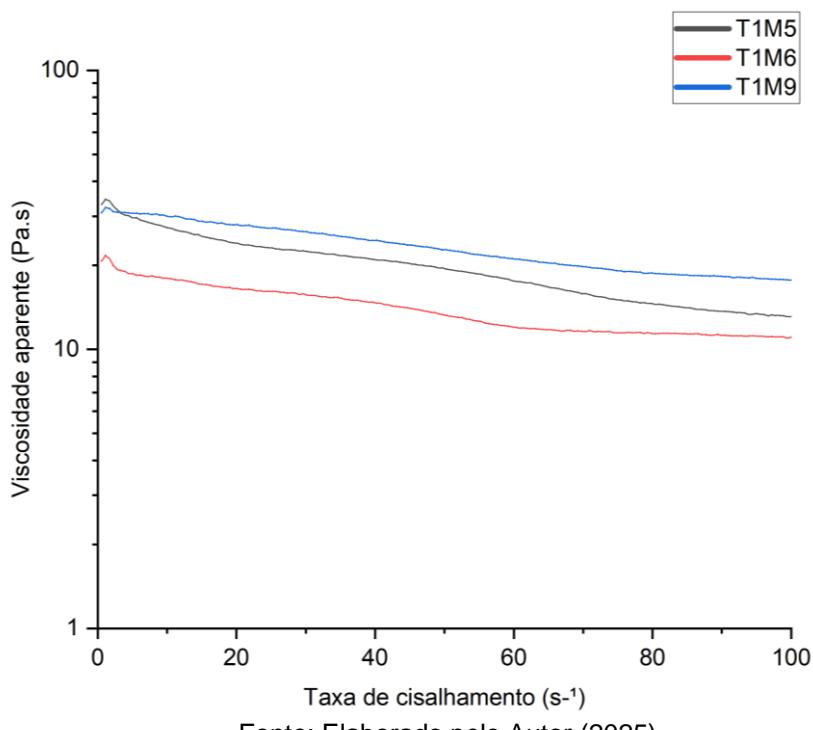
Entre as composições analisadas, destaca-se a T1M6, que apresentou o maior valor de perda de trabalhabilidade. Em sua aplicação como argamassa, este comportamento reforça que deve se atentar ao tempo de aplicação e transporte ao canteiro de obra.

A Figura 33 apresenta a viscosidade ou resistência ao fluxo das argamassas no tempo de ensaio de 20 minutos. Diferentemente do observado na tensão de escoamento, a argamassa T1M9 apresentou a maior viscosidade ao final do ensaio.

No estado fresco, o uso de maiores molaridades do ativador, tende a aumentar a viscosidade da mistura, o que está relacionado à reação mais rápida associada ao alto pH e alta área superficial das partículas precursoras. Segundo Souayfan *et al.* (2023) com relação à razão H₂O/Na₂O, quanto menor o valor, menos água disponível e, consequentemente maior a viscosidade.

Diante dos resultados obtidos é possível verificar que o aumento da molaridade afeta negativamente a viscosidade nas pastas de geopolímeros estudadas.

Figura 33 - Viscosidade aparente

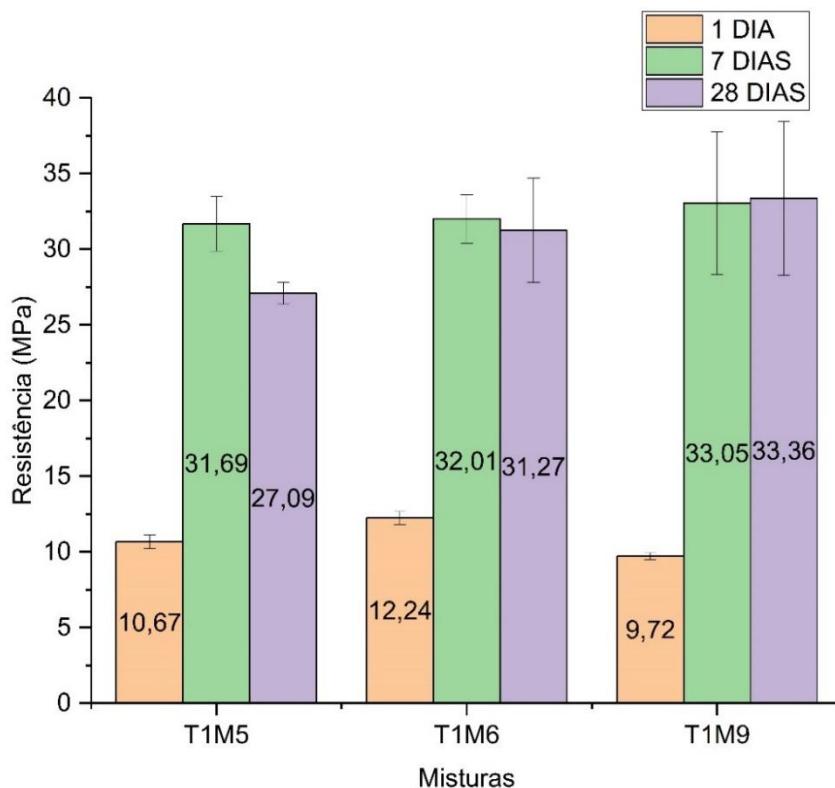


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.3.4. Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas autonivelantes foi mensurada após 1, 7 e 28 dias do preparo. Foram confeccionados 9 corpos de prova cilíndricos de 2,5 x 5cm para cada uma das quatro argamassas definidas, sendo rompidos 3 para cada idade. Os resultados das médias com seus respectivos desvios padrão das resistências estão apresentados na Figura 34.

Figura 34 - Resistência a compressão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Utilizando-se como referência o estudo denominado ILS Nº 349, realizado com 5 réplicas de argamassas autonivelantes comerciais, nas idades de 1, 7 e 28 dias. A resistência média à compressão registrada nestes estudos com 1 dia foi de 21,76 MPa, com 7 dias 32,01 MPa e aos 28 dias 39,15 MPa.

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que a resistência não aumenta significativamente após os 7 dias, permanecendo-se praticamente constante até os 28 dias, sendo que na T1M5 ocorreu até mesmo a redução da resistência.

Com o objetivo de verificar se os valores de resistência diferem entre si, foi realizada análise estatística de variância (ANOVA), com um nível de significância (α) de 5%, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Análise de variância

Variável	Soma dos quadrados			Graus de Liberdade			Estatística F			p-valor		
	1 dia	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
1 dia	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
Tratamento	7,09	2,68	61,27	2	2	2	2,04	0,13	2,4	0,21	0,88	0,17
Resíduos	10,42	51,42	76,37	6	6	6						
Total	17,51	54,11	137,65	8	8	8						

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com o p-valor $> \alpha$ (p-valor $> 0,05$) para todas as idades, verifica-se que não existem diferenças significativas entre as médias das resistências à compressão em todas as idades.

4.3.5. Resistência a tração na flexão

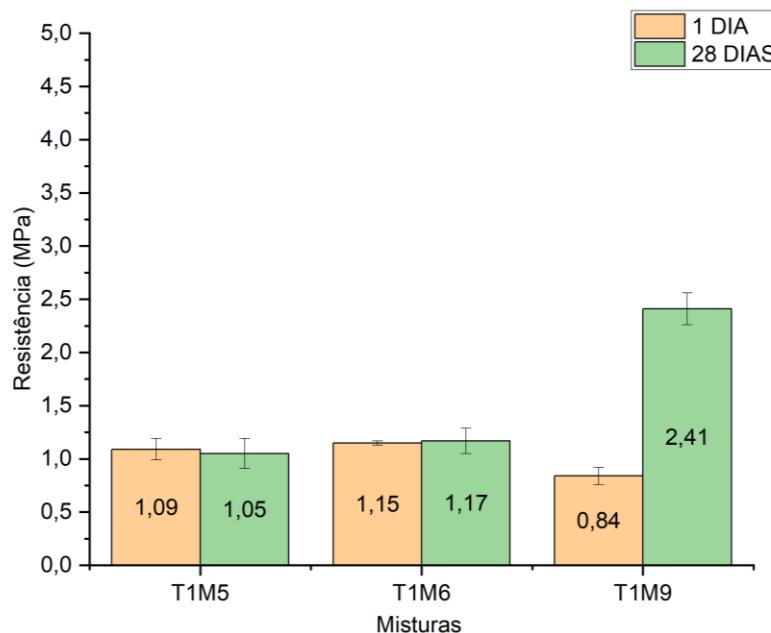
Para os ensaios de resistência à tração na flexão, foram produzidos 4 corpos de prova para cada mistura. A resistência foi determinada aos 1 e 28 dias, sendo rompidos 2 corpos de prova por argamassa em cada idade. Os valores médios dos resultados obtidos estão apresentados na Figura 36.

Figura 35 - Corpo de prova prismático geopolimérico



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Figura 36 - Resistência à Tração na flexão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Comparativamente ao estudo ILS N° 349 da norma C1708 (ASTM, 2019) realizado com 5 réplicas de argamassas autonivelantes comerciais, com resistências de 4,45 MPa com 01 dia e 7,45 MPa com 7 dias. As argamassas avaliadas nestas idades tiveram valores significativamente menores.

A resistência à tração na flexão dos geopolímeros pode ser influenciada por vários fatores, como a composição do ativador alcalino, o processo de cura e a quantidade de água na mistura.

Com o objetivo de verificar se os valores de resistência diferem entre si, foi realizada análise estatística de variância (ANOVA), com um nível de significância (α) de 5%, conforme Tabela 17.

Tabela 17 - Análise da variância para resistência à tração na flexão

	Soma dos quadrados		Graus de Liberdade		Estatística F		p-valor	
	1 d	28 d	1 d	28 d	1 d	28 d	1 d	28 d
Tratamento	0,15	3,23	2	2	7,25	41,41	0,025	0,0007
Resíduos	0,06	0,19	6	5				
Total	0,22	3,43	8	7				

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com o p-valor $< \alpha$ ($p\text{-valor} > 0,05$) para todas as idades, verifica-se que existem diferenças significativas entre as médias das resistências à compressão.

A Tabela 18 apresenta os resultados do teste de Tukey, que complementa a análise de variância ao avaliar as diferenças entre as combinações das médias dos grupos em dois momentos: com 1 dia de idade e com 28 dias de idade

Tabela 18 - Teste de Tukey para resistência à tração na flexão

	Idade	Diferença	Limite inferior	Limite Superior	p-valor
T1M6-T1M5	1 dia	0,06	-0,19	0,32	0,72
T1M9-T1M5	1 dia	-0,24	-0,49	0,01	0,06
T1M9-T1M6	1 dia	-0,30	-0,56	-0,04	0,02
T1M6-T1M5	28 dias	0,12	-0,46	0,71	0,78
T1M9-T1M5	28 dias	1,36	0,83	1,88	0,0009
T1M9-T1M6	28 dias	1,23	0,64	1,82	0,002

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com 1 dia de idade houve diferença significativa entre os grupos T1M9-T1M6 ($p=0,02$), com a diferença de média (-0,30) ficando fora do intervalo de confiança, indicando significância estatística.

Aos 28 dias de idade foram observadas diferenças significativas entre os grupos: T1M9-T1M5 ($p=0,0009$) e T1M9-T1M6 ($p=0,002$). Os resultados sugerem que as principais diferenças significativas estão associadas a argamassa T1M9, especialmente aos 28 dias de idade.

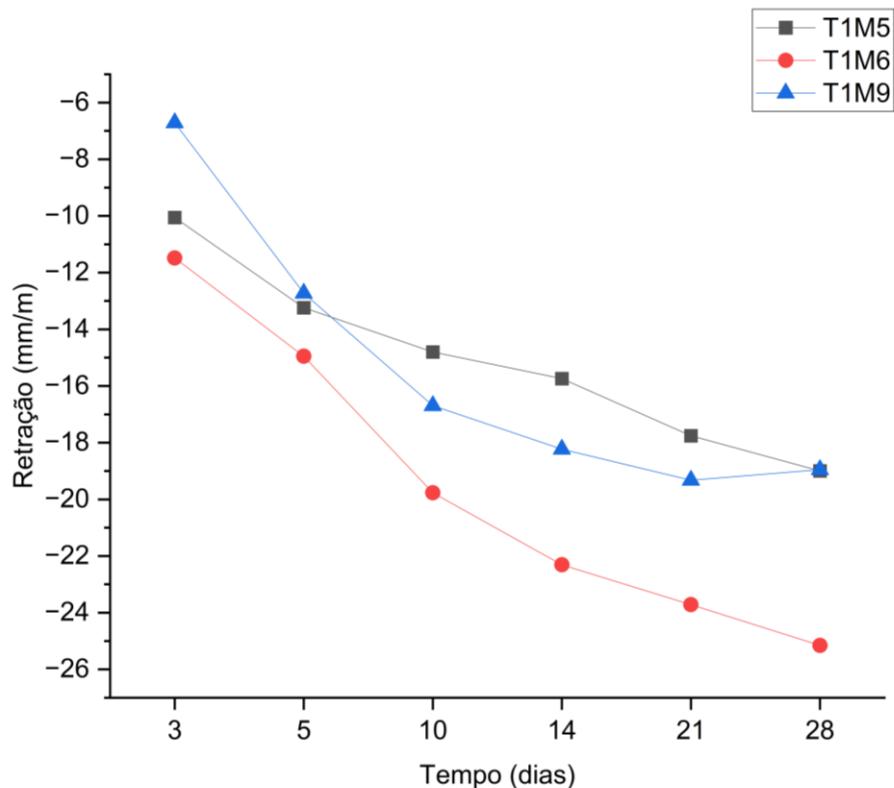
4.3.6. Retração linear

O referido ensaio é o mais desafiador para a argamassa geopolimérica. As alterações volumétricas que ocasionam retração ou expansão são decorrentes das reações e da movimentação de água na mistura. A perda de água pode ocorrer para o meio externo ou devido ao seu consumo nas reações.

A retração linear acima de valores estabelecidos ocasiona fissuras, que podem comprometer a durabilidade destes materiais. O ensaio de retração linear foi realizado para as 3 misturas, sendo produzidos 2 corpos de prova para cada. Os resultados

estão apresentados na Figura 37. Os valores negativos indicam retração e os positivos expansão. Dentre as argamassas avaliadas, a argamassa T1M6 apresentou o maior valor de retração linear.

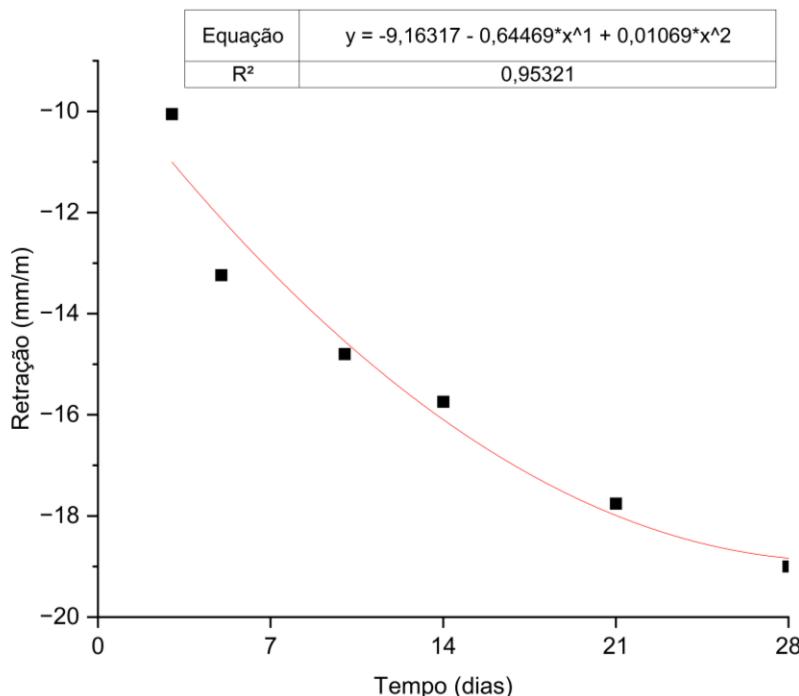
Figura 37 - Retração Linear



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A Figura 38 mostra a retração linear ao longo do tempo para a argamassa T1M5. Inicialmente, a retração aumenta rapidamente até os primeiros 14 dias, e então reduz a intensidade, com uma leve tendência a se aproximar de um valor máximo a partir do dia 21. A curva é ajustada usando uma função quadrática, que reflete o comportamento não-linear da retração, mostrando uma desaceleração no início seguida de uma estabilização. O R^2 próximo a 1 indica boa aproximação do modelo não-linear para descrever o comportamento da retração.

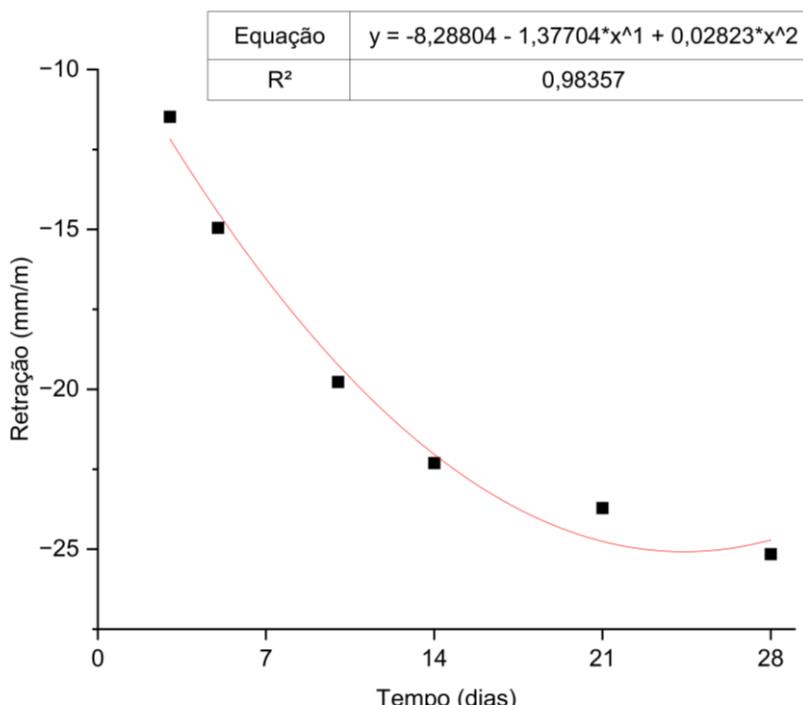
Figura 38 - T1M5 Retração linear



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

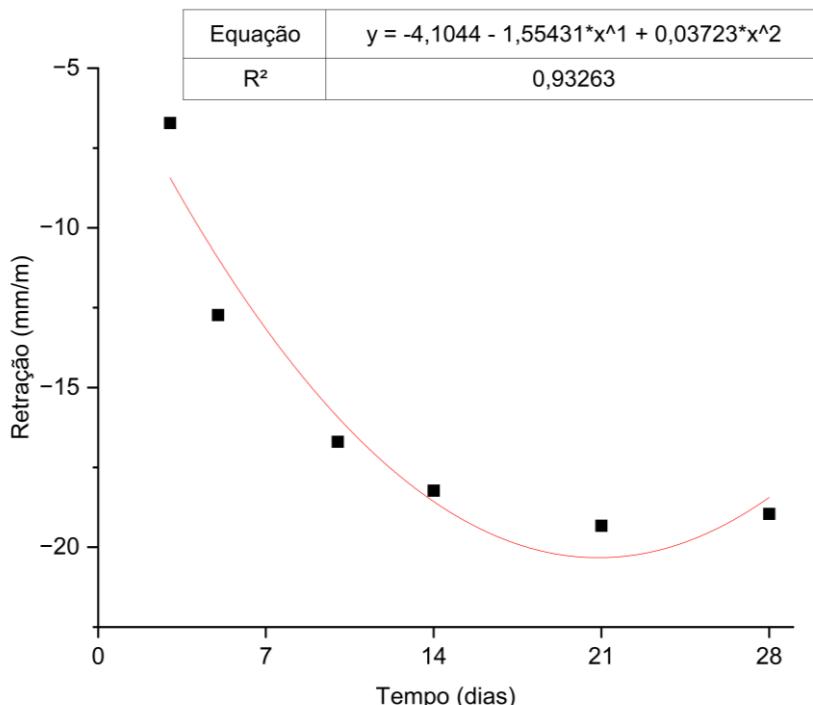
As Figuras 39 e 40 apresentam a retração linear para as argamassas T1M6 e T1M9, que seguem um padrão semelhante ao T1M5, com uma acentuada retração nos primeiros dias seguida de uma tendência de estabilização. A curva ajustada reflete bem a desaceleração da retração ao longo do tempo.

Figura 39 - T1M6 Retração Linear



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Figura 40 - T1M9 Retração Linear



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

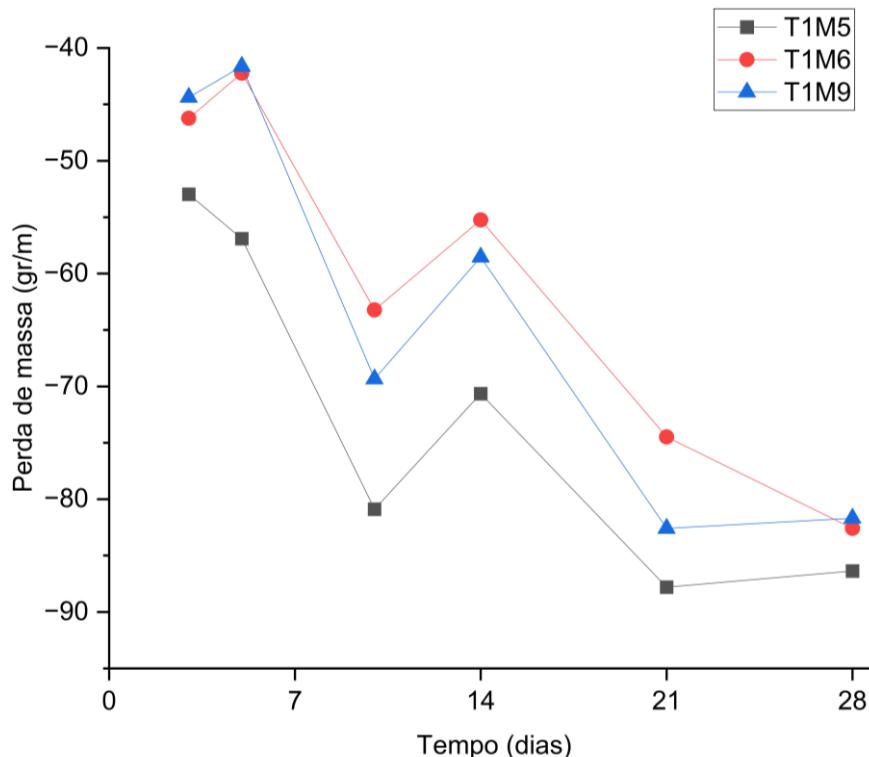
Para todas as argamassas (T1M5, T1M6, T1M9), a função quadrática se mostra um bom modelo para os dados de retração linear, especialmente porque a retração tende a diminuir de forma não-linear ao longo do tempo. A análise gráfica e a equação ajustada fornecem uma base sólida para entender o comportamento de retração das argamassas ao longo do tempo, sendo útil para prever como as argamassas irão se comportar em diferentes idades.

Foi observado no experimento que a alta relação de água na argamassa pode levar a uma maior evaporação de água durante a secagem, aumentando a retração. A quantidade de água da argamassa deve ser controlada, porque somente uma baixa quantidade da água de argamassa permanece na rede geopolimérica como água intersticial, enquanto um excesso considerável de água não ligada ou livre pode evaporar e formar grandes vazios no produto final (Riahi *et al.*, 2020).

No estudo elaborado pelos autores Al-Majidi *et al.* (2016), foi observado que os cimentos geopoliméricos à base de EGAF apresentaram alta resistência. Contudo, os autores destacaram problemas como o tempo de pega acelerado, a trabalhabilidade insuficiente e os elevados valores de retração.

Foi realizada também a verificação da perda de massa das argamassas ao longo do tempo, verificando-se que a maior variação ocorre durante os 10 primeiros dias para as 3 argamassas analisadas, conforme é apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Perda de massa



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.3.7. Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Foram determinadas a massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias das três argamassas autonivelantes avaliadas, sendo produzidos 2 corpos de prova para cada ensaio. Os resultados médios encontrados estão na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Mistura	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica (g/cm³)
T1M5	10,78	21,37	1,99
T1M6	11,73	22,29	1,90
T1M9	10,85	20,85	1,92

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Júnior (2016) encontrou valor de absorção de água de 10,09% e massa específica de 1,80 g/cm³ no estado fresco, inferiores aos resultados encontrados neste trabalho.

De acordo com Wang *et al.* (2021), o teor de água na solução ativadora é um parâmetro crucial, pois ele afeta diretamente a formação da estrutura interna do geopolímero. Teores excessivos de água podem resultar em uma maior porosidade, o que prejudica a resistência mecânica do material. O estudo sintetizou geopolímeros com diferentes teores de água de 34,35% (10M) a 43,97% (15M), e o efeito do teor inicial de água no comportamento dos poros e na estrutura do gel do geopolímero foi investigado. À medida que o teor de água na síntese aumentava, a resistência à compressão do geopolímero diminuía significativamente de 40,3 MPa para 10,2 MPa.

4.4. FASE 3 – TRAÇO ALTERNATIVO

A partir da análise dos resultados obtidos na Fase 2, foram identificados pontos de melhoria para a elaboração do traço alternativo. Os pontos principais a serem melhorados são a eflorescência e a retração da argamassa, pois são fatores que apresentaram a fragilidade do material para o uso proposto, podendo afetar diretamente a sua durabilidade, aparência e resistência ao longo do tempo.

Hasnaoui *et al.* (2019) comentam que a formação de eflorescência pode ser significativamente reduzida ao aumentar tanto a razão molar SiO₂/Na₂O da solução ativada quanto a quantidade de MC, em detrimento da EGAF.

Portanto, foram realizados ensaios buscando-se diminuir a relação A/S do geopolímero, aumentando-se a relação precursor:ativador com o objetivo de obter uma maior reatividade do material e consequentemente uma menor quantidade de K⁺ e Na⁺ livres do ativador. Além disso foi aumentada a razão molar SiO₂/Na₂O para 8,26.

A formulação adotada foi de 1:0,47:0,25:0,51 em massa (precursores, agregado miúdo, hidróxidos e silicato de sódio), com molaridade da solução ativadora de 7,5 M.

A Tabela 20 a seguir apresenta os traços consolidados do estudo. A relação água:sólido do geopolímero foi reduzida em 30%, enquanto a relação A/S da argamassa teve redução de 7%.

Tabela 20 - Traços consolidados do estudo

	Massa em gramas							Razões Molares				Relação A/S Mistura	Relação A/S (Geopolímero)	
	MC	EGAF	Areia	SS	KOH	NaOH	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	R ₂ O/Al ₂ O ₃	R ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/Na ₂ O	Na ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		
T1M5	50	50	100	80	20	20	0,782	0,593	0,263	24,38	0,158	4,951	0,3254	0,5556
T1M6	40	60	100	80	20	20	0,862	0,635	0,266	24,33	0,164	5,256	0,3254	0,5556
T1M9	40	60	100	80	20	20	0,937	0,771	0,305	21,54	0,178	5,256	0,3095	0,5239
T2M1	40	60	47,2	51,11	12,78	12,78	0,554	0,406	0,179	24,24	0,121	4,590	0,2890	0,3969

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.1. Fluidez inicial

O ensaio de fluidez inicial aplicado ao novo traço apresentou diâmetro de espalhamento de 12,50cm, de acordo com o estabelecido em norma. Em relação ao tempo de regeneração, foi obtida uma maior perda de fluidez em relação ao traço T1, apresentando retenção de fluxo de 1,50cm em 30 minutos. A Tabela 21 apresenta a síntese dos parâmetros analisados.

Tabela 21 - Ensaio de espalhamento

T1M5 Diâmetro de espalhamento: 14,75 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento e sem segregação.	
T1M6 Diâmetro de espalhamento: 14,75 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento e sem segregação.	
T1M9 Diâmetro de espalhamento: 14,00 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento.	

T2M1	Diâmetro de espalhamento: 12,50 cm A argamassa autonivelante atendeu ao requisito necessário de espalhamento.	
-------------	--	--

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.2. Retenção de fluxo e tempo de regeneração

Em relação ao tempo de regeneração, foi obtida uma maior perda de fluidez em relação ao traço T1, apresentando retenção de fluxo de 1,50 cm em 30 minutos.

Tabela 22 - Tempo de regeneração

Argamassa	Inicial	30 min
T1M5	14,70	14,70
T1M6	15,00	14,00
T1M9	14,00	14,00
T2M1	12,50	11,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.3. Tempo de pega

O tempo de pega variou significativamente entre as argamassas comparativamente a nova formulação. A argamassa T2M1 restringiu sua aplicação para aplicações rápidas ou produção e aplicação no próprio canteiro, visto seu tempo de início de pega em 45min e tempo em aberto de apenas 30 minutos.

Tabela 23 - Tempo de pega

Argamassa	Tempo de Início de pega (h:min)	Tempo de Fim de pega (h:min)	Diferença (h:min)
T2M1	0:45	1:15	0:30
T1M5	3:20	6:40	3:20
T1M6	2:40	5:40	3:00
T1M9	4:20	8:20	4:00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.4. Reologia

A taxa de estruturação aumenta com o tempo em todas as misturas, mas com comportamentos diferentes. A argamassa T2M1 apresenta um crescimento exponencial a partir dos 40 minutos, muito superior às outras misturas, indicando dificuldade do seu manuseio a partir deste tempo. Portanto, seu uso pode ser indicado para aplicações rápidas que requerem endurecimento imediato, porém exige-se controle cuidadoso devido ao endurecimento precoce. A Tabela 24 apresenta a taxa de estruturação para as 4 argamassas analisadas.

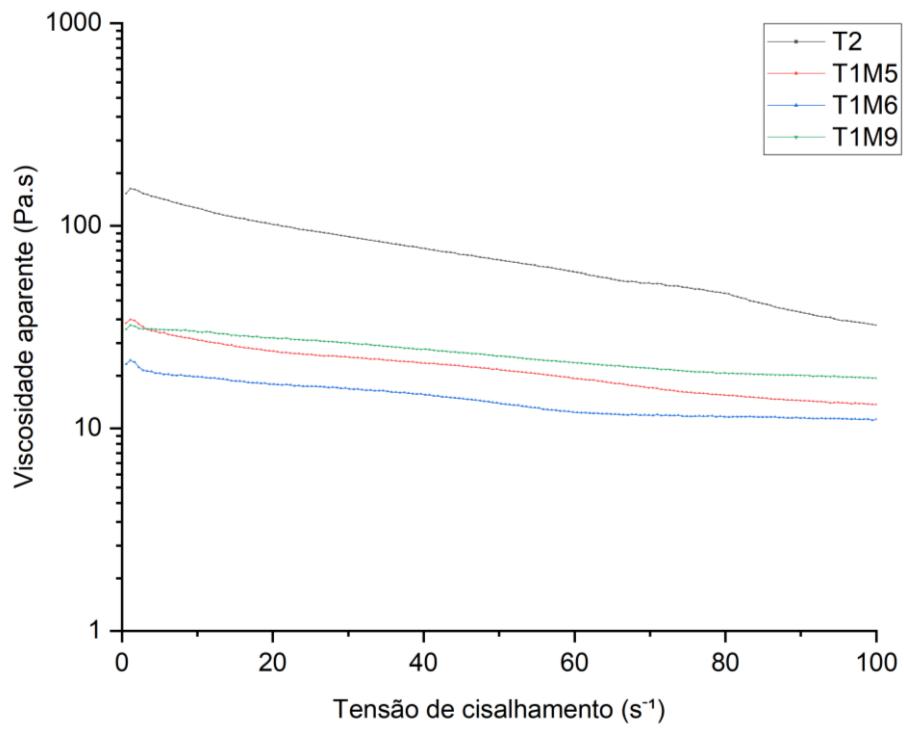
Tabela 24 - Taxa de estruturação

Argamassas	Tempo			
	5 min	20 min	40 min	60 min
T2M1	6,02	9,73	31,63	800,43
T1M5	1,00	1,92	3,75	7,04
T1M6	0,64	1,16	3,54	12,55
T1M9	0,98	1,72	3,01	4,70

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

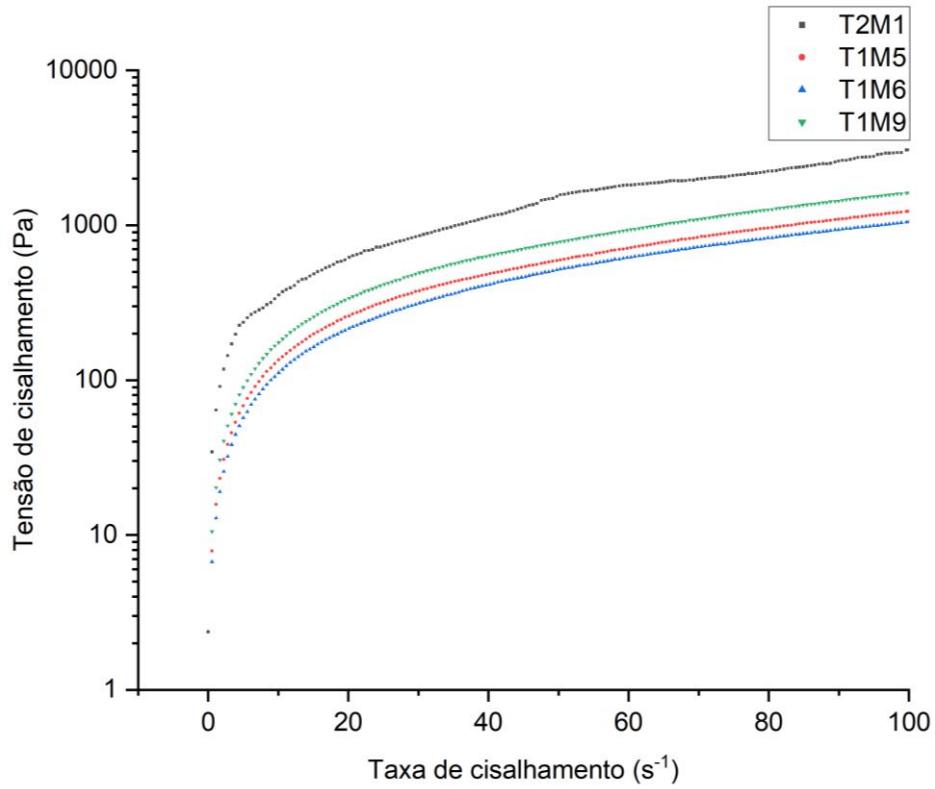
Todas as argamassas apresentam um comportamento típico de fluidos não newtonianos, apresentando diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. O comportamento é conhecido como pseudoplástico. A Figura 42 apresenta a viscosidade aparente das argamassas estudadas.

Figura 42 - Viscosidade aparente das argamassas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Figura 43 - Curva de fluxo das argamassas

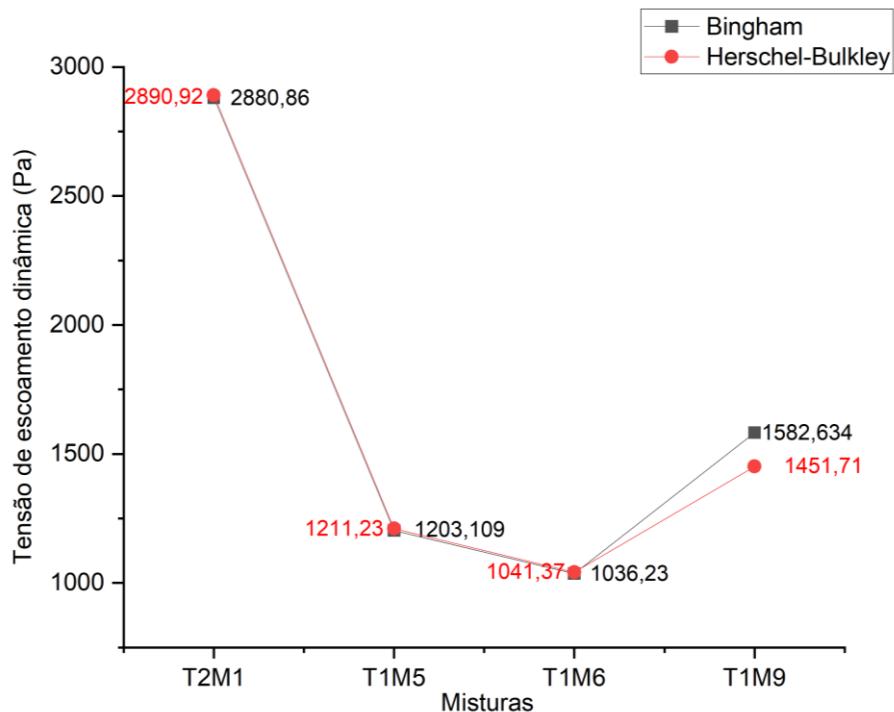


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

As tensões de escoamento dinâmicas foram avaliadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley, os quais apresentaram resultados muito semelhantes, conforme é apresentado na Figura 44. A argamassa T2M1 apresenta a maior tensão de escoamento, indicando alta resistência ao escoamento e menor fluidez, característica de uma argamassa mais viscosa. Já as argamassas T1M5 e T1M6 possuem tensões de escoamento significativamente menores, o que reflete maior fluidez e facilidade de aplicação, sendo a T1M6 a mais fluida entre todas as amostras. A argamassa T1M9, por sua vez, apresenta uma tensão de escoamento intermediária, maior do que M5 e M6, mas ainda menor do que T2M1, combinando características de fluidez e resistência.

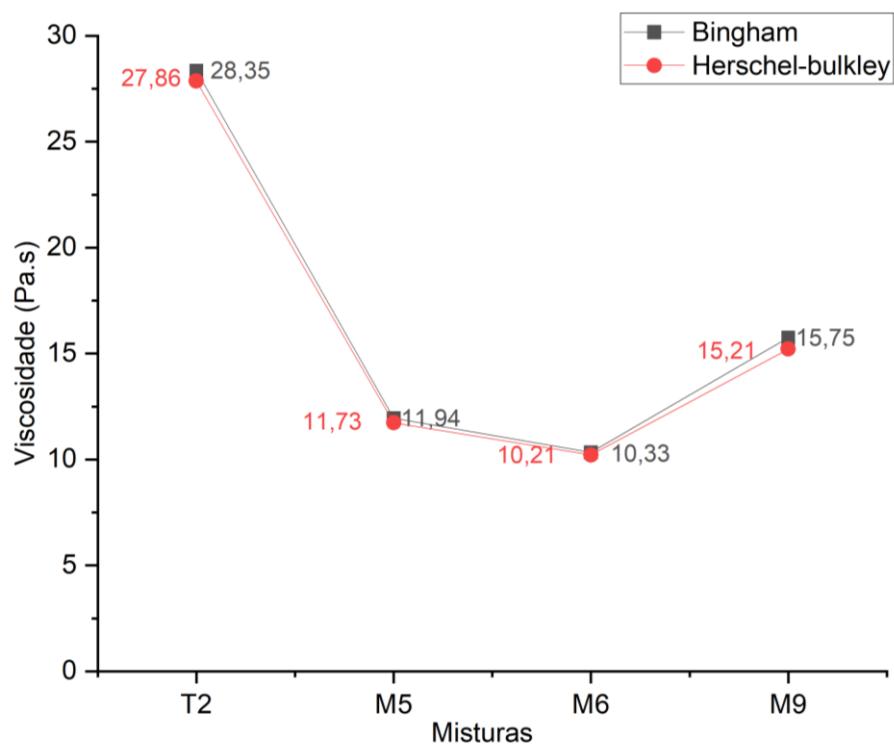
A viscosidade também foi avaliada pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley e apresentaram resultados muito próximos para todas as argamassas, indicando boa consistência na avaliação reológica. A maior viscosidade pode ser atribuída à sua composição que contém uma menor relação A/S e maior reatividade, características que reduzem a fluidez da mistura. A Figura 45 apresenta os resultados obtidos para as quatro argamassas avaliadas. A trabalhabilidade das argamassas geopoliméricas são mais sensíveis que as de CP em relação as mudanças da relação A/S e da quantidade de agregados. No estado plástico, as argamassas ativadas com soluções de silicato de sódio alcalino exibiram maior espalhamento e maior trabalhabilidade do que as argamassas de CP confirmado o efeito fluidificante (Alonso *et al.*, 2017).

Figura 44 - Tensões de escoamento ajustadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Figura 45 - Viscosidade das argamassas ajustadas pelos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley.

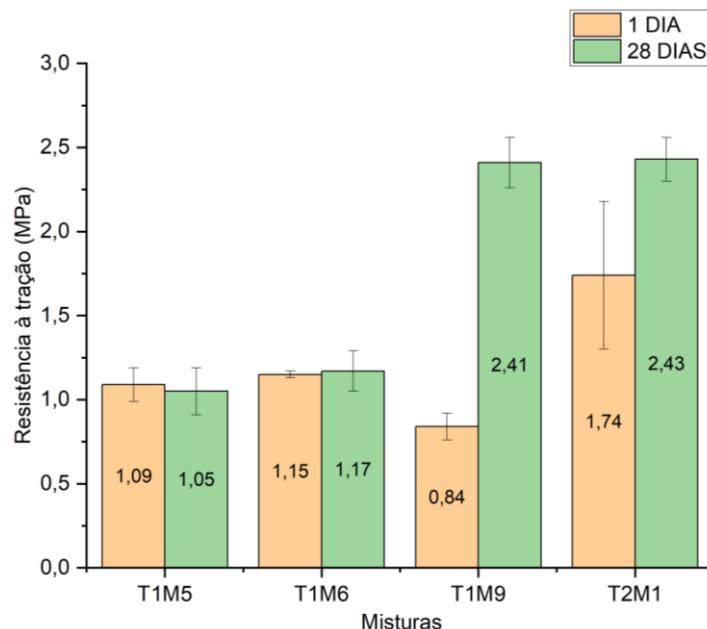


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.5. Resistências a compressão e a tração

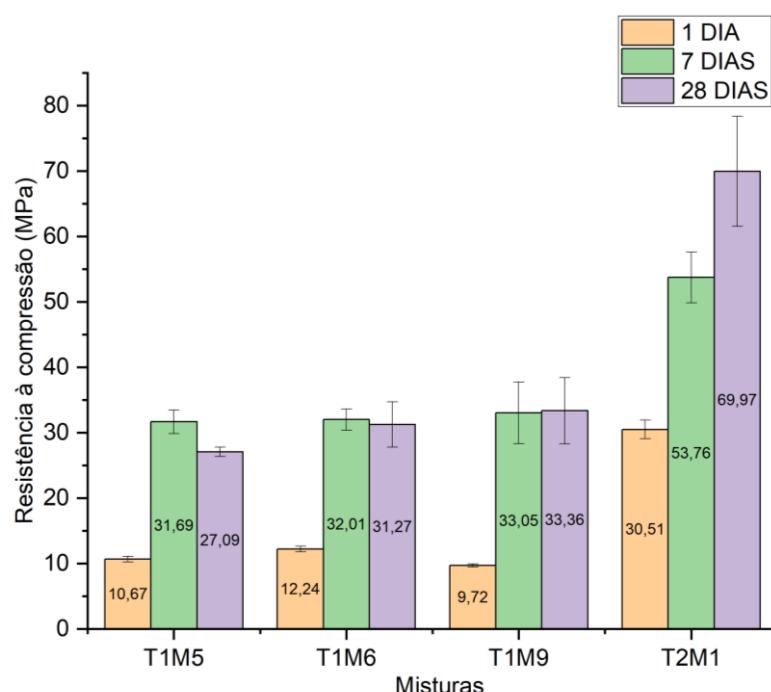
Os melhores desempenhos de resistência à tração na flexão foram aferidos pelas misturas: T1M9 e T2M1, alcançando os melhores valores absolutos. As argamassas T1M5 e T1M6 não apresentam ganho relevante de resistência com o tempo, mantendo-se praticamente estáveis.

Figura 46 - Resistência a tração aos 1 e 28 dias



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Figura 47 - Resistência a compressão aos 1, 7 e 28 dias



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Observa-se, também, que o aumento da relação sólido/líquido na argamassa T2M1 influenciou significativamente a resistência a compressão em relação as demais misturas, apresentando resistência superior a 50% aos 7 e 28 dias em relação as demais.

A alta resistência à compressão da argamassa T2M1, além de ser indicada para argamassas autonivelantes, pode ser aplicada em outro contexto, especialmente em reparos estruturais, como reparos em vigas, pilares, lajes e fundações. Dessa forma, a T2M1 se apresenta como uma opção em diferentes situações de aplicação.

4.4.6. Retração linear

A argamassa T2M1 apresentou os menores valores de retração acumulada em 7 dias, sugerindo melhor comportamento estrutural e menor risco de fissuras. Devido à quebra do suporte do equipamento, não foi possível aferir a retração nos demais dias.

Tabela 25 - Retração linear

Argamassa	Dia 3 (mm/m)	Dia 7 (mm/m)
T1M5	-10,052	-14,017
T1M6	-11,478	-17,358
T1M9	-6,712	-14,71
T2M1	-8,41	-10,506

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.7. Massa específica, índice de vazios e absorção de água

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos de massa específica, índice de vazios e absorção de água, em que não foram obtidas diferenças significativas entre as misturas.

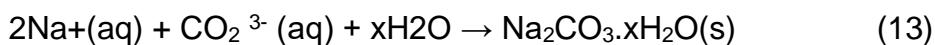
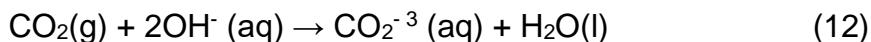
Tabela 26 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Argamassa	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica (g/cm ³)
T1M5	10,78	21,37	1,99
T1M6	11,73	22,29	1,90
T1M9	10,85	20,85	1,92
T2M1	10,95	21,30	1,95

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

4.4.8. Eflorescência

Após 24 horas de exposição ao ar, as argamassas apresentaram a formação de cristais brancos na sua superfície, conforme visto na Figura 48. O fenômeno da eflorescência é desenvolvido a partir da reação do CO₂ atmosférico com o hidróxido presente na mistura. A reação ácido base então é estabelecida conforme as equações (12) e (13) (Zhang *et al.*, 2014). A fase cristalina visualizada visualmente é identificada pelo Na₂CO₃.H₂O, produzindo termonatrito (Simão *et al.*, 2021).

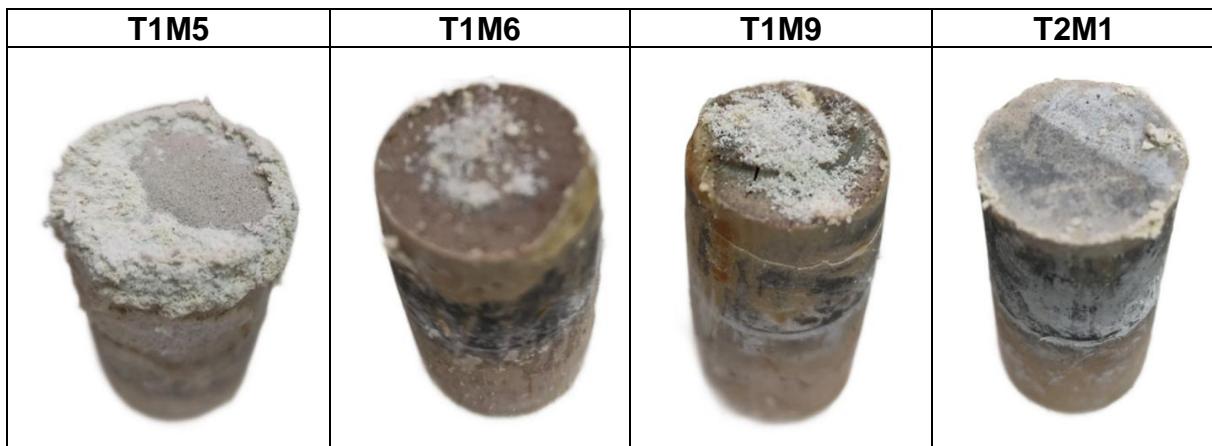


Conforme visualiza-se na equação (9) o fator chave para a ocorrência da eflorescência é a disponibilidade dos íons Na⁺ e OH⁻. A eflorescência potencial da argamassa é observada pela alcalinidade total do lixiviado das amostras, resultantes dos íons OH⁻ e CO₃²⁻ (Simão *et al.*, 2021).

A eflorescência excessiva e carbonatação da superfície podem reduzir a resistência à compressão e a tração do geopolímero formado, portanto o controle da eflorescência é essencial para proporcionar melhor desempenho e durabilidade (Longhi *et al.*, 2021).

A Figura 48 a seguir apresenta o resultado do ensaio de eflorescência dos corpos de prova após 14 dias parcialmente submersos. A argamassa T1M5, há presença evidente de eflorescência na superfície superior, com depósitos uniformes ao redor das bordas e em maior quantidade em relação aos demais. A argamassa T1M6 apresenta menor quantidade de eflorescência visível, com depósitos brancos concentrados em alguns pontos. A argamassa T1M9 mostra eflorescência distribuída na superfície e nas bordas. A argamassa T2M1 apresenta menos eflorescência, com distribuição mais homogênea na superfície do corpo de prova.

Figura 48 - Eflorescência nos corpos de prova após 14 dias



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O estudo realizado por Longhi *et al.* (2021) buscou estratégias para reduzir a eflorescência em geopolímeros, ajustando a quantidade de Silicato de Sódio alcalino (SS) para próximo a 1,5 (MS=1,5). Os geopolímeros formulados com essa quantidade de silicato exibiram maiores resistências a compressão, absorção de água e menor lixiviação alcalina quando comparados a sistemas com módulo menor. A redução da concentração do ativador de 20% para 15% da massa total de Na₂O com módulo MS=1,5 também reduziram a eflorescência, quando comparados ao sistema de referência.

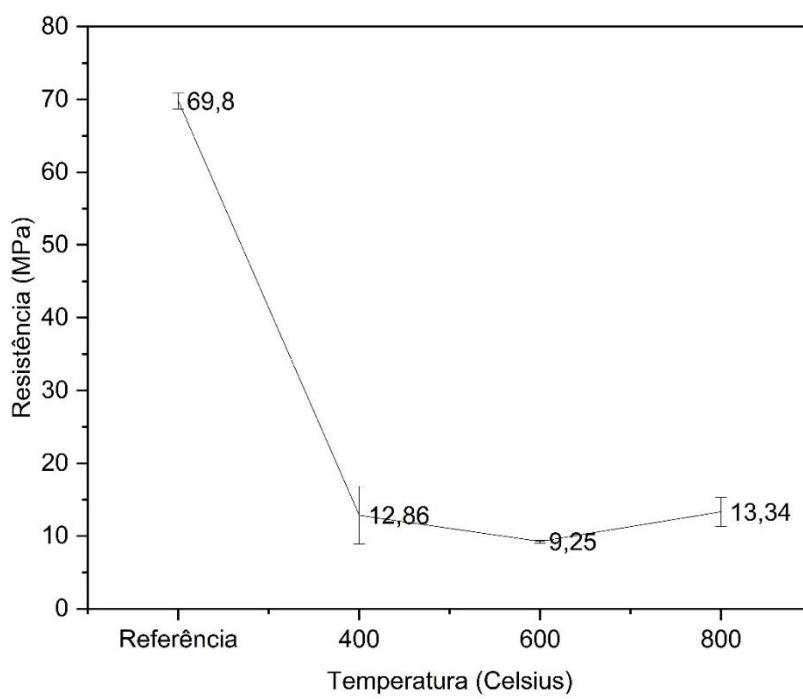
Hasnaoui *et al.* (2019) estudaram o efeito das proporções de EGAF/MC na aparência de eflorescência em corpos de prova cúbicos. A formação de cristais brancos foi mais severa nos sistemas com proporção 75/25 EGAF/MC em comparação com os sistemas 50/50 e 25/75 EGAF/MC. Foi demonstrado que os cátions, no caso da EGAF ativada, não são incorporados estruturalmente, mas são fisicamente absorvidos na superfície da estrutura. Isso explica a maior extensão de eflorescência quando o conteúdo de EGAF é alto. Isso ocorre porque uma relação Al₂O₃/Na₂O mais baixa provoca um excesso de óxido de sódio (Na₂O), que permanece não reagido na argamassa e agrava o problema de eflorescência (Temuujin e Riessen, 2008).

4.5. FASE 4 – RESISTÊNCIA À ALTAS TEMPERATURAS

4.5.1. Resistência ao fogo

O ensaio de resistência ao fogo realizado no intervalo de 400°C a 800°C demonstrou uma redução acentuada na resistência ao atingir 400°C, seguida por uma estabilização relativa entre 400°C e 800°C. A queda significativa em relação ao valor de referência indica que o material sofre um colapso estrutural importante quando submetido a temperaturas elevadas. A Figura 49 apresenta os resultados obtidos.

Figura 49 - Resistência ao fogo



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com o objetivo de verificar se os valores de resistência submetidos a diferentes temperaturas diferem entre si, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Os resultados estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Análise de variância

	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Estatística F	p-valor
Tratamento	19,93	2	1,49	0,35
Resíduos	20,01	3		
Total	39,94	5		

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Com um p-valor de 0,35, que é maior que o nível de significância adotado ($p > 0,05$), conclui-se que não há diferenças estatisticamente significativas entre os valores de resistência para os tratamentos analisados. Isso indica que, no intervalo de temperaturas estudado (400 a 800°C), a exposição ao fogo não resultou em diferenças significativas entre as resistências.

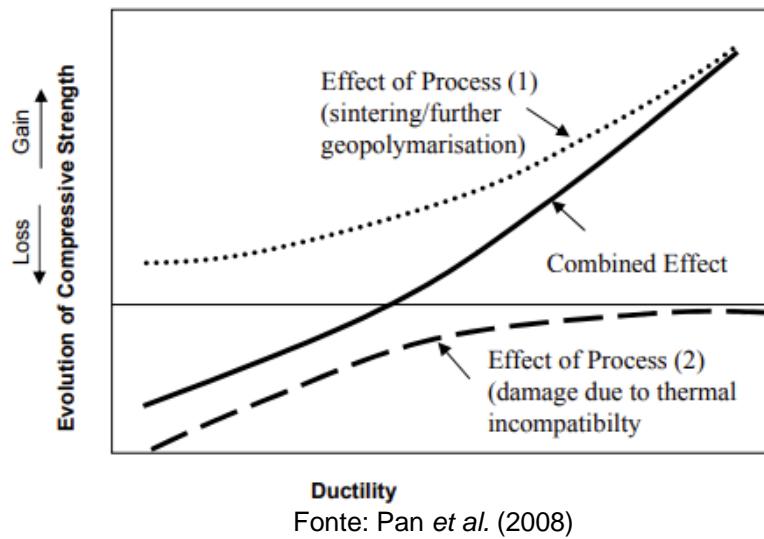
Figura 50 - Corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas

			
Referência	400°C	600°C	800°C

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

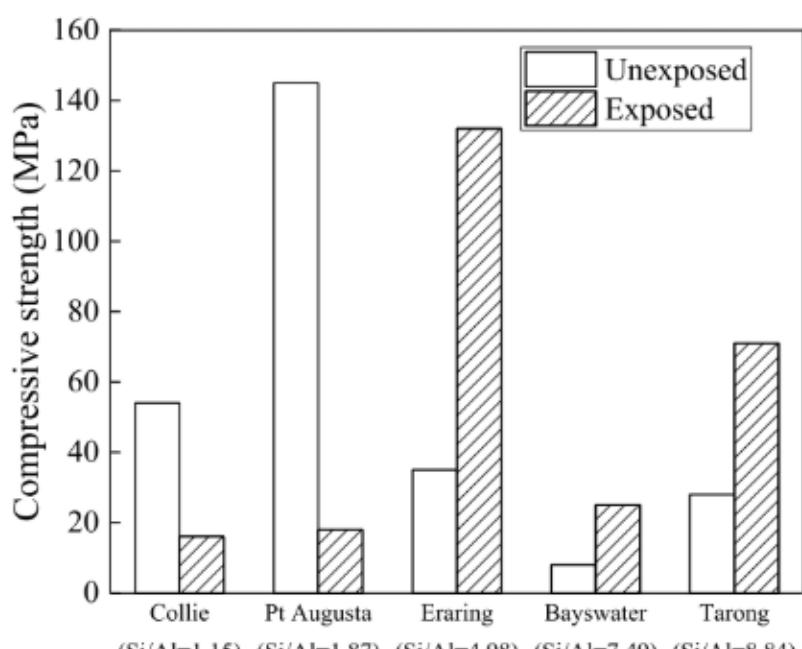
Conforme Pan *et al.* (2008) há dois processos paralelos que determinam o ganho ou perda final de resistência após a exposição á altas temperaturas: dano por desidratação, a incompatibilidade térmica e a cristalização resultam na perda de resistência do geopolímero, enquanto a resistência aumenta devido à reação de geopolimerização adicional. Geralmente, o concreto geopolimérico com resistência à compressão inicial mais baixa tem maior ductilidade e se comporta melhor do que os de maior resistência sob altas temperaturas.

Figura 51 – Diagrama dos dois processos paralelos de ganho e perda de resistência à elevadas temperaturas



A mudança de resistência devido a fonte do precursor utilizado, em que geopolímeros sintetizados a partir de cinzas volantes com uma alta razão Si/Al (≥ 5) apresentaram ganho de resistência e maior estabilidade dimensional durante o aquecimento. No entanto, aqueles com baixa razão Si/Al (≤ 2) exibiram perda de resistência e redução na estabilidade dimensional após exposição a 1000°C (Liu *et al.*, 2024). A Figura 52 representa a mudança de comportamento quando varia-se a relação Si/Al.

Figura 52 - Resistência ao fogo geopolímero submetido a temperatura de 1000°C



Fonte: Liu *et al* (2024)

Segundo os mesmos autores a seleção de agregados ou fibras com boa estabilidade térmica ajuda a melhorar a resistência a altas temperaturas do concreto geopolimérico. O agregado leve, por exemplo, tem bom desempenho térmico devido à baixa condutividade térmica e baixa razão de expansão térmica dos agregados leves. A adição de fibras no concreto geopolimérico ajuda a inibir a retração térmica e a propagação de trincas induzidas pela temperatura por meio do efeito de ponte das fibras, e assim melhora a resistência mecânica do concreto geopolimérico sob altas temperaturas, especialmente para a resistência à flexão.

4.6. SUSTENTABILIDADE DAS MISTURAS

Primeiramente foi calculado o consumo de cada material por m³, utilizando-se as equações (10) e (11). Os resultados estão apresentados na Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 - Massa específica dos materiais

Material	Massa específica (kg/m ³)
Escória Granulada de alto forno	3020,00
Metacaulim	2730,00
Hidróxido de Sódio	1260,00 (7,5M)
Hidróxido de Potássio	1326,00 (7,5M)
Silicato de Sódio alcalino	1585,00
Agregado miúdo	2350,00

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Tabela 29 - Consumo de materiais por m³ de argamassa geopolimérica

Componente	T1M5 (kg/m ³)	T1M6 (kg/m ³)	T1M9 (kg/m ³)	T2M1 (kg/m ³)
Escória Granulada de alto forno	314,76	378,54	382,41	562,69
Metacaulim	314,76	252,36	254,94	375,12
Hidróxido de Sódio	125,90	126,18	127,47	119,85
Hidróxido de Potássio	125,90	126,18	127,47	119,85
Silicato de Sódio alcalino	503,61	504,73	509,88	479,31
Agregado miúdo	629,51	630,91	637,35	442,65

Fonte: Elaborado pelo Autor a partir dos dados de Taalat (2022)

A obtenção da emissão dos poluentes foi obtida multiplicando-se os coeficientes da Tabela 7 pelo consumo dos materiais. O silicato de sódio alcalino (SS) é o maior contribuinte, representando mais da metade da emissão total em todas as misturas, sendo um possível alvo para otimização ou substituição em formulações mais sustentáveis em outros estudos.

Em termo absoluto, a argamassa T1M9 apresenta a maior emissão total (499,84 kg CO₂), enquanto a argamassa T1M6 tem a menor (464,28 kg CO₂). A emissão total de CO₂ é apresentada na Tabela 30.

Tabela 30 - Emissão de CO₂ (kg.CO₂/m³)

Material	T1M5	T1M6	T1M9	T2M1
Escória Granulada de alto forno	6,83	8,21	8,30	12,21
Metacaulim	81,05	64,98	65,65	96,59
Hidróxido de Sódio	45,84	45,95	60,97	43,64
Hidróxido de Potássio	61,15	61,28	78,16	58,21
Silicato de Sódio alcalino	279,55	280,17	283,03	266,07
Agregado miúdo	1,76	1,76	1,78	1,23
Densidade	1,99	1,90	1,92	1,95
Emissão total	478,19	464,28	499,84	479,92

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Em relação aos óxidos de enxofre, o Silicato de Sódio alcalino é o maior responsável pelas emissões de SO_x, com valores superiores a 50% em massa da mistura. O agregado miúdo e a EGAF têm contribuições mínimas, com menos de 1% do total. A emissão total de SO_x é apresentada na Tabela 31.

Tabela 31 - Emissão de SO_x (g.SO_x/m³)

Materiais	T1M5	T1M6	T1M9	T2M1
Escória Granulada de alto forno	25,46	30,62	30,94	45,52
Metacaulim	324,20	259,93	262,59	386,38
Hidróxido de Sódio	210,51	210,98	279,98	200,39
Hidróxido de Potássio	280,77	281,39	358,95	267,28
Silicato de Sódio alcalino	1143,00	1145,50	1157,23	1087,90
Agregado miúdo	5,41	5,42	5,48	3,81
Densidade	0,00	0,00	0,00	0,00
Emissão total	1989,35	1933,88	2095,17	1991,23

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Como nas tabelas anteriores, o silicato de sódio alcalino é o maior responsável pelas emissões de NO_x em todas as misturas, seguido pela EGAF e os hidróxidos.

Os resultados obtidos estão de acordo com as observações feitas por Taalat (2022), em sua análise das argamassas pesquisadas quase todas apresentaram emissões nominais de dióxido de carbono mais baixas, contudo emissões mais altas de SO_x e NO_x em comparação com o CP.

Tabela 32 - Emissão de NO_x (g.SO_x/m³)

Materiais	T1M5	T1M6	T1M9	T2M1
Escória Granulada de alto forno	289,26	347,88	351,43	517,10
Metacaulim	100,72	80,76	81,58	120,03
Hidróxido de Sódio	116,01	116,27	154,31	110,44
Hidróxido de Potássio	154,74	155,08	197,83	147,30
Silicato de Sódio alcalino	877,13	879,07	888,05	834,81
Agregado miúdo	3,71	3,72	3,76	2,61
Densidade	1,99	1,90	1,92	1,95
Emissão total	1543,57	1584,70	1678,89	1734,27

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Comparando-se com traços de argamassas autonivelantes de outros trabalhos, Gruber (2021) obteve consumo de 954,25 kg/m³ para argamassa de referência. Freitas *et al.* (2010) obteve consumo semelhante de 928,02 kg/m³. Na tabela 33 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 33 - Emissão de poluentes por traço de cimento

Traços	Emissão de CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)	Emissão de SO _x (g.SO _x /m ³)	Emissão de NO _x (g.NO _x /m ³)
Gruber (2021)	806,24	116,41	1479,08
Freitas <i>et al.</i> (2010)	784,08	113,21	1438,43

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Comparando-se os resultados, concluímos que há redução significativa de emissões de CO₂ (aproximadamente 40%) em comparação ao CP. Porém, há aumento substancial das emissões de SO_x e NO_x, o que pode gerar impactos ambientais adicionais, como chuva ácida e piora na qualidade do ar. Portanto é essencial reduzir ou substituir os ativadores alcalinos, principalmente o silicato de sódio alcalino a fim de consolidar o material como sustentável.

Tabela 34 - Emissão de poluentes consolidada

Traços	Emissão de CO₂ (kg.CO₂/m³)	Emissão de SO_x (g.SO_x/m³)	Emissão de NO_x (g.NO_x/m³)
T1M5	478,19	1989,35	1543,57
T1M6	464,28	1933,88	1584,70
T1M9	499,84	2095,17	1678,89
T2M1	479,92	1991,23	1734,27
Gruber (2021)	806,24	116,41	1479,08
Freitas <i>et al.</i> (2010)	784,08	113,21	1438,43

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma formulação para uma argamassa autonivelante geopolimérica. A formulação inicial mostrou-se promissora no estado fresco, apresentando boa fluidez e sem sinais de exsudação ou segregação. No entanto, durante os ensaios realizados no estado endurecido, surgiram problemas relacionados à retração e eflorescência dos corpos de prova, o que comprometeu tanto o desempenho estético quanto a resistência mecânica do material para o uso proposto.

Na Fase 3 da pesquisa, foi possível concluir que o traço T2M1 melhorou as deficiências encontradas no traço inicial, apresentando um maior grau de reação de geopolimerização, o que se traduziu em uma maior resistência à compressão. Além disso, o traço T2M1 demonstrou menor retração e eflorescência quando comparado aos demais. O ensaio reológico realizado em todas as argamassas (T1M5, T1M6, T1M9 e T2M1) mostrou que o comportamento das argamassas se ajusta aos modelos de Herschel-Bulkley e Bingham.

A argamassa T2M1 se destacou como uma alternativa viável para atender à demanda na área de materiais cimentícios, alcançando resistências superiores às dos concretos convencionais à base de CP. A concentração molar mássica ideal encontrada no estudo foi de 7,5M, com uma relação mássica A/S do geopolímero de 0,3969. Esse ajuste resultou em melhorias significativas nas propriedades da argamassa, especialmente na redução da eflorescência e da retração linear, além de um aumento nas resistências mecânicas, que faz com que a argamassa T2M1 possa ser viável em outras aplicações. No entanto, o ajuste também causou uma redução de 75% no tempo de início de pega e no tempo em aberto da mistura, exigindo, portanto, cuidados especiais no manuseio e transporte.

A análise de sustentabilidade das argamassas indicou que, quando comparadas ao CP, há uma redução nas emissões de CO₂. Contudo, observou-se um aumento significativo nas emissões de SO_x e NO_x, o que pode gerar impactos ambientais adicionais, como chuva ácida e deterioração da qualidade do ar. Conclui-se, portanto, que os geopolímeros sintetizados apresentam grande potencial para aplicação, mas é necessário considerar os impactos ambientais associados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A incorporação de fibras pode ser explorada para melhorar as características como a resistência à tração e a retração linear da argamassa geopolimérica. O efeito nas propriedades reológicas e nas propriedades mecânicas podem ser analisados.

Avaliação do Impacto Ambiental e Econômico: A análise do ciclo de vida (LCA) da argamassa geopolimérica, comparando seu impacto ambiental com o das argamassas à base de cimento, pode ajudar a identificar os benefícios em termos de redução das emissões de CO₂. Também é importante investigar a viabilidade econômica da produção em larga escala, considerando os custos de fabricação e a disponibilidade de matérias-primas.

REFERÊNCIAS

- ABED, F. H. et al. Enhancing geopolymer binder reactivity and performance via mechanochemical activation: A comprehensive study of rheological, mechanical, and microstructural properties. **Construction and building materials**, v. 430, n. 136456, p. 136456, 2024.
- ACI 116R00, Cement and Concrete Terminology, Detroit, Michigan, 2005
- ALEEM, M. I. A.; ARUMAIRAJ, P. D. Geopolymer concrete—a review. **International journal of engineering sciences & emerging technologies**, v. 1, n. 2, p.118-122, 2012.
- ALMUTAIRI, A. L. et al. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00733, 1 dez. 2021.
- AL-MAJIDI, Mohammed Haloob; LAMPROPOULOS, Andreas; CUNDY, Andrew; MEIKLE, Steve. Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications. **Construction and Building Materials**. Vol. 20, p. 198-211, 2016.
- ALONSO, M. M. et al. Alkali-activated mortars: Workability and rheological behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 576–587, ago. 2017.
- AMRAN, M. et al. Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121942, 22 fev. 2021.
- ANDREW, R. M. & Global, CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data* **10**, 195 (2018).
- ASGHARI, Y.; ESMAEIL MOHAMMADYAN-YASOUJ, S.; SAEID RAHIMIAN KOLOOR, S. Utilization of metakaolin on the properties of self-consolidating concrete: A review. **Construction and building materials**, v. 389, n. 131605, p. 131605, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 10. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da argamassa para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15573-3**, Edificações habitacionais — Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**. Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2006.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C109/109M – 20a**. Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50 mm Cube Specimens. USA, 2020, 11p.

_____. **ASTM C157/157M – 17**. Standard Test Methods for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete. USA, 2017, 8p.

_____. **ASTM C191 – 19**. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. USA, 2019, 8p.

_____. **ASTM C348 – 19**. Standard Test Methods for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars. USA, 2019, 6p.

_____. **ASTM C1708/C1708M – 19**. Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. USA, 2016, 10p.

BANFILL, P.F.G. , The rheology of fresh cement and concrete - a review, in: Int. Cem. Chem. Congr., Durban, 2003.

BOTELLA. **Reología de suspensiones cerámicas.** [s.l.] Editorial CSIC - CSIC Press, 2005.

CARASEK, Helena. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 1o ed., 2007, 870p.

CARVALHO, Henrique Duarte Sales. **Análise da Retração por Secagem em Argamassas Autonivelantes Utilizando Adições Minerais Como Substitutos Parciais do CP.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

De Gasparo, M. Herwegh, R. Zurbriggen, K. Scrivener, **Quantitative distribution patterns of additives in self-leveling flooring compounds (underlays) as a function of application, formulation, and climatic conditions.** Cem. Concr. Res. 39 (2009) 313–323, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.009>.

DAVIDOVITS,J. **30 Years of Sucesses and Failures in Geopolymers Applications.** Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

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.

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

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 19 dez. 2006.

HASNAOUI, A.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Optimization approach of granulated blast furnace slag and metakaolin based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 10–26, fev. 2019.

Istuque DB, Soriano L, Akasaki JL, Melges JLP, Borrachero MV, Monzó J, Payá J, Tashima MM (2019) Effect of sewage sludge ash on mechanical and microstructural properties of geopolymers based on metakaolin. *Constr Build Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.093>

JANSEN, D.; NEUBAUER, J.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; HAERZSCHEL, R.; HER-GETH, W.-D. Change in reaction kinetics of a Portland cement caused by a super-plasticizer— Calculation of heat flow curves from XRD data. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p.327-332, 2012.

JIANG, T. et al. Review on the impact of metakaolin-based geopolymer's reaction chemistry, nanostructure and factors on its properties. **Construction and building materials**, v. 412, n. 134760, p. 134760, 2024.

JIANG, S. et. al, Rheological properties of cementitious composites with nano/fiber fillers, **Construction and building materials**, 2018.

JINDAL, B. B. et al. Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. **Environmental Science and Pollution Research**, 9 jan. 2022.

LEONELLI, C., M. ROMAGNOLI, Rheology parameters of alkali-activated geopolymeric concrete binders, Woodhead Publishing Limited, 2014.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com CV e Hidróxido de Sódio (NaOH) . **Ambiente Construído**, Porto Alegre,v. 15, n. 3, p. 7-18, jul./set. 2015.

LUO, Y.-P. et al. Mechanical and microstructural properties of MC-FA-GEGAF-based self-compacting geopolymer concrete composites. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107452–107452, 1 out. 2023.

LECOMTE, I.; HENRIST, C.; LIEGEOIS, M.; MASERI, F.; RULMONT, A.; CLOOTS, R. (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 16, p. 3789-3797, 2006.

LIU, Y. et al. A review on high-temperature resistance of geopolymers concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111241–111241, 1 nov. 2024.

LI, J. et al. Longitudinal single-sided NMR study: Silica-to-alumina ratio changes the reaction mechanism of geopolymers. **Cement and concrete research (Print)**, v. 160, p. 106921–106921, 1 out. 2022.

LÓPEZ, J., et al. Performance of geopolymers mortar using different alkaline activators and their effects on flow retention and setting time. **Construction and Building Materials**, 2023.

LONGHI, M. A. et al. Strategies for control and mitigation of efflorescence in metakaolin-based geopolymers. **Cement and Concrete Research**, v. 144, p. 106431, 1 jun. 2021.

MARVILA, M. T. et al. Performance of geopolymers tiles in high temperature and saturation conditions. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122994, jun. 2021.

MACKENZIE, K. J. D. What are These Things Called Geopolymers? A Physicochemical Perspective. **Ceramic Transactions Series**, p. 173–186, 25 abr. 2012.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements, and Applications**. [s.l.] Wiley, 1994.

MC-Bauchemie. (2024). Ficha técnica MC-PowerFlow 4001. https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%204001.pdf

MENDES, Gabriela Azambuja. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de resíduos do corte de mármores e graníticos: Análise das propriedades físicas e mecânicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2019.

MC do Brasil – Disponível em: <https://MC.com.br/impermeabilizantes-MC-hp-ultra.html>. Acessado em 11/11/2023.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 2. ed. [s. L.]: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. An overview of geopolymers derived from industrial by-products. **Construction and building materials**, v. 127, p. 183-198, 2016.

MOHAJERANI, A.; SUTER, D.; JEFFREY-BAILEY, T.; SONG, T.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; LAW, D. Recycling waste materials in geopolymer concrete. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 3, p. 493-515, 2019.

ÖZBAY, E.; ERDEMİR, M.; DURMUŞ, H. İ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423–434, fev. 2016.

PINTO, A.T. Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Editora UTAD, Portugal, 2006.

PACHECO-TORGAL, F., et al. Geopolymer concrete: A review of its properties and applications in construction. **Construction and Building Materials**, 2019.

PAN, Z.; SANJAYAN, J.; B. VIJAYA RANGAN. An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. **Journal of Materials Science**, v. 44, n. 7, p. 1873–1880, 1 abr. 2009.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014.

PROVIS, J.L., DUXSON, P., VAN DEVENTER, J.S.J, The role of particle technology in developing sustainable construction materials, *Adv. Powder Technol.* 21 (2010) 2–7

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? a reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, v. 17, n. 12, p. 3075–3085, 2005

QUIMIDROL. Disponível em: <<https://www.quimidrol.com.br>>. Acesso em: 10 de maio. 2024

RIAHI, S. et al. The effect of mixing EGAFratos and sand particles on microstructure and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Materials Chemistry and Physics**, v. 240, p. 122223, jan. 2020.

RIBEIRO, DANIEL VÉRAS. **Princípios da Ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, Reações, Aplicações e Avanços Tecnológicos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2021. 569 p.

_____. RILEM 129: test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - compressive strength for service and accident conditions. **Materials and Structures**, v. 28, p. 410-414, 1995.

SAKANO, V. **SAKANO, V. Métodos avançados para avaliação da natureza reológica de suspensões concentradas aplicados ao escoamento pós colapso de barragens de rejeitos**. Tese—USP: [2022].

SANTANA, H. A.; ANDRADE NETO, J. S.; AMORIM JÚNIOR, N. S.; RIBEIRO, D. V.; CILLA, M. S.; DIAS, C. M. R. Self-compacting geopolymer mixture: Dosing based on statistical mixture de-sign and simultaneous optimization. **Construction and Building Materials**, v. 249, p.118677, 2020.

SANTOS. T. A; NETO. J.S. A; RIBEIRO. D.V. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios**. Cap. 05. Daniel Véras Ribeiro. Curitiba. 2021.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. [s.l.] Artiber Ed., 2006.

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

SILVA, Sarah Honorato Lopes da. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SHARIFI, M., & NAIK, T. The role of iron oxide in the properties of alkali-activated geopolymers. **Construction and Building Materials**, 2021.

SHI, C, et al. **Alkali-activated cements and concretes**. CRC Press, 2017.

SHILAR, F. A. et al. **Preparation and validation of sustainable metakaolin based geopolymers concrete for structural application.** v. 371, p. 130688–130688, 1 mar. 2023.

SIMÃO, L et al. Controlling efflorescence in geopolymers: A new approach. **Case studies in construction materials**, v. 15, p. e00740–e00740, 1 dez. 2021.

SINGH, B. et al. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 78–90, jun. 2015.

SOUZA, José Getúlio Gomes de; LARA, Patrícia Lopes de Oliveira (Org.). Realogia e Trabalhabilidade das Argamassas. In: BAUER, Elton. **Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades**. Brasília: Sinduscon-df, 2015. p. 23–28.

SOUAYFAN, F. et al. Comprehensive study on the reactivity and mechanical properties of alkali-activated metakaolin at high H₂O/Na₂O ratios. **Applied Clay Science**, Guangdong, v. 231, 106758, 2023.

SULLIVAN, M. et al. Sustainable Materials for Transportation Infrastructures: Comparison of Three Commercially-Available Metakaolin Products in Binary Cementitious Systems. **Infrastructures**, v. 3, n. 3, p. 17, 21 jun. 2018.

TALAAT,A; EMAD,A; KOHAIL, M. **Environmental Impact Assessment for Performance-Oriented Geopolymer Concrete Research.** v. 35, n. 1, 1 jan. 2023.

TEMUUJIN, J.; RIESSEN, A. Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 2-3, p. 634–639, 27 ago. 2008.

TONIOLO, N. et al. Novel geopolymers incorporating red mud and waste glass cullet. **Materials letters**, v. 219, p. 152–154, 2018.

VARGAS, A. S. de et al. Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. **Cerâmica**, São Paulo, v. 2015, n. 09, p.317-322, 2015.

VASCONCELOS, W. L., et al. Influence of metakaolin content on the mechanical and durability properties of geopolymer mortars. **Journal of Building Materials**, 2020.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International journal of mineral processing**, v. 59, n. 3, p. 247–266, 2000.

XU, H. et al. Characterization of Aged Slag Concretes. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 2, 2008.

Wan Q, Rao F, Song S, Leon-Patino CA, Ma Y, Yin W (2019) Consolidation of mine tailings through geopolymmerization at ambient temperature. *J Am Ceram Soc.*

Wang, H. et al. The effect of pore behavior and gel structure on the mechanical property at different initial water content. **Construction and Building Materials**, 2021.

Ye N, Yang J, Ke X, Zhu J, Li Y, Xiang C, Wang H, Li L, Xiao Bo (2014) Synthesis and characterization of geopolymers from bayer red mud with thermal pretreatment. **J Am Ceram Soc.** <https://doi.org/10.1111/jace.12840>

ZHANG, Z. et al. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 30–41, out. 2014.

ZHANG, N. et al. Damage evaluation and deformation behavior of mine tailing-based Geopolymer under uniaxial cyclic compression. **Ceramics International**, v. 47, n. 8, p. 10773–10785, 28 dez. 2020.