CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOÃO PEDRO DE ARAÚJO VEIGA

INFLUÊNCIA DO TEOR DE ATIVADOR ALCALINO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS ÁLCALI-ATIVADOS BINÁRIO E TERNÁRIO CONTENDO ESCÓRIA DE ALTO-FORNO, ARGILA CALCINADA E CALCÁRIO

BELO HORIZONTE
2026

JOÃO PEDRO DE ARAÚJO VEIGA

INFLUÊNCIA DO TEOR DE ATIVADOR ALCALINO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS ÁLCALI-ATIVADOS BINÁRIO E TERNÁRIO CONTENDO ESCÓRIA DE ALTO-FORNO, ARGILA CALCINADA E CALCÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2026

Veiga, João Pedro de Araújo.
V426i Influência do teor de ativador Alcalino no desempenho de sistemas álcali-ativados binário e ternário contendo escória de alto-forno, argila calcinada e calcário / João Pedro de Araújo Veiga. – 2026.
60 f. : il.
Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.

1. Cimento - Propriedades físico-químicas. 2. Argilas. 3. Escória. 4. Calorimetria. I. Paiva, Renato Perdigão de Paiva. II Título.

CDD: 620.1

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga - CRB/6-3261

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 6 / 2026 - CEMAT (11.51.06)

Nº do Protocolo: 23062.033470/2026-78

Belo Horizonte-MG, 28 de junho de 2026.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Defesa Final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 2026/1

Aos **16 dias do mês de junho de 2026**, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, o aluno **João Pedro de Araújo Veiga**, matrícula 20203001045 apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Influência do Teor de Ativador Alcalino no Desempenho de Sistemas Álcali-ativados Binário e Ternário Contendo Escória de Alto-Forno, Argila Calcinada e Calcário*, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, o qual foi **APROVADO** pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª Dr.ª Luciana Boaventura Palhares
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Eng. Rafael Vasconcelos Silva Lopes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 17:34)
LUCIANA BOAVENTURA PALHARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2112312

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 09:54)
PAULO RENATO PERDIGÃO DE PAIVA
SUBCOORDENADOR - SUBSTITUTO
CEMAT (11.51.06)
Matrícula: 2112363

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 07:46)
RAFAEL VASCONCELOS SILVA LOPES
DISCENTE
Matrícula: 20255002658

Visualize o documento original em **https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp** informando seu número: **6**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **28/06/2026** e o código de verificação: **8c6c0850cb**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, que sempre me incentivou a dar o meu melhor e esteve ao meu lado em todos os momentos desta trajetória. Aos meus pais, Dalma e Sávio, por todo o amor, apoio e dedicação ao longo da minha vida. À minha irmã, Fernanda, e ao meu cunhado, Dmitri, que mesmo à distância sempre estiveram presentes com palavras de incentivo e confiança.

Também agradeço aos amigos e colegas que compartilharam comigo essa caminhada acadêmica e tornaram os desafios mais leves. Em especial, à Eyshila, ao Francisco, à Clara e à Thallita, pela amizade, pelas conversas, pelas risadas e pelos inúmeros momentos vividos durante o curso.

Ao meu orientador, Paulo, deixo minha sincera gratidão pela paciência, disponibilidade e pelos ensinamentos ao longo desses anos. Desde a minha primeira iniciação científica, sua orientação teve papel fundamental não apenas na minha formação acadêmica, mas também no meu crescimento pessoal.

À Circlua, agradeço pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por disponibilizar a estrutura necessária para sua realização. Ao meu gestor, Márlon, e especialmente à minha gestora, Pamella, agradeço pela confiança, pelo apoio e pelos aprendizados compartilhados ao longo desse período. Estendo também meu agradecimento a toda a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento e, em especial, aos laboratoristas, que estiveram sempre dispostos a ajudar e contribuíram diretamente para a execução deste trabalho.

Por fim, agradeço ao CEFET-MG, instituição que marcou profundamente minha trajetória. Além dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação, foi nesse ambiente que vivi experiências, construí amizades e encontrei oportunidades que contribuíram para minha formação profissional e pessoal. Sou grato a todos que fizeram parte dessa caminhada e ajudaram, de alguma forma, na realização deste trabalho.

RESUMO

Os cimentos álcali-ativados destacam-se como uma alternativa promissora aos ligantes convencionais devido ao seu potencial de redução das emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento Portland. O presente trabalho avaliou a influência do teor de ativador alcalino no desempenho de sistemas álcali-ativados binários e ternários contendo escória granulada de alto-forno, argila calcinada e calcário. Foram estudadas formulações binárias compostas por escória e argila calcinada e formulações ternárias contendo escória, argila calcinada e calcário, variando-se o teor de ativador alcalino entre 15% e 20% em massa. Como referência, utilizou-se um sistema composto exclusivamente por escória ativada. As matérias-primas foram caracterizadas por diferentes técnicas de análise física e química, incluindo fluorescência de raios X (FRX), perda ao fogo, picnometria a gás, granulometria por difração a laser, área superficial específica pelo método de Blaine, índice de finura e ensaio de solubilidade. Enquanto o comportamento das misturas foi avaliado por meio dos ensaios de *mini-slump*, calorimetria isotérmica e resistência à compressão aos 1, 3, 7 e 28 dias. Os resultados mostraram que a incorporação de argila calcinada reduziu a trabalhabilidade das misturas e alterou significativamente a cinética de reação, diminuindo o calor total liberado, enquanto a adição de calcário contribuiu para melhorar a fluidez do sistema e reduzir o fluxo de calor. A resistência à compressão apresentou forte dependência da alcalinidade do sistema. Nos sistemas binários, observou-se aumento contínuo da resistência com o incremento do teor de ativador, alcançando 60,1 MPa aos 28 dias e superando o desempenho da formulação de referência. Nos sistemas ternários, foi identificado um teor ótimo de ativação de 19,12%, associado a uma resistência máxima estimada de 58,26 MPa. Os resultados demonstram o potencial dos sistemas estudados para o desenvolvimento de ligantes cimentícios de baixo carbono, evidenciando a importância da dosagem do ativador alcalino no controle das propriedades reológicas, cinéticas e mecânicas desses materiais.

Palavras-chave: Cimento. Escória. Argila. Calcário. Ativador. Calorimetria. *Mini-slump*. Resistência.

ABSTRACT

Alkali-activated cements have emerged as a promising alternative to conventional binders due to their potential to reduce carbon dioxide emissions associated with Portland cement production. This study evaluated the influence of alkali activator content on the performance of binary and ternary alkali-activated systems containing ground granulated blast furnace slag, calcined clay, and limestone. Binary formulations composed of slag and calcined clay and ternary formulations containing slag, calcined clay, and limestone were investigated by varying the alkali activator content from 15% to 20% by mass. A system composed exclusively of activated slag was used as the reference. The raw materials were characterized using different physical and chemical analysis techniques, including X-ray fluorescence (XRF), loss on ignition, gas pycnometry, laser diffraction particle size analysis, specific surface area by the Blaine method, fineness index, and solubility test. The behavior of the mixtures was evaluated by means of mini-slump, isothermal calorimetry, and compressive strength tests at 1, 3, 7, and 28 days. The results showed that the incorporation of calcined clay reduced the workability of the mixtures and significantly altered the reaction kinetics by decreasing the total heat released, whereas the addition of limestone contributed to improving the system flowability and reducing the heat flow. Compressive strength showed a strong dependence on the system alkalinity. In the binary systems, a continuous increase in compressive strength was observed with increasing activator content, reaching 60.1 MPa at 28 days and outperforming the reference formulation. In the ternary systems, an optimum activation content of 19.12% was identified, corresponding to an estimated maximum compressive strength of 58.26 MPa. The results demonstrate the potential of the investigated systems for the development of low-carbon cementitious binders, highlighting the importance of alkali activator dosage in controlling the rheological, kinetic, and mechanical properties of these materials.

Keywords: Cement. Slag. Clay. Limestone. Activator. Calorimetry. Mini-slump. Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de fabricação do Cimento Portland 13
Figura 2 – Estruturas dos géis N-A-S-H e C-A-S-H 16
Figura 3 – Métodos de produção dos MAAs 21
Figura 4 – Fluxograma das etapas reacionais de geopolimerização 24
Figura 5 – Fluxograma metodológico 27
Figura 6 – Materiais empregados 28
Figura 7 – (a) Máquina de fusão e (b) EDXRF 30
Figura 8 – Picnômetro a gás 31
Figura 9 – Analisador automático de Blaine 32
Figura 10 – Granulômetro a laser 33
Figura 11 – Peneirador aerodinâmico 34
Figura 12 - Aparato do *Mini-slump*: (a) posicionamento do cone de Kantro na base de ensaio; (b) Perspectiva inferior do cone; e (c) Perspectiva superior do cone. 36
Figura 13 – (a) Calorímetro isotérmico TAM Air; (b) Ampola utilizada no ensaio. 38
Figura 14 – (a) Argamassadeira; (b) Mesa elétrica de consistência. 39
Figura 15 – Máquina universal de ensaios e prensa hidráulica 40
Figura 16 – *Mini-slump* das pastas avaliadas 43
Figura 17 - Fluxo de calor do sistema binário 45
Figura 18 – Calor acumulado do sistema binário 45
Figura 19 - Fluxo de calor do sistema ternário 46
Figura 20 – Calor acumulado do sistema ternário 46
Figura 21 - Resistência à compressão do sistema binário 48
Figura 22 - Resistência à compressão do sistema ternário 49
Figura 23 – Curvas de regressão da resistência do sistema binário por teor de ativador. . 52
Figura 24 – Curvas de regressão da resistência do sistema ternário por teor de ativador. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos sistemas álcali-ativados e identificação das misturas 26
Tabela 2 - Caracterizações das matérias-primas utilizadas 41
Tabela 3 – Fluxo de calor máximo e calor acumulado total das misturas 47

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**9**
2	**OBJETIVOS**	**11**
2.1	**Objetivo Geral**	**11**
2.2	**Objetivos Específicos**	**11**
3	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**12**
3.1	**Cimento Portland**	**12**
3.2	**Cimento Álcali-Ativado**	**14**
3.2.1	***Precursores***	***17***
3.2.1.1	***Escória de alto-forno***	*17*
3.2.1.2	***Argila calcinada***	*19*
3.2.1.3	***Ativadores alcalinos***	*20*
3.2.2	***Ativação alcalina***	***22***
3.2.2.1	***Mecanismo de geopolimerização***	*22*
3.2.2.2	***Cinética de reação em sistemas binários escória de alto-forno – argila calcinada***	*24*
4	**MATERIAIS E MÉTODOS**	**26**
4.1	**Estrutura Metodológica**	**26**
4.2	**Materiais**	**28**
4.3	**Métodos**	**29**
4.3.1	***Caracterizações das Matérias-Primas***	***29***
4.3.1.1	*Perda ao fogo*	*29*
4.3.1.2	*Fluorescência de raios X (FRX)*	*30*
4.3.1.3	*Massa específica real*	*31*
4.3.1.4	*Área superficial específica*	*32*
4.3.1.5	*Granulometria a laser*	*33*
4.3.1.6	*Índice de finura*	*33*
4.3.1.7	*Solubilidade*	*34*
4.3.2	***Mini-slump***	***35***
4.3.3	***Calorimetria isotérmica***	***37***

4.3.4 Resistência à compressão *38*
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **41**
5.1 Caracterização das Matérias-Primas **41**
5.2 Mini-slump **43**
5.3 Calorimetria Isotérmica **44**
5.4 Desempenho Mecânico **48**
6 CONCLUSÕES **54**
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS **55**

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais empregado na construção civil contemporânea, pois é o segundo produto mais consumido no mundo, depois da água (Pol Segura *et al*., 2023). O principal aglutinante para ele na indústria da construção é o cimento Portland comum (OPC), que tem produção em larga escala, aplicação simples e maior confiabilidade de suas propriedades mecânicas (Scrivener; John; Gartner, 2018). Por outro lado, ainda existe um enorme desafio ambiental para a indústria de cimento, já que é emitida de 0,5 a 0,8 tonelada de dióxido de carbono (CO_2) para cada tonelada de cimento produzida, sendo o setor responsável por cerca de 8% das emissões globais de origem antrópica (Zhang et al., 2026). Cerca de 60% a 63% dessas emissões não estão ligadas à queima de combustíveis, mas sim à decomposição do calcário durante a formação do clínquer, que ocorre em temperaturas próximas de 1450 °C (Jingliang et al., 2025). Caso não haja mudanças no modelo atual de produção, estima-se que a participação do cimento nas emissões globais de gases de efeito estufa possa chegar a 26% até 2050 (Pol Segura et al., 2023).

Portanto, em resposta a acordos climáticos que buscam limitar o aumento da temperatura global a, no máximo, 2 °C, a busca por aglutinantes com menor pegada de carbono tornou-se uma prioridade nos níveis científico e industrial (Fořt et al., 2026), destacando-se os materiais ativados por álcalis (MAAs) como alternativas promissoras entre eles (Provis; Van Deventer, 2014; Van Deventer; Provis; Duxson, 2012). Alinhados à economia circular, esses materiais utilizam subprodutos industriais ricos em aluminossilicatos que, ao reagirem com ativadores altamente alcalinos, sofrem dissolução e policondensação, formando uma matriz cimentícia tridimensional coesa e resistente (Hassan et al., 2025). Além disso, podem reduzir as emissões de CO_2 em mais de 68% em comparação ao OPC e apresentar desempenho equivalente ou superior em propriedades como resistência inicial, estabilidade térmica e durabilidade frente a ataques químicos (Farooq et al., 2021; Pol Segura et al., 2023; Zhang et al., 2026).

A escória granulada de alto-forno é um dos precursores mais utilizados nesses sistemas, pois apresenta alta reatividade e favorece a formação de géis do tipo C-A-S-H, o que resulta em matrizes densas e resistentes (Provis; Van Deventer, 2014; Torres-Carrasco; Puertas, 2017). Porém, sua disponibilidade é limitada e não é suficiente para atender à demanda global. Nesse

sentido, as argilas calcinadas, ricas em metacaulim e amplamente disponíveis, surgem como uma alternativa complementar (Fořt et al., 2026; Scrivener; John; Gartner, 2018). Por outro lado, sua alta área superficial pode aumentar a demanda de água e reduzir a trabalhabilidade, o que pode prejudicar o desenvolvimento da resistência inicial em sistemas com baixo teor de cálcio (Chen; Plank, 2024).

A combinação de diferentes precursores tem se mostrado uma estratégia eficiente para equilibrar sustentabilidade, trabalhabilidade e desempenho mecânico (Gomes et al., 2025). Em sistemas binários, formados por escória e argila calcinada, ocorre a formação simultânea dos géis C-A-S-H e N-A-S-H, que contribuem para uma matriz mais compacta e bem estruturada (Van Deventer; Provis; Duxson, 2012). A adição de calcário em sistemas ternários intensifica esse efeito, atuando como fíler, como sítio de nucleação e favorecendo a formação de carboaluminatos. Esse comportamento é semelhante ao observado em sistemas do tipo *Limestone Calcined Clay Cement* (LC3) (Sharma et al., 2021; Song et al., 2025).

Nesse contexto, sistemas multicomponentes à base de escória, argila calcinada e calcário representam uma alternativa promissora para ampliar a viabilidade dos materiais álcali-ativados em larga escala. Além de possibilitarem a redução do consumo de escória de alto-forno, cuja disponibilidade é limitada (Scrivener; John; Gartner, 2018), esses sistemas incorporam matérias-primas abundantes e de baixo custo, favorecendo sua sustentabilidade econômica e ambiental. Entretanto, como o ativador alcalino corresponde à principal fonte de custo e de emissões associadas à produção dos MAAs (Zhang et al., 2026), a compreensão de sua influência sobre o desempenho desses materiais é fundamental para sua aplicação prática e futura escalabilidade industrial.

Apesar disso, o desempenho de sistemas com diversos precursores é dependente do teor e do tipo de ativador alcalino, uma variável ainda pouco explorada na literatura. Nesse contexto, este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de cimentos álcali-ativados, investigando como diferentes níveis de alcalinidade influenciam o desempenho de sistemas de multiprecursores. Para isso, foi realizada uma análise comparativa das propriedades no estado fresco, da evolução do calor de reação e da resistência mecânica de misturas contendo escória, argila calcinada e calcário, em comparação com um sistema de referência à base de escória.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do teor de ativador alcalino no desempenho físico, reológico, cinético e mecânico de sistemas cimentícios álcali-ativados binário (escória de alto-forno e argila calcinada) e ternário (escória de alto-forno, argila calcinada e calcário), comparando-os a um sistema de referência à base de escória.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os materiais precursores, o fíler e o ativador alcalino quanto às suas propriedades físico-químicas e granulométricas;
- Avaliar a trabalhabilidade das misturas no estado fresco por meio do ensaio de *Mini-slump* em função da variação do teor de ativador alcalino;
- Analisar a cinética de reação dos sistemas por meio de calorimetria isotérmica;
- Determinar o desenvolvimento da resistência mecânica à compressão dos cimentos ao longo do tempo;
- Comparar o desempenho dos sistemas binário e ternário com um traço de referência à base de escória ativada;
- Investigar a influência do teor de ativador alcalino nas propriedades no estado fresco, na cinética de reação e no desempenho mecânico dos sistemas;
- Aplicar análise estatística aos resultados obtidos, visando identificar tendências e modelar o comportamento mecânico em função da dosagem de ativador.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

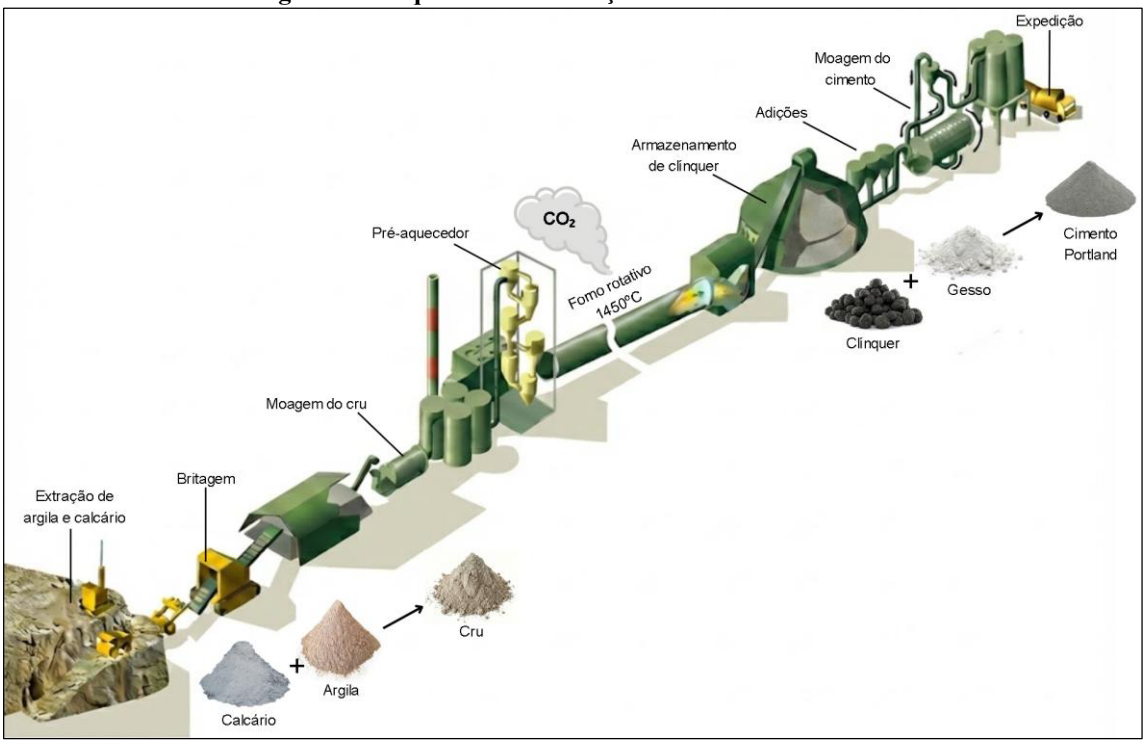
3.1 Cimento Portland

O Cimento Portland consolidou-se como o material de construção mais empregado mundialmente devido à sua economia de escala, ao baixo custo de produção, estimado entre 50 e 120 USD por tonelada a depender da região, e à confiabilidade de suas propriedades mecânicas (Scrivener; John; Gartner, 2018). Sua produção envolve a calcinação de misturas predominantemente compostas por calcário e argila a temperaturas próximas de 1450 °C, originando um clínquer rico em fases silicatadas de cálcio (C_3S e C_2S) e aluminatos. Após moagem com gesso, esse clínquer adquire a capacidade de desenvolver resistência mecânica por meio de reações de hidratação (Faria Oliveira et al., 2025; Zhang et al., 2026).

Do ponto de vista industrial, o processo de fabricação do cimento pode ser dividido em diversas etapas sequenciais, como ilustrado na Figura 1. Inicialmente, ocorre a extração das matérias-primas, predominantemente calcário e argila, seguida pelas etapas de britagem e homogeneização, essenciais para garantir a regularidade química da mistura (CNI, 2012). Na sequência, o material é submetido à moagem fina, formando o chamado “cru”, cuja composição deve ser controlada em termos de CaO, SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 para permitir a formação adequada das fases mineralógicas do clínquer (CNI, 2012).

Após a moagem, o cru é introduzido em sistemas de pré-aquecimento, onde ocorre a descarbonatação parcial do calcário com liberação de CO_2, sendo então alimentado no forno rotativo operando a aproximadamente 1450 °C. Nesta etapa ocorrem reações de sinterização que resultam na formação das fases alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato (C_3A) e ferrita (C_4AF), que determinam o desempenho mecânico final do cimento (Provis; Van Deventer, 2014). Ao término da queima, o clínquer é rapidamente resfriado, armazenado e posteriormente alimentado nos moinhos de cimento, onde é moído junto com gesso, responsável pelo controle do tempo de pega, e eventuais adições minerais. Nessa etapa final, a finura e a proporção de cada componente exercem influência direta na cinética de hidratação e no desenvolvimento da resistência mecânica, determinando as propriedades do cimento Portland produzido antes de sua expedição (Scrivener; John; Gartner, 2018).

Figura 1 – Esquema de fabricação do Cimento Portland



Fonte: Adaptado de CNI, 2012.

Embora seja referência em desempenho estrutural, permitindo concretos com resistências superiores a 60 MPa e estabilidade volumétrica bem estabelecida, o ciclo de vida do OPC apresenta um impacto ambiental significativo. A indústria do cimento é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO_2, percentual associado principalmente ao seu processo produtivo. E, aproximadamente 60% a 63% dessas emissões vêm da decomposição térmica do calcário, representada na Equação 1, durante a formação do clínquer. Em termos energéticos, produzir uma tonelada de cimento demanda cerca de 4 GJ e emite, em média, 0,8 t de CO_2, o que evidencia os desafios para a descarbonização do processo convencional (Jingliang et al., 2025; Zhang et al., 2026).

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1)$$

Além do impacto climático, a literatura aponta limitações de durabilidade associadas ao OPC em cenários específicos. Embora o cimento Portland seja resistente à carbonatação, ele demonstra vulnerabilidade em ambientes agressivos e sob temperaturas elevadas. Estudos indicam intensa

degradação microestrutural sob ataque ácido ou sulfático e perda praticamente total da resistência mecânica para temperaturas superiores a 800 °C, devido à perda de água estrutural das fases de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Farooq et al., 2021; Gomes et al., 2025; Zhang et al., 2026).

Existem estratégias para melhorar a eficiência energética e reduzir o uso de clínquer no cimento, como a substituição parcial por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). No entanto, essas abordagens possuem limitações físicas e logísticas no longo prazo. Além dos sistemas convencionais baseados em escória de alto-forno e cinzas volantes, destaca-se o cimento LC3 (*Limestone Calcined Clay Cement*), que combina calcário e argila calcinada com o objetivo de reduzir o teor de clínquer sem alterações significativas no processo produtivo, constituindo uma rota intermediária de baixo carbono (Sharma et al., 2021). No entanto, a disponibilidade limitada de materiais cimentícios suplementares (MCS) de alta qualidade em algumas regiões e as emissões inevitáveis geradas pela decomposição do calcário impõem restrições ao potencial de descarbonização do OPC. (Scrivener; John; Gartner, 2018; Zhang et al., 2026).

Nesse cenário, materiais álcali-ativados (MAAs) e geopolímeros têm se destacado como alternativas promissoras para complementar as estratégias de sustentabilidade da construção civil. Diferente do OPC, esses ligantes eliminam a etapa de calcinação de carbonatos em altas temperaturas, possibilitando reduções da pegada de carbono entre 30% e 80% e promovendo a economia circular ao empregar resíduos industriais e agrícolas, como lama vermelha, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno, rejeitos minerários, como precursores cimentantes (Fořt et al., 2026; Long et al., 2022; Zhang et al., 2026).

3.2 Cimento Álcali-Ativado

Os cimentos álcali-ativados (CAA) constituem uma classe de ligantes inorgânicos obtidos pela reação entre um precursor rico em aluminossilicatos, um ativador alcalino de elevada basicidade e água, que atua como meio para o desenvolvimento das reações (Provis; Van Deventer, 2014). Ao contrário do cimento Portland, cujo endurecimento depende da hidratação de silicatos de cálcio, o desenvolvimento de resistência nos CAAs decorre de processos de dissolução, difusão iônica e policondensação em meio altamente alcalino, resultando em uma matriz cimentícia capaz de atingir propriedades mecânicas competitivas (Shi et al., 2006).

Embora seu interesse industrial seja recente, a base científica desses materiais remonta às primeiras décadas do século XX. Kühl investigou sistemas alcalinos em 1908 (Kühl, 1908) enquanto Purdon demonstrou, na década de 1940, a capacidade dos hidróxidos alcalinos de ativar escórias de alto-forno e acelerar o desenvolvimento de resistência (Purdon, 1940). Posteriormente, Glukhovsky estudou ligantes alcalinos sob a denominação de ligantes de solo-cimento (Glukhovsky, 1959). Já na década de 1970, Davidovits propôs o termo "geopolímero" para descrever materiais formados por estruturas tridimensionais de aluminossilicatos (Davidovits, 1991). A classificação mais adotada atualmente é a proposta pelo comitê técnico RILEM TC 224-AAM (Technical Committee 224 - Alkali-Activated Materials), da União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais e Estruturas (RILEM), que organiza os sistemas com base no teor de cálcio disponível (Snellings, 2016).

A distinção entre materiais álcali-ativados (MAAs) e geopolímeros está associada ao teor de cálcio dos precursores e, consequentemente, ao tipo do gel formado durante o endurecimento. O termo "Materiais Álcali-Ativados" é mais abrangente, incluindo ligantes obtidos pela reação de precursores aluminosilicatos com ativadores alcalinos, independentemente da quantidade de cálcio (Provis; Van Deventer, 2014). Assim, o geopolímero corresponde a um subconjunto específico composto por precursores de baixo teor de cálcio, como metacaulim ou cinzas volantes classe F, que formam géis do tipo N-A-S-H (silicoaluminato de sódio hidratado), expresso pelo sistema Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O. Esses géis apresentam uma rede tridimensional amorfa com ordenação local semelhante às zeólitas, formada por tetraedros de silício e alumínio interligados. A substituição de tetraedros de silício por tetraedros de alumínio gera um desequilíbrio de carga negativa, que é compensado pela presença de íons Na^+ nas cavidades da estrutura. Isso resulta em uma microestrutura mais aberta e porosa, a qual possui elevada estabilidade térmica e química (Davidovits, 1994; Duxson et al., 2007).

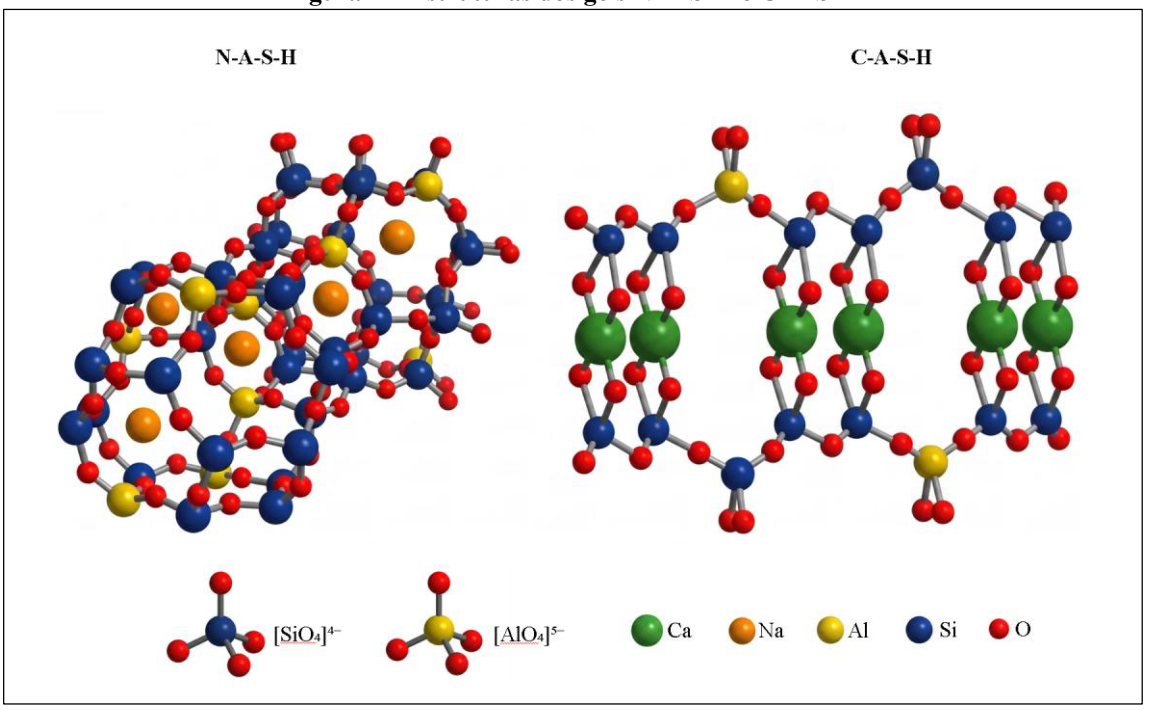
Já sistemas álcali-ativados ricos em cálcio, tipicamente produzidos a partir de escória granulada de alto-forno moída, formam predominantemente o gel C-A-S-H (silicoaluminato de cálcio hidratado), expresso pelo sistema CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O. Esse gel apresenta uma estrutura mais densa, organizada em cadeias ou camadas análogas ao gel C-S-H do cimento Portland, porém modificadas pela incorporação de alumínio (Torres-Carrasco; Puertas, 2017). Nessa estrutura, tetraedros de alumínio substituem parcialmente os de silício nas posições de ligação, enquanto o

cálcio atua unindo as cadeias, reduzindo a porosidade e aumentando a complexidade da matriz (García-Lodeiro et al., 2008; Myers et al., 2013)

As estruturas representativas dos géis C-A-S-H e N-A-S-H estão apresentadas na Figura 2. As diferenças entre esses materiais estão relacionadas à organização dos tetraedros e ao papel dos cátions na estabilização da matriz: enquanto o N-A-S-H forma uma rede tridimensional com cátions alcalinos atuando na compensação de carga, o C-A-S-H apresenta uma estrutura em camadas mais compacta, na qual o cálcio promove o empacotamento das cadeias (Zhang et al., 2026).

Finalmente, a combinação de diferentes precursores tem possibilitado a formação simultânea de géis C-A-S-H e N-A-S-H, resultando em sistemas híbridos, como aqueles baseados em escória e argilas calcinadas, que permitem ajustar propriedades microestruturais e mecânicas, configurando uma estratégia relevante para a otimização de materiais álcali-ativados (Bernal et al., 2011; Gomes et al., 2025).

Figura 2 – Estruturas dos géis N-A-S-H e C-A-S-H



Fonte: Adaptado de Li et al., 2022; Torres-Carrasco; Puertas, 2017.

Apesar de a tecnologia de ativação alcalina já demonstrar maturidade técnica, sua adoção global ainda enfrenta barreiras relevantes, sobretudo devido à ausência de normas prescritivas

internacionais (Provis; Van Deventer, 2014). As regulamentações existentes seguem majoritariamente a lógica química do Cimento Portland, o que dificulta a acomodação da variabilidade de precursores e ativadores presentes nos materiais álcali-ativados (Fořt et al., 2026).

Ainda assim, a falta de padronização não impediu a utilização prática desses materiais em diferentes países ao longo das últimas décadas. Na antiga União Soviética, sistemas de escória álcali-ativada foram empregados em obras residenciais de grande porte, dormentes ferroviários e elementos de infraestrutura, com desempenho durável documentado. A China e a Austrália também destacam-se como centros de aplicação, empregando concretos geopoliméricos em pavimentação, pré-moldados estruturais e obras públicas, impulsionados pela disponibilidade de resíduos industriais e por abordagens normativas orientadas ao desempenho (Provis; Van Deventer, 2014; Zhang et al., 2026). Outras aplicações relevantes incluem materiais resistentes ao fogo e soluções de reparo rápido em setores específicos, o que demonstra o potencial dos AAMs em cenários de alta exigência (Provis; Van Deventer, 2014).

3.2.1 Precursores

Os precursores utilizados em materiais álcali-ativados (AAMs) são geralmente materiais ricos em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), preferencialmente com estrutura amorfa, o que favorece sua reatividade em meio alcalino (Tome et al., 2024). De acordo com a classificação proposta por Davidovits em 1991, a formação desses ligantes depende da disponibilidade de espécies de silicato e aluminato para a formação de estruturas do tipo Si–O–Al–O. Dessa forma, a composição do precursor influencia diretamente propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade do material (Provis; Van Deventer, 2014).

3.2.1.1 Escória de alto-forno

A escória granulada de alto-forno é o precursor mais utilizado e estudado na tecnologia de ativação alcalina, sendo reconhecida como o primeiro material a apresentar aplicação consistente como ligante alternativo em sistemas álcali-ativados. Esse material é gerado durante a produção de ferro-gusa em altos-fornos, processo no qual o minério de ferro, o coque e os fundentes,

principalmente calcário, são submetidos a temperaturas da ordem de 1500 °C. Durante a fusão, forma-se um resíduo líquido menos denso que o metal, o qual flutua sobre o ferro fundido e é separado como escória (CNI, 2012; Farooq et al., 2021).

Para que a escória desenvolva propriedades cimentícias, também conhecida como hidraulicidade latente, é necessário que o material fundido seja submetido a um resfriamento rápido, geralmente por granulação em água, processo que inibe a cristalização e preserva uma estrutura predominantemente vítrea e amorfa. Essa condição tem como intuito garantir elevada reatividade química em meio alcalino, uma vez que escórias resfriadas lentamente tendem a cristalizar e se tornar quimicamente mais inertes (Farooq et al., 2021; Scrivener; John; Gartner, 2018). Após a granulação, a escória é moída finamente, originando a escória granulada de alto-forno moída, cuja reatividade depende da finura, da composição química e do teor de fase vítrea presente.

Com relação ao desempenho mecânico, os ligantes à base de escória álcali-ativada apresentam elevadas resistências à compressão em idades iniciais, frequentemente superiores às observadas em sistemas Portland, em razão da rápida formação e densificação do gel C-A-S-H (Farooq et al., 2021). A durabilidade química do material também se destaca, uma vez que a composição do gel formado, caracterizada por uma menor relação cálcio/silício, confere à matriz uma elevada estabilidade química, garantindo excelente resistência a ataques ácidos e sulfáticos (Bakharev, 2005).

Apesar dessas vantagens, a aplicação em larga escala de ligantes de escória álcali-ativada enfrenta desafios relevantes. O mais crítico é a elevada retração, tanto autógena quanto por secagem, que pode atingir valores significativamente superiores aos do Cimento Portland convencional, favorecendo a fissuração quando não são adotadas estratégias adequadas de cura ou mitigação (Gomes et al., 2025). Essa retração está associada à microestrutura de poros finos do gel C-A-S-H, que gera altas pressões capilares à medida que a água é consumida ou evapora.

Do ponto de vista logístico, a disponibilidade de escória é limitada, pois sua produção depende diretamente da indústria siderúrgica e grande parte do material gerado já é consumido na fabricação de cimentos compostos. Esse cenário tem incentivado o desenvolvimento de sistemas multicomponentes, nos quais a escória é parcialmente substituída por argilas calcinadas ou cinzas volantes, buscando reduzir o consumo de GGBFS e explorar sinergias entre os precursores. Assim,

a alteração da termodinâmica de reação promove a coexistência de géis C-A-S-H e N-A-S-H, o que tende a reduzir a microfissuração térmica, melhorar a estabilidade dimensional e ampliar a viabilidade técnica e ambiental dos materiais álcali-ativados (Gomes et al., 2025; Scrivener; John; Gartner, 2018; Van Deventer; Provis; Duxson, 2012).

3.2.1.2 Argila calcinada

As argilas calcinadas, com destaque para o metacaulim, têm se consolidado como uma das fontes de aluminossilicatos mais promissoras para a produção sustentável de ligantes, principalmente devido à sua ampla disponibilidade global, significativamente superior à de subprodutos industriais como escória de alto-forno e cinzas volantes (Chen; Plank, 2024; Scrivener; John; Gartner, 2018). Diferentemente desses resíduos, cuja composição química pode apresentar elevada variabilidade, as argilas calcinadas podem ser produzidas a partir de matérias-primas naturais com maior controle de qualidade, o que as torna precursores estratégicos para a expansão e padronização da tecnologia de ativação alcalina (Hassan et al., 2025).

A reatividade das argilas calcinadas está diretamente associada ao tratamento térmico aplicado à matéria-prima, geralmente rica em caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). O processo de calcinação, tipicamente realizado em temperaturas entre 600 °C e 800 °C, promove a desidroxilação do mineral e o colapso de sua estrutura cristalina em camadas, originando uma fase amorfa desordenada conhecida como metacaulim ($Al_2Si_2O_7$) (Hassan et al., 2025; Tome et al., 2024).

O metacaulim é um precursor caracterizado por baixo teor de cálcio e elevada reatividade. Tal reatividade está associada à presença de alumínio em coordenações tetraédrica e pentaédrica na estrutura amorfa, que é facilmente dissolvida em ambientes altamente alcalinos (Hassan et al., 2025). Quando ativado, o metacaulim promove a formação de um gel tridimensional de aluminossilicato alcalino do tipo N-A-S-H, diferindo do comportamento da escória, que tende à formação de géis ricos em cálcio, como o C-A-S-H (Tome et al., 2024). A elevada disponibilidade de alumina reativa confere aos aluminossilicatos amorfos formados na calcinação altas taxas de dissolução e uma rápida cinética de reação frente aos ativadores alcalinos (Zafarana; Barone; Mazzoleni, 2026).

Apesar das vantagens, o principal desafio técnico relacionado ao uso de argilas calcinadas está no seu comportamento reológico. Devido à morfologia lamelar das partículas e à elevada área superficial específica, esses materiais apresentam alta demanda de água e tendem a reduzir significativamente a trabalhabilidade e a fluidez das misturas no estado fresco (Chen; Plank, 2024; Scrivener; John; Gartner, 2018). Para minimizar esses efeitos sem comprometer a resistência mecânica por aumento excessivo da relação água/ligante, é comum a necessidade de ajustes granulométricos e do uso de aditivos superplastificantes (Chen; Plank, 2024).

Adicionalmente, a incorporação de calcário moído, estratégia amplamente explorada no sistema LC3, também tem se mostrado vantajosa em ligantes álcali-ativados à base de argilas calcinadas (Ren et al., 2024). Nesse contexto, o calcário atua predominantemente como fíler, promovendo melhor empacotamento granulométrico e redução da porosidade capilar, além de servir como sítio de nucleação para os produtos de reação (Sharma et al., 2021; Song et al., 2025). O carbonato do calcário pode ainda participar da formação de fases secundárias, como os carboaluminatos, que interagem com a alumina reativa e contribuem para a densificação da microestrutura. Esses efeitos combinados resultam em misturas com melhor trabalhabilidade no estado fresco, maior resistência mecânica e maior durabilidade, ampliando a viabilidade técnica e sustentável desses sistemas cimentícios (Ren et al., 2024; Scrivener; John; Gartner, 2018; Song et al., 2025).

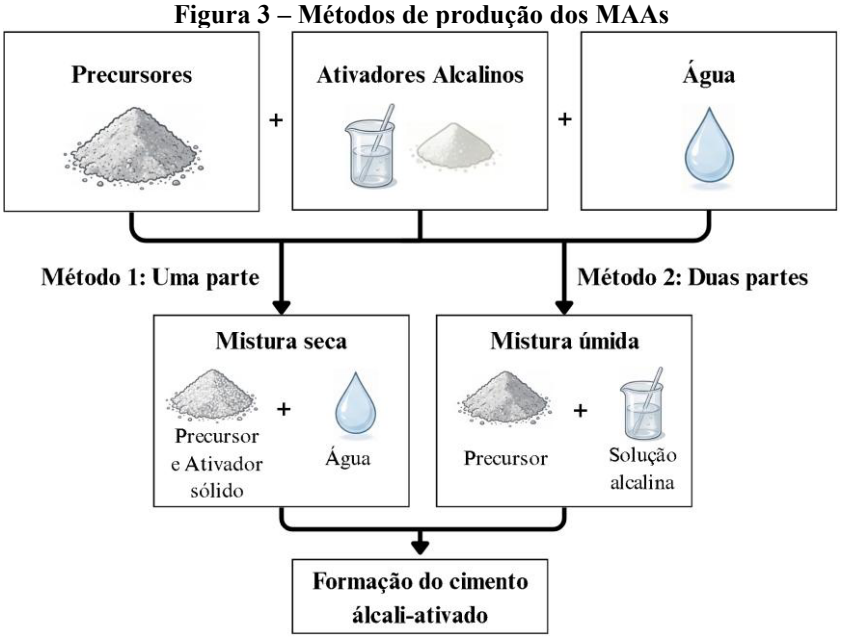
3.2.1.3 Ativadores alcalinos

Os ativadores alcalinos são os responsáveis por iniciar o endurecimento dos materiais álcali-ativados, promovendo um ambiente de alto pH e fornecendo cátions alcalinos, como Na^+ ou K^+, que possibilitam a dissolução das estruturas dos precursores aluminossilicatos (Provis; Van Deventer, 2014). Esse processo rompe as ligações Si–O–Si e Al–O–Si, liberando espécies de silicato e aluminato que se reorganizam por policondensação, formando os produtos responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica. Assim, o tipo e a dosagem do ativador influenciam diretamente a cinética de reação, o tempo de pega, a reologia e a durabilidade do sistema (Yu et al., 2023; Zhang et al., 2026)

Diversos compostos podem atuar como ativadores, incluindo hidróxidos, silicatos, carbonatos e sulfatos alcalinos, cada um influenciando de forma distinta a cinética de reação e a formação dos produtos gerados durante a ativação alcalina (Provis; Van Deventer, 2014). Hidróxidos como NaOH e KOH promovem rápida elevação do pH e dissolução eficiente do precursor, enquanto silicatos alcalinos, como o silicato de sódio, também fornecem sílica solúvel adicional, favorecendo a formação de microestruturas mais densas e maiores resistências mecânicas. Nesses sistemas, o desempenho é fortemente controlado pelo módulo de silicato, definido pela razão molar SiO_2/Na_2O, que equilibra alcalinidade e disponibilidade de sílica reativa (Gao et al., 2025).

Quanto à produção, os MAAs podem ser produzidos por sistemas de duas partes, nos quais o ativador é utilizado em solução líquida, ou por sistemas de uma parte, em que o ativador sólido é misturado ao precursor e a reação inicia-se apenas com a adição de água. Embora o segundo apresente cinética mais rápida, o primeiro método oferece maior segurança, facilidade logística e potencial de uso em escala comercial (Fořt et al., 2026). Esses dois mecanismos estão representados na Figura 3.

Figura 3 – Métodos de produção dos MAAs



Fonte: Próprio autor, 2026.

3.2.2 Ativação alcalina

3.2.2.1 Mecanismo de geopolimerização

A geopolimerização é um processo químico exotérmico, heterogêneo e multifásico no qual precursores ricos em aluminossilicatos amorfos ou parcialmente cristalinos são dissolvidos por uma solução ativadora alcalina e em seguida, reorganizados em uma matriz cimentícia tridimensional estável (Hassan et al., 2025). O mecanismo reacional detalhado a seguir, incluindo a sequência dos três estágios principais de hidrólise, especiação e policondensação, baseia-se nos modelos clássicos propostos por Duxson *et al*. (2007) e Provis e van Deventer (2009).

Na etapa inicial, o elevado pH do ativador, fornecido por íons hidroxila (OH^-), promove o ataque nucleofílico às ligações covalentes Si–O–Si e Si–O–Al presentes na estrutura do precursor. Como as ligações Si–O–Al são mais polarizadas e apresentam menor energia de ligação, elas são rompidas preferencialmente, favorecendo a dissolução progressiva do material e à liberação de espécies de silício e alumínio para a solução. Esse mecanismo de hidrólise alcalina está representado nas Equações 2 e 3.

$$\equiv Si\text{-}O\text{-}Si\equiv + OH^- \rightarrow \equiv Si\text{-}OH + \equiv Si\text{-}O^- \quad (2)$$

$$\equiv Si\text{-}O\text{-}Al\equiv + OH^- \rightarrow \equiv Si\text{-}OH + \equiv Al\text{-}O^- \quad (3)$$

Após a ruptura das ligações da rede aluminossilicatada, os pontos reativos formados passam a interagir com a água presente no meio. Nesse processo, as espécies dissolvidas de silício e alumínio originam grupos silanol (≡Si–OH) e aluminol (≡Al–OH), conforme ilustrado nas Equações 4 e 5. Essa etapa estabiliza temporariamente as superfícies reativas e favorece a liberação contínua de espécies para a solução.

$$\equiv Si\text{-}O^- + H_2O \rightarrow \equiv Si\text{-}OH + OH^- \quad (4)$$

$$\equiv Al\text{-}O^- + H_2O \rightarrow \equiv Al\text{-}OH + OH^- \quad (5)$$

Em meio altamente alcalino, os elementos dissolvidos são rapidamente estabilizados na forma de complexos hidroxilados solúveis, caracterizando a etapa de especiação. O alumínio encontra-se predominantemente como $Al(OH)_4^-$, enquanto o silício forma íons silicato como $SiO(OH)_3^-$ e $SiO_2(OH)_2^{2-}$. Essas espécies constituem os precursores imediatos da polimerização e sua concentração, bem como a razão Si/Al, controla a cinética de reação e a estrutura do gel formado (Equações 6, 7 e 8).

$$\equiv Al\text{-}OH + 3OH^- \rightarrow [Al(OH)_4]^- \quad (6)$$

$$\equiv Si\text{-}OH + OH^- \rightarrow SiO(OH)_3^- \quad (7)$$

$$SiO(OH)_3^- + OH^- \rightleftharpoons SiO_2(OH)_2^{2-} + H_2O \quad (8)$$

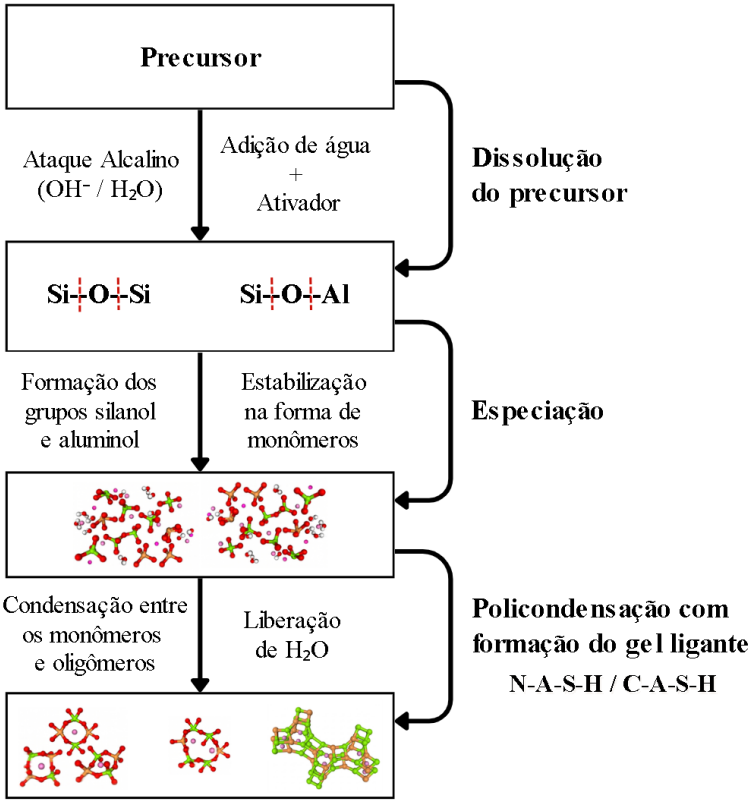
Na sequência, ocorre o rearranjo químico das espécies dissolvidas e a etapa de policondensação, na qual grupos silanol (≡Si–OH) e aluminol (≡Al–OH) reagem entre si por reações de condensação, com eliminação de água ou íons hidroxila, formando novas pontes oxigênio do tipo Si–O–Al e Si–O–Si. Essas reações, representadas nas Equações 9 e 10, promovem a ligação progressiva entre monômeros e oligômeros, resultando no crescimento de uma rede tridimensional contínua. Com o avanço desse processo, o sistema se transforma em um gel amorfo que preenche os vazios, promove a coesão da microestrutura e é responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica do material.

$$\equiv Si\text{-}OH + HO\text{-}Al\equiv \rightarrow \equiv Si\text{-}O\text{-}Al\equiv + H_2O \quad (9)$$

$$\equiv Si\text{-}OH + HO\text{-}Si\equiv \rightarrow \equiv Si\text{-}O\text{-}Si\equiv + H_2O \quad (10)$$

As etapas do mecanismo de geopolimerização podem ser sintetizadas no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma das etapas reacionais de geopolimerização



Fonte: Adaptado de Duxson et al., 2007.

3.2.2.2 Cinética de reação em sistemas binários escória de alto-forno – argila calcinada

Em sistemas binários compostos por escória granulada de alto-forno e argila calcinada, a cinética de reação torna-se mais complexa devido à coexistência de diferentes taxas de dissolução e precipitação térmica (Maier et al., 2020).

Na argila calcinada, o ataque alcalino inicial acontece de forma muito agressiva. Isso ocorre porque a estrutura da caulinita fica tensionada e instável após passar pela desidroxilação térmica no forno. Na prática, o ativador quebra essa estrutura de forma quase imediata, liberando muito calor e íons de aluminato para a solução. Em ensaios de calorimetria isotérmica, essa dissolução acelerada corresponde ao primeiro pico de fluxo de calor, que ocorre de forma tão rápida que a literatura aponta o risco de perda desse sinal inicial em misturas externas, exigindo a calorimetria com mistura interna para capturar os primeiros minutos de reação (Bernal et al., 2011; Siyal et al., 2024).

Após a rápida dissolução inicial, o sistema passa por um período de indução. Em materiais como a argila calcinada, a liberação rápida de íons de alumínio aumenta a concentração dessas partículas na solução e favorece reações intensas de policondensação. Isso caracteriza a etapa de aceleração e formação do gel. Embora esse evento tenha menor fluxo de calor em comparação à etapa de dissolução, seu perfil térmico é mais amplo. Dessa forma, é nessa fase que ocorre a maior liberação de energia acumulada associada à formação e ao endurecimento da matriz nas primeiras horas (Bernal et al., 2011; Maier et al., 2020).

O comportamento térmico inicial da argila calcinada é diferente do observado na escória. A dissolução da escória acontece de forma mais gradual, começando pela quebra de ligações associadas ao cálcio e ao magnésio, como apontado por Zhao *et al*. (2024). Com isso, o pico de aceleração relacionado à formação de sua rede cimentícia tende a ser mais amplo, menos intenso e ocorre em tempos mais tardios (Bernal et al., 2011).

A cinética de reação em sistemas híbridos é fortemente influenciada pela proporção entre os precursores e pela alcalinidade do meio (Gomes et al., 2025; Yip; Lukey; Van Deventer, 2005). Elevados teores de argila calcinada intensificam os eventos térmicos iniciais e favorecem a rápida formação da rede tridimensional. Por outro lado, maiores proporções de escória aceleram as reações posteriores e reduzem o tempo de pega do cimento. A liberação gradual de cálcio pela escória contribui para a consolidação da matriz cimentícia, promovendo uma estrutura mais densa e evidenciando a interação entre os produtos formados (Bernal et al., 2011; Gomes et al., 2025).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Estrutura Metodológica

O trabalho avaliou a trabalhabilidade, a cinética de reação e a resistência mecânica de dois sistemas de cimentos álcali-ativados: um sistema binário, composto por 50% de argila calcinada e 50% de escória granulada de alto-forno, e um sistema ternário, constituído por argila calcinada, escória granulada de alto-forno e calcário calcítico na proporção de 1:1:1, em massa.

Em ambos os sistemas propostos, o teor de ativador alcalino variou entre 15% e 20% em relação à massa total da mistura. Como amostra de referência para fins comparativos, adotou-se um sistema composto exclusivamente por escória granulada de alto-forno como precursor e 12% de ativador alcalino. A adoção dessa formulação justifica-se por se tratar de um traço de referência desenvolvido internamente pela empresa parceira desta pesquisa, atualmente em estágio avançado de validação tecnológica e comercial. O resumo de todas as misturas utilizadas no trabalho encontra-se apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos sistemas álcali-ativados e identificação das misturas

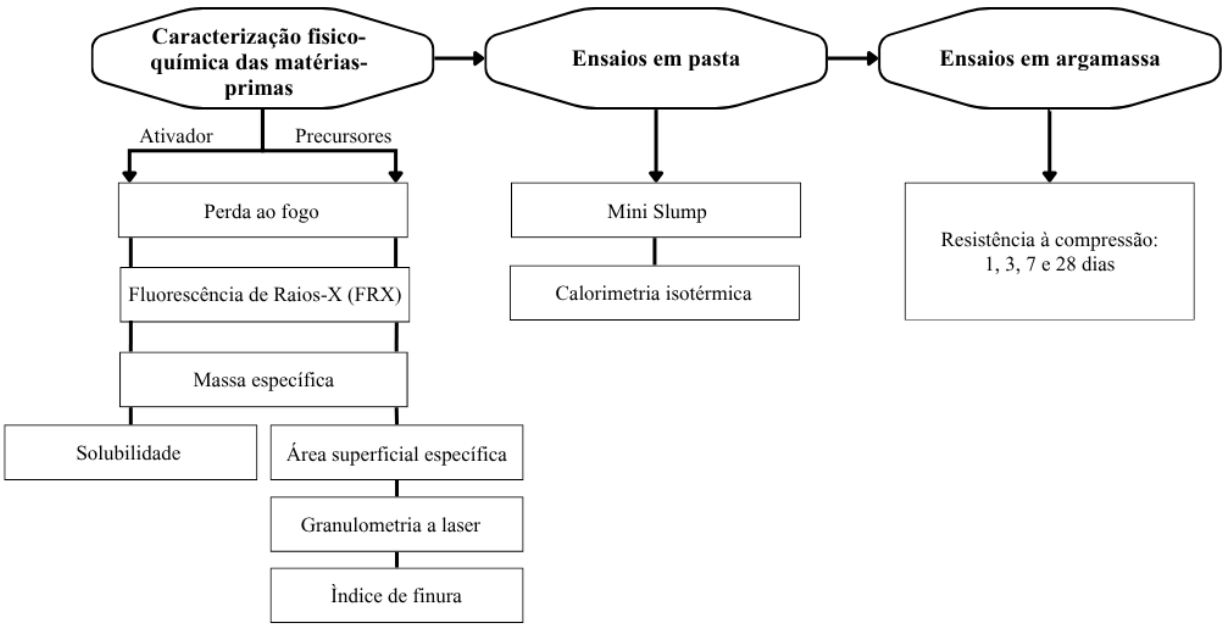
Ativador alcalino (% m/m)	Precursor (% m/m)	Componentes do precursor	Identificação das misturas
15,00	85,00	Sistema binário Argila - Escória (50:50 % m/m)	15-AE
16,25	83,75		16.25-AE
17,50	82,50		17.5-AE
18,75	81,25		18.75-AE
20,00	80,00		20-AE
15,00	85,00	Sistema Ternário Argila - Escória - Calcário (33:33:33 % m/m)	15-AEC
16,25	83,75		16.25-AEC
17,50	82,50		17.5-AEC
18,75	81,25		18.75-AEC
20,00	80,00		20-AEC
12,00	88,00	Referência 100% escória	REF

Fonte: Próprio autor, 2026.

Inicialmente, realizou-se a caracterização físico-química das matérias-primas empregadas, incluindo os precursores e o fíler calcário. Foram conduzidos ensaios de fluorescência de raios X (FRX), determinação da área superficial específica pelo método de Blaine, análise da distribuição granulométrica por difração a laser, índice de finura por peneiramento e perda ao fogo (LOI). Para o ativador alcalino sólido, além da análise composicional por FRX, foi realizado o ensaio de solubilidade.

A avaliação do desempenho dos sistemas propostos e do sistema de referência foi realizada por meio de três metodologias principais. A trabalhabilidade foi determinada na pasta em estado fresco por meio do ensaio de *mini-slump*. A cinética de reação foi monitorada por calorimetria isotérmica. A resistência mecânica do cimento foi avaliada por meio do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, conforme as diretrizes da ABNT NBR 7215 (ABNT, 2025a). O fluxograma apresentado na Figura 5 sintetiza as etapas metodológicas adotadas no desenvolvimento do trabalho.

Figura 5 – Fluxograma metodológico

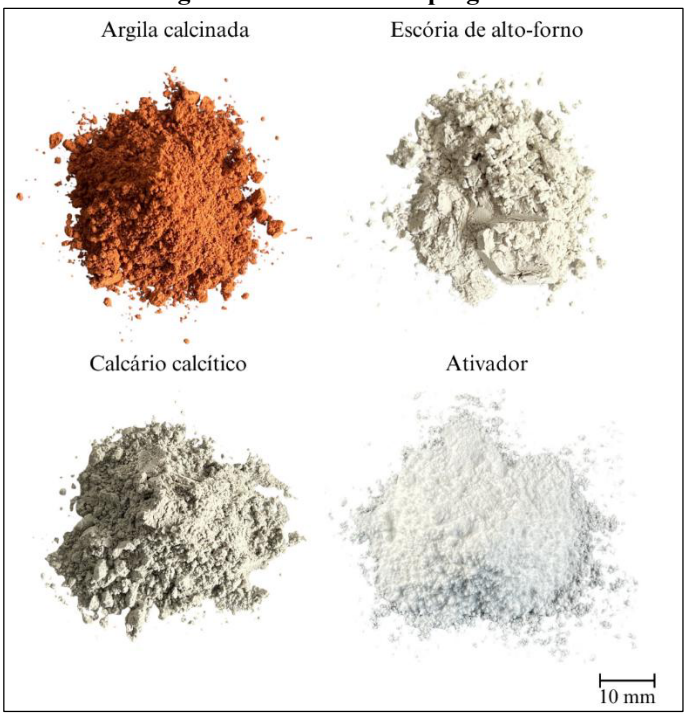


Fonte: Próprio autor, 2026.

4.2 Materiais

Os materiais empregados neste trabalho foram a argila calcinada, escória de alto-forno, calcário calcítico e o ativador alcalino, conforme demonstrados na Figura 6.

Figura 6 – Materiais empregados



Fonte: Próprio autor, 2026.

O ativador alcalino utilizado neste estudo foi fornecido pela Circlua S.A., localizada em Belo Horizonte, MG, Brasil. Trata-se de um produto de natureza proprietária, desenvolvido no âmbito de uma tecnologia patenteada.

Além disso, a argila calcinada empregada como precursor também foi fornecida pela Circlua S.A., apresentando elevado teor de caulinita (>65%) e sendo proveniente de estéril composto por minerais argilosos e hidróxidos de ferro.

A escória granulada de alto-forno (GGBFS), utilizada como precursor cimentício, foi fornecida pela Gerdau e corresponde a um subproduto gerado durante o processo de produção de ferro-gusa. Também foi utilizado calcário calcítico como fíler mineral na composição do sistema ternário, fornecido pela empresa Minasol Calcário.

Por fim, para a moldagem das argamassas, foram empregados agregados miúdos normalizados conforme a ABNT NBR 16541:2016 (ABNT, 2016b), constituídos pelas frações fina, média fina, média grossa e grossa.

4.3 Métodos

Para o desenvolvimento e avaliação dos sistemas álcali-ativados, os ensaios experimentais deste trabalho foram conduzidos com base nos procedimentos estabelecidos pelas Normas Brasileiras (ABNT). Para a classificação de desempenho do cimento desenvolvido, os resultados foram comparados aos critérios estabelecidos na ASTM C1948-24 (ASTM, 2024). Trata-se da norma internacional mais recente e específica para cimentos álcali-ativados, a qual estabelece requisitos mínimos de propriedades físicas e mecânicas voltados exclusivamente à avaliação de desempenho desses materiais. Embora a ASTM C1948-24 referencie métodos de ensaio baseados em normas americanas, os princípios físicos e mecânicos avaliados são equivalentes aos adotados pelas normas nacionais. Na sequência, são apresentados os métodos empregados em cada etapa do trabalho.

4.3.1 Caracterizações das Matérias-Primas

4.3.1.1 Perda ao fogo

A perda ao fogo (LOI) foi determinada com base na ABNT NBR 17086-6:2025 (ABNT, 2025b) com o objetivo de quantificar a presença de compostos voláteis, como água estrutural, matéria orgânica e carbonatos, atuando como parâmetro de controle da composição das matérias-primas. Adicionalmente, os resultados de LOI foram utilizados como informação complementar à análise por fluorescência de raios X (FRX), permitindo a correta interpretação da composição química dos materiais. Para a realização do ensaio de perda ao fogo, cada amostra de argila calcinada, escória de alto-forno, calcário calcítico e o ativador sólido foi submetida à calcinação em cadinhos em triplicata à temperatura de 950°C por 1h. A perda ao fogo final corresponde a média desses três valores. A perda ao fogo individual é calculada com base na Equação 11.

$$LOI = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100 \quad (11)$$

Sendo:

m: a massa da amostra utilizada no ensaio (g);

m_1: a massa do cadinho mais a massa da amostra (g);

m_2: a massa do cadinho mais a massa da amostra, após a calcinação (g).

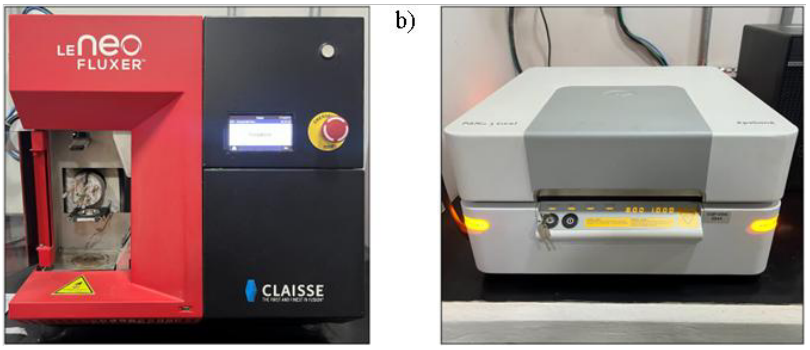
4.3.1.2 Fluorescência de raios X (FRX)

A composição química dos precursores e do ativador alcalino foi determinada quantitativamente por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), permitindo a quantificação dos principais óxidos constituintes, essenciais para a compreensão do comportamento químico do sistema.

Para a realização deste ensaio, uma alíquota de cada amostra de matéria-prima foi fundida em uma máquina de fusão (modelo Le Neo Fluxer, Claisse) utilizando uma mistura fundente à base de borato. Esse processo resultou na formação de uma pastilha vítrea homogênea, eliminando assim as interferências mineralógicas e os efeitos causados pelo tamanho das partículas. Em seguida, a pastilha obtida foi analisada em um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva da marca Malvern Panalytical, modelo Epsilon 4, sendo ambos os equipamentos ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – (a) Máquina de fusão e (b) EDXRF

a) b)



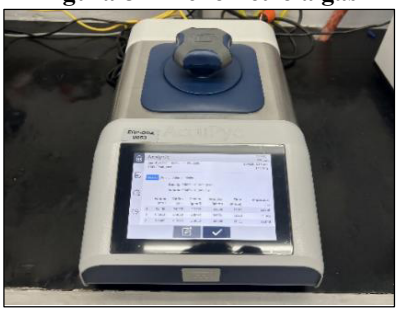
Fonte: Próprio autor, 2026.

Durante a análise, a amostra foi irradiada por um feixe primário de raios X, promovendo a emissão de radiação secundária característica de cada elemento presente. Essa radiação foi detectada pelo equipamento, permitindo a identificação e quantificação dos elementos com base em suas energias características. As intensidades medidas foram convertidas em concentrações por meio de curvas de calibração obtidas com padrões de referência. Os resultados foram expressos na forma de óxidos estáveis, com normalização a 100%, considerando os valores previamente determinados de perda ao fogo.

4.3.1.3 Massa específica real

A massa específica dos materiais em pó foi determinada por picnometria a gás, utilizando hélio como fluido de medição, por meio de um picnômetro a gás da Micromeritics Instrument Corporation, modelo AccuPyc, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Picnômetro a gás



Fonte: Próprio autor, 2026.

O método baseia-se na variação de pressão de um gás em volumes conhecidos, que, sob condições de temperatura constante, é descrita pela relação de Boyle, apresentada na Equação 12. Esse princípio permite a determinação do volume real das partículas. Como o hélio penetra nos poros abertos, o volume medido corresponde ao volume sólido das partículas acrescido dos poros não acessíveis ao gás, como os poros fechados. A partir desse volume e da massa previamente determinada, calcula-se a massa específica real do material. O ensaio foi conduzido de acordo com as diretrizes da ABNT NBR ISO 12154:2022 (ABNT, 2022).

$$P_1V_1=P_2V_2 \quad (12)$$

Sendo:

P_1: a pressão inicial na câmara de gás comprimido;

P_2: a pressão final do sistema equilibrado;

V_1: o volume da câmara de gás comprimido;

V_2: o volume total acessível ao gás no sistema.

4.3.1.4 Área superficial específica

A área superficial específica dos materiais foi determinada pelo método de Blaine, conforme a ABNT NBR 16372:2015 (ABNT, 2015), com o objetivo de avaliar o grau de finura dos materiais. O ensaio foi realizado utilizando analisador automático de Blaine modelo PP120, conforme ilustrado na Figura 9. O método baseia-se na medição do tempo necessário para que um volume de ar escoe através de uma camada compactada de material, com porosidade e dimensões controladas. A resistência à passagem do ar está diretamente relacionada à área superficial das partículas, de modo que materiais mais finos apresentam maior superfície específica e, consequentemente, maiores tempos de escoamento.

Figura 9 – Analisador automático de Blaine



Fonte: Próprio autor, 2026.

4.3.1.5 Granulometria a laser

A distribuição do tamanho de partículas dos precursores e do fíler foi determinada por meio de granulometria a laser. As medições foram realizadas utilizando um granulômetro a laser (*Particle Size Analyzer* – PSA), conforme ilustrado na Figura 10. O princípio do método baseia-se na interação entre um feixe de laser incidente e as partículas dispersas da amostra. A partir da análise do padrão de espalhamento e difração da luz, o sistema do equipamento calcula a distribuição granulométrica do material, permitindo a obtenção da distribuição granulométrica na faixa de 0,1 μm a 3000 μm.

Figura 10 – Granulômetro a laser



Fonte: Próprio autor, 2026.

4.3.1.6 Índice de finura

O índice de finura dos materiais foi determinado com o intuito de quantificar a fração de partículas mais grosseiras presentes nas amostras, servindo como um parâmetro complementar às análises de área superficial e distribuição granulométrica a laser. O ensaio foi conduzido segundo com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 12826:2014 (ABNT, 2014). Para a realização das medições, empregou-se um peneirador aerodinâmico, modelo A058-05N (Matest), conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Peneirador aerodinâmico



Fonte: Próprio autor, 2026.

O princípio do método baseia-se na aplicação de um fluxo de ar controlado que atravessa a malha da peneira de baixo para cima, promovendo a desaglomeração do pó e o arraste contínuo das partículas mais finas, enquanto a fração de material mais grosso permanece retida para posterior pesagem. O cálculo para a obtenção deste índice foi realizado por meio da Equação 13.

$$I_f = \frac{R \cdot F_c}{M} \cdot 100 \quad (13)$$

Onde:

I_f: é o índice de finura do material na peneira selecionada (%);

R: é a massa do material retido na peneira (g);

M: é a massa inicial do material ensaiado (g);

F_c: é o fator de correção da peneira utilizada (assumindo-se o bom estado de conservação e limpeza da malha do equipamento, o fator de correção foi considerado unitário).

4.3.1.7 Solubilidade

A determinação do teor de resíduo insolúvel do ativador alcalino foi realizada por meio de ensaio de solubilidade em meio aquoso, executado em triplicata. O procedimento consistiu na dispersão de 10 g de amostra em 400 g de água destilada, seguida de agitação magnética contínua a aproximadamente 600 rpm por 15 minutos. Após 1 minuto de repouso, a suspensão foi submetida

à filtração utilizando sistema com membrana de porosidade de 0,45 μm. O conjunto contendo o filtro e o material retido foi então seco em balança determinadora de umidade e, posteriormente, resfriado em dessecador até atingir a temperatura ambiente.

O percentual de resíduo insolúvel (RI) foi determinado por via gravimétrica, conforme a Equação 14.

$$RI = \frac{M_{cj}}{M_f} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde:

RI: é o resíduo insolúvel (%);

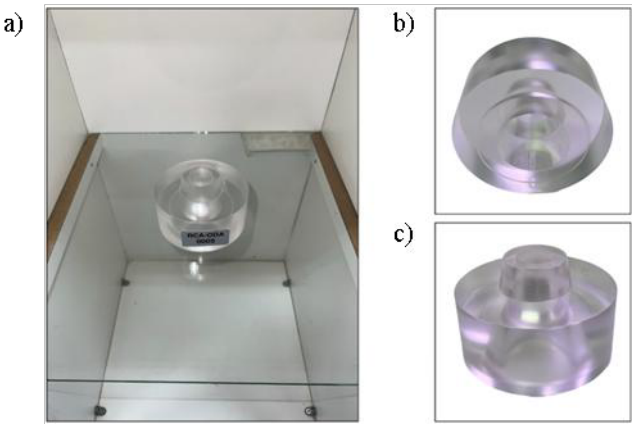
M_{cj}: é a massa do conjunto (bandeja + filtro) contendo o resíduo após secagem (g);

M_f: é a massa do conjunto pesa-filtro e filtro mais material insolúvel após a secagem (g).

4.3.2 Mini-slump

A avaliação da trabalhabilidade no estado fresco foi realizada por meio do ensaio de *mini-slump*, uma adaptação em escala reduzida do ensaio tradicional de abatimento do tronco de cone, amplamente empregada para a caracterização de pastas (Dörr et al., 2020). Para sua execução, utiliza-se um molde tronco-cônico, conhecido como cone de Kantro, que possui dimensões padronizadas de 19 mm de diâmetro superior, 38 mm de diâmetro inferior e 57 mm de altura (Kantro, 1980). Esse molde é posicionado no centro de uma placa de vidro nivelada, cuja principal vantagem é permitir o acoplamento de um dispositivo de filmagem na parte inferior, possibilitando o registro do espalhamento da pasta de baixo para cima. Na face inferior dessa placa de vidro, há uma escala em milímetros. O aparato experimental e o cone utilizado no ensaio estão apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Aparato do *Mini-slump*: (a) posicionamento do cone de Kantro na base de ensaio; (b) Perspectiva inferior do cone; e (c) Perspectiva superior do cone.



Fonte: Próprio autor, 2026.

Para o ensaio, foram utilizados 100 g de cimento para cada amostra, com relação água/cimento de 0,48. O procedimento metodológico iniciou-se com o vertimento do material seco no recipiente contendo água, seguido do início imediato da mistura. As pastas foram preparadas individualmente, utilizando um dispersor de alta velocidade, com rotação de 1000 rpm durante 60 segundos.

Antes do ensaio, a placa de vidro foi umedecida e o cone, previamente centralizado, foi preenchido com a pasta. Após o preenchimento, aguardaram-se 30 segundos, e o cone foi então levantado verticalmente de forma contínua, ao longo de aproximadamente 10 segundos, garantindo o completo escoamento do material. O diâmetro de espalhamento foi medido em três direções distintas.

Para obtenção de medidas mais precisas, minimizando erros de leitura, foi realizada a análise das imagens obtidas por filmagem. Selecionou-se o instante correspondente à abertura máxima da pasta, a partir do qual foi feita a captura de tela. As imagens foram então importadas para o software de processamento de imagens *ImageJ*.

Inicialmente, realizou-se a calibração da escala da imagem (relação pixel/milímetro) a partir de uma referência de comprimento conhecido (10 mm), obtida com base na régua presente na própria imagem. Em seguida, a região de interesse correspondente ao espalhamento da pasta foi delimitada e recortada. A imagem foi então convertida para escala de cinza (8 bits) e submetida a um processo de limiarização, no qual um valor de intensidade é definido para separar a pasta do fundo, permitindo sua conversão em uma imagem binária e o isolamento preciso da geometria de

espalhamento. Posteriormente, a área ocupada pela pasta foi determinada automaticamente por meio de análise de imagem. A partir desse valor, calculou-se o diâmetro equivalente final da mistura.

Os diâmetros obtidos permitem inferir o comportamento reológico das pastas, especialmente a tensão de escoamento dinâmica, que representa a tensão mínima necessária para manter o material fluindo, ou a tensão no exato momento em que o escoamento é interrompido. Essa propriedade pode ser estimada a partir do diâmetro de espalhamento por meio do modelo teórico proposto por Roussel *et al*. (2005) e Roussel e Coussot (2005), posteriormente validado para pastas álcali-ativadas por Tan, Bernal e Provis (2017). Nesse modelo, a tensão de escoamento é inversamente proporcional ao diâmetro final de espalhamento, sendo calculada em função do volume geométrico do cone de Kantro e da densidade da pasta no estado fresco, conforme a Equação 15 (Tan; Bernal; Provis, 2017).

$$\tau_0 = \frac{225 \rho g V^2}{128 \pi^2 R^5} \quad (15)$$

Onde:

τ_0: é a tensão limite de escoamento (Pa);

ρ: é a massa específica da pasta (kg/m^3);

g: é a aceleração da gravidade (m/s^2);

V: é o volume do cone de Kantro (m^3);

R: é o raio final de espalhamento da mistura (m).

4.3.3 Calorimetria isotérmica

A cinética de reação e o calor liberado pelas formulações de cimento foram avaliados por meio de calorimetria isotérmica, utilizando um calorímetro modelo TAM Air (TA Instruments), equipado com oito canais duplos. As pastas foram preparadas adotando-se a mesma relação água/cimento (a/c = 0,48) dos demais ensaios.

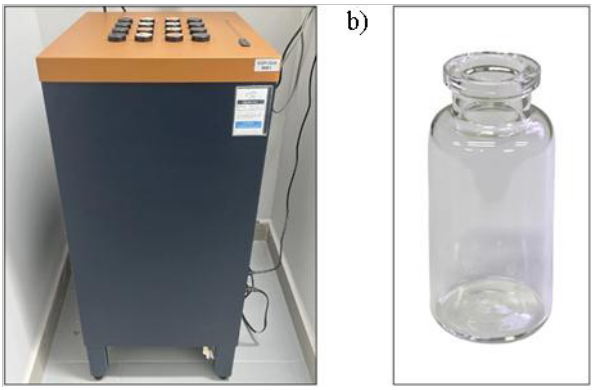
O preparo das amostras foi realizado por mistura externa manual entre o material cimentício e água destilada. Imediatamente após a homogeneização, aproximadamente 5 g da pasta foram transferidos para uma ampola, a qual foi devidamente selada e inserida no calorímetro. O

ensaio foi conduzido com monitoramento contínuo do fluxo de calor e do calor acumulado por um período de 72 horas.

Após a aquisição, os dados foram normalizados em relação à massa de cimento presente na amostra, sendo o fluxo de calor expresso em mW/g e o calor acumulado em J/g. Para a análise do calor acumulado, consideraram-se os dados a partir de 45 minutos após a inserção da ampola no equipamento, de modo a desconsiderar o período inicial de estabilização térmica. A Figura 13 apresenta o calorímetro e a ampola utilizados no ensaio.

Figura 13 – (a) Calorímetro isotérmico TAM Air; (b) Ampola utilizada no ensaio.

a) b)



Fonte: Próprio autor, 2026.

4.3.4 Resistência à compressão

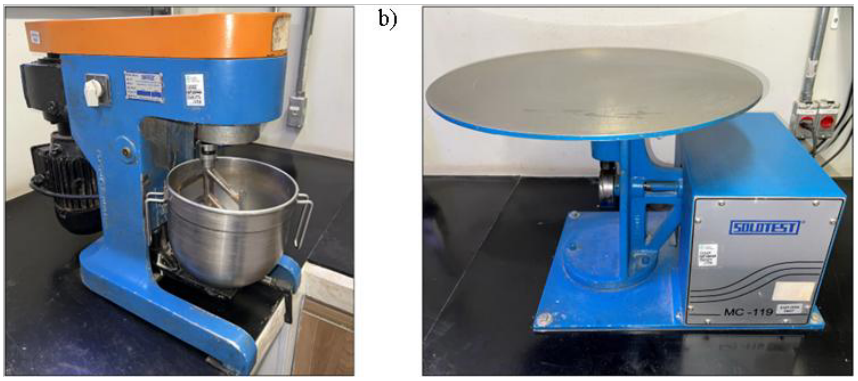
A avaliação do desempenho mecânico das misturas no estado endurecido foi realizada por meio do ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos, adotando-se as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 7215 (ABNT, 2025a). Para a dosagem, adotou-se o traço padrão em massa de 1:3, uma parte de cimento álcali-ativado para três partes de areia normalizada, sendo a areia normalizada dividida em 4 partes fração grossa, grossa média, fina e fina média. A relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,48, a mesma adotada para os demais ensaios em pasta.

A mistura mecânica da argamassa foi executada em uma argamassadeira, seguindo rigorosamente os procedimentos normativos. Imediatamente após a mistura, procedeu-se à determinação do índice de consistência, a fim de avaliar a fluidez da mistura no estado fresco, conforme os parâmetros da ABNT NBR 13276 (ABNT, 2016a).

Para a realização deste ensaio, utilizou-se uma mesa elétrica de consistência (modelo MC-199, SOLOTEST), sobre a qual centralizou-se um molde troncocônico metálico. O preenchimento do molde foi realizado com o auxílio de uma espátula, dividido em três camadas sucessivas, sendo cada uma adensada por meio de golpes com um soquete padrão. Após o preenchimento e o rasamento do topo, o molde foi removido verticalmente com cuidado. Em seguida, a mesa de consistência foi acionada para aplicar quedas sucessivas e padronizadas, provocando o abatimento e o espalhamento da argamassa. Com o uso de um paquímetro, mediu-se o diâmetro final do círculo formado pelo material em 3 posições diferentes. O índice de consistência da mistura foi registrado a partir da média dessas medições, expresso em milímetros. Finalizada a leitura, todo o material espalhado foi recolhido, homogeneizado manualmente e reintegrado ao restante da mistura para dar continuidade à moldagem dos corpos de prova. A argamassadeira e a mesa elétrica de consistência estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – (a) Argamassadeira; (b) Mesa elétrica de consistência.

a) b)



Fonte: Próprio autor, 2026.

Em seguida, os corpos de prova foram moldados em fôrmas cilíndricas metálicas de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura. Com o auxílio de um funil e uma espátula, a argamassa foi inserida nos moldes em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi adensada com 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos utilizando um soquete padronizado, sendo o topo nivelado com uma espátula.

Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura inicial, ainda dentro dos moldes, por um período de 24 a 48 horas. Transcorrido este prazo, as amostras foram desmoldadas

e submetidas à cura úmida até o momento exato dos rompimentos, realizados nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

Os ensaios de compressão foram conduzidos em um sistema conjugado Intermetric, composto por uma máquina universal de ensaios acoplada a uma prensa hidráulica iM-300kN (Figura 15). O ensaio foi configurado para o método correspondente à compressão de cilindros de 50x100 mm, aplicando-se uma taxa de carregamento contínua de 0,25 MPa/s até a ruptura da amostra. Para cada idade e traço avaliados, rompeu-se um conjunto de quatro corpos de prova, adotando-se a média dos resultados válidos como a resistência final do sistema.

Figura 15 – Máquina universal de ensaios e prensa hidráulica



Fonte: Próprio autor, 2026.

Por fim, para avaliar a influência do teor de ativador alcalino na resistência à compressão, os dados experimentais foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e regressão polinomial. O ajuste do modelo foi realizado nessa etapa final, adotando-se um nível de significância de 5% ($p < 0,05$), buscando minimizar os erros e obter a equação mais simples capaz de representar adequadamente os dados experimentais. O modelo obtido permite estimar a resistência mecânica em função do teor de ativador dentro da faixa estudada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das Matérias-Primas

A caracterização físico-química das matérias-primas, incluindo parâmetros como composição química, área específica e demais propriedades relevantes, está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterizações das matérias-primas utilizadas

Técnica de caracterização	Parâmetros	Ativador	Escória de Alto-forno	Argila Calcinada	Calcário Calcítico
Fluorescência de Raios X (FRX)	SiO_2 (%)	47,2	35,8	39,4	2,0
	Al_2O_3 (%)	0,0	10,5	32,7	0,4
	Fe2O3 (%)	0,3	1,9	22,7	0,2
	CaO (%)	0,1	41,2	0,0	50,0
	MgO (%)	0,0	7,9	0,0	10,7
	TiO_2 (%)	0,0	0,5	1,7	0,1
	P_2O_5 (%)	0,0	0,0	0,2	0,3
	Na_2O (%)	48,6	0,2	0,2	0,3
	K_2O (%)	0,1	0,4	0,0	0,0
	MnO (%)	0,0	0,7	0,1	0,0
Granulometria a laser	D10 (μm)	-	2,3	1,5	1,8
	D50 (μm)	-	13,9	9,5	15,1
	D90 (μm)	-	38,9	46,5	61,1
	Dmédio (μm)	-	18,6	17,9	25,2
	Span	-	2,6	4,7	3,9
Picnometria à Gás	Massa Específica (g/cm^3)	2,53	2,96	3,04	2,81
Perda ao fogo	Perda ao Fogo (%)	5,48	0,84	1,85	44,36
Blaine	Área Superficial (cm^2/g)	-	4036,1	-	4729,8
Índice de Finura	Finura #325 (45 μm)	-	3,42%	14,45%	28,02%
Solubilidade	Resíduos Insolúveis (%)	10,4	-	-	-
	pH	12,7	-	-	-

Fonte: Próprio autor, 2026.

A caracterização química dos materiais mostrou composições adequadas para aplicação em sistemas álcali-ativados. A escória de alto-forno apresentou elevados teores de CaO, 41,2%, e SiO_2, 35,8%, com relações CaO/SiO_2 e Al_2O_3/SiO_2 compatíveis com faixas favoráveis à ativação alcalina e à formação do gel C-A-S-H (Provis; Van Deventer, 2014). O baixo teor de perda ao fogo, de 0,84%, indica reduzida presença de umidade e carbonatação. Além disso, o resfriamento rápido utilizado na produção da escória granulada favorece a formação de fases predominantemente vítreas, associadas à maior reatividade do material.

A argila calcinada apresentou elevados teores de sílica, 39,4%, e alumina, 32,7%, principais óxidos formadores de rede envolvidos nos mecanismos de ativação alcalina e na formação da matriz cimentante (Duxson et al., 2007). O somatório de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 atingiu 94,8%, atendendo com ampla margem ao limite mínimo estabelecido pela ASTM C618 para materiais pozolânicos (ASTM, 2017). O baixo valor de perda ao fogo, de 1,85%, sugere eficiência do processo de calcinação e reduzida presença de fases hidratadas ou matéria orgânica residual. Além disso, o elevado teor de Fe_2O_3, de 22,7%, caracteriza o material como uma argila ferruginosa, justificando sua maior massa específica, de 3,04 g/cm³, em relação aos demais precursores. Já o calcário apresentou elevada perda ao fogo, de 44,36%, compatível com a decomposição dos carbonatos presentes no material.

O ativador alcalino apresentou 47,2% de SiO_2 e 48,6% de Na_2O, resultando em um módulo de sílica igual a 1. Essa composição favorece a dissolução dos precursores e a formação dos géis C-A-S-H e N-A-S-H (Provis; Van Deventer, 2014). A análise de solubilidade gerou uma solução com pH de 12,7, valor que comprova sua capacidade de fornecer o meio altamente alcalino necessário para acelerar a cinética de reação. O ensaio indicou ainda a presença de 10,4% de resíduos insolúveis, associados a partículas minerais que não participam diretamente das reações de ativação.

Na caracterização física, a argila calcinada apresentou o menor diâmetro mediano do sistema, com D50 de 9,5 μm, favorecendo o efeito fíler e aumentando os sítios de nucleação para formação dos produtos de reação. O índice de Blaine não foi determinado para esse material devido à limitação do método para partículas lamelares. Como a técnica se baseia na permeabilidade ao ar, a geometria em placas da argila dificulta a passagem do fluxo durante o ensaio e pode superestimar a área superficial específica. A escória apresentou elevada área superficial, de 4036,1

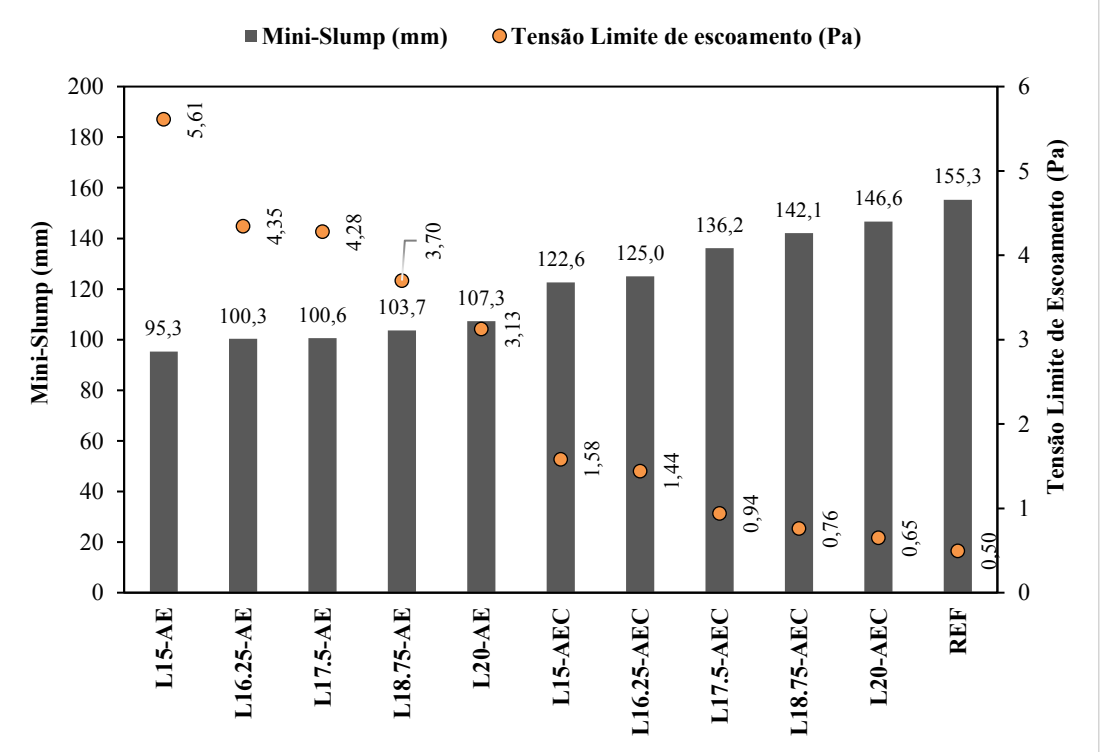
cm²/g, e baixa retenção na peneira de 45 µm, de 3,42%, indicando moagem eficiente. Já o calcário apresentou maior tamanho médio de partículas, com D50 de 15,1 µm, maior retenção na peneira de 45 µm, de 28,02%, e elevada área superficial específica, de 4729,8 cm²/g.

Por fim, os resultados atenderam aos critérios da ASTM C1948/C1948M-24. A norma não estabelece limites químicos para os materiais individuais, mas exige a caracterização dos precursores e a identificação dos principais óxidos constituintes. Dessa forma, os materiais analisados apresentaram composição química compatível com os requisitos normativos para sistemas cimentícios álcali-ativados.

5.2 Mini-slump

Os resultados do ensaio de *mini-slump* e da tensão limite de escoamento estimada para as diferentes formulações estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 – *Mini-slump* das pastas avaliadas



Fonte: Próprio autor, 2026.

A incorporação da argila calcinada no sistema binário reduziu significativamente a trabalhabilidade, resultando nos menores valores de espalhamento, entre 95,26 mm e 107,26 mm. Além de sua morfologia lamelar, esse comportamento é fortemente governado pela granulometria do material, uma vez que a argila calcinada apresentou o menor diâmetro mediano do sistema (D50 de 9,5 μm). Logo, a elevada concentração de partículas finas aumenta expressivamente a demanda por líquido de molhagem das superfícies, reduzindo a fração de fluido livre disponível para a lubrificação da suspensão (Dörr et al., 2020; Van Deventer et al., 2010).

A introdução do calcário no sistema ternário promoveu melhora significativa da fluidez, com incremento médio de 32,4% no diâmetro de espalhamento em comparação aos traços binários equivalentes. Esse ganho reológico está diretamente relacionado à distribuição granulométrica do calcário, que se caracteriza por uma curva mais ampla (Span de 3,9) e pela presença de uma fração grossa representativa (D50 de 15,1 μm e retenção de 28,02% na peneira de 45 μm).

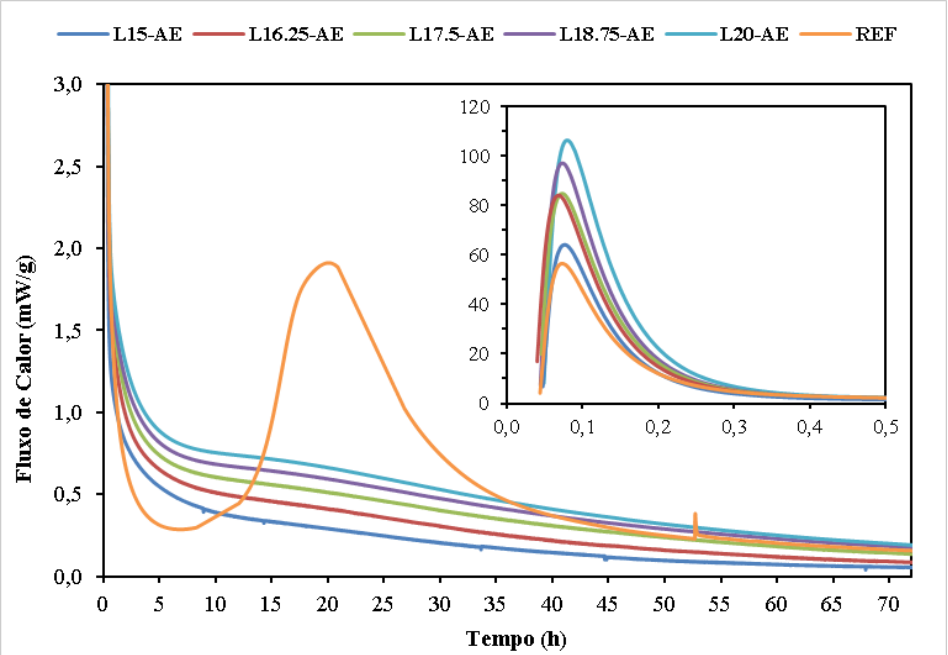
Essa maior amplitude de tamanhos de partículas otimiza o empacotamento granular da matriz cimentícia, reduzindo o volume de vazios interparticulares. Consequentemente, a demanda de fluido para preencher esses vazios diminui, disponibilizando um maior volume de ativador para atuar na lubrificação do sistema, o que reduz a viscosidade e facilita o fluxo.

Além da composição dos precursores, o aumento do teor de ativador alcalino também contribuiu para o aumento do mini-slump e para a redução da tensão de escoamento em todas as formulações. Segundo Dörr et al. (2020), maiores teores de ativador aumentam a fração líquida efetiva da mistura devido à presença de espécies dissolvidas na solução alcalina, intensificando os efeitos de lubrificação hidrodinâmica entre as partículas sólidas. Dessa forma, as misturas binárias apresentaram maior coesão e maior tensão limite de escoamento, enquanto os sistemas ternários demonstraram maior diâmetro de espalhamento e menores exigências de tensão dinâmica para o escoamento

5.3 Calorimetria Isotérmica

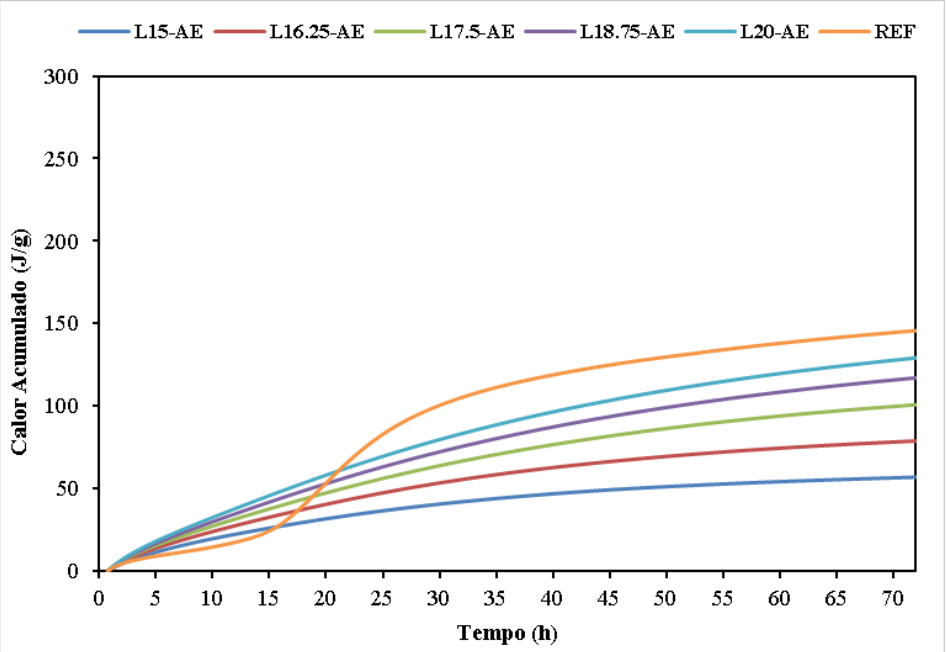
Os resultados de fluxo de calor e calor acumulado dos sistemas binários estão apresentados nas Figuras 17 e 18, e, para o sistema ternário, nas Figuras 19 e 20. Já a Tabela 3 apresenta os parâmetros calorimétricos das formulações avaliadas.

Figura 17 – Fluxo de calor do sistema binário



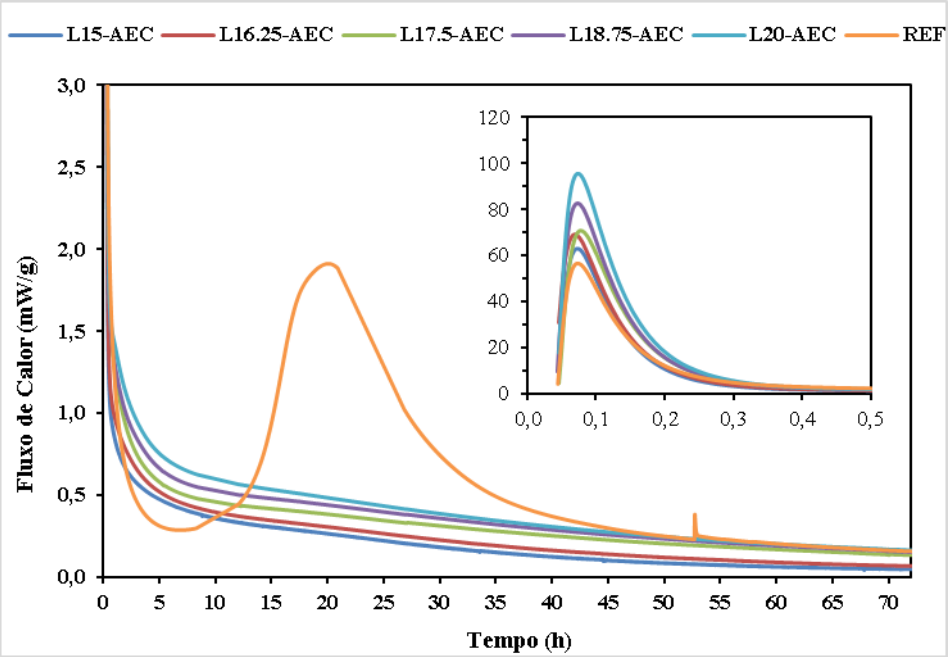
Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 18 – Calor acumulado do sistema binário



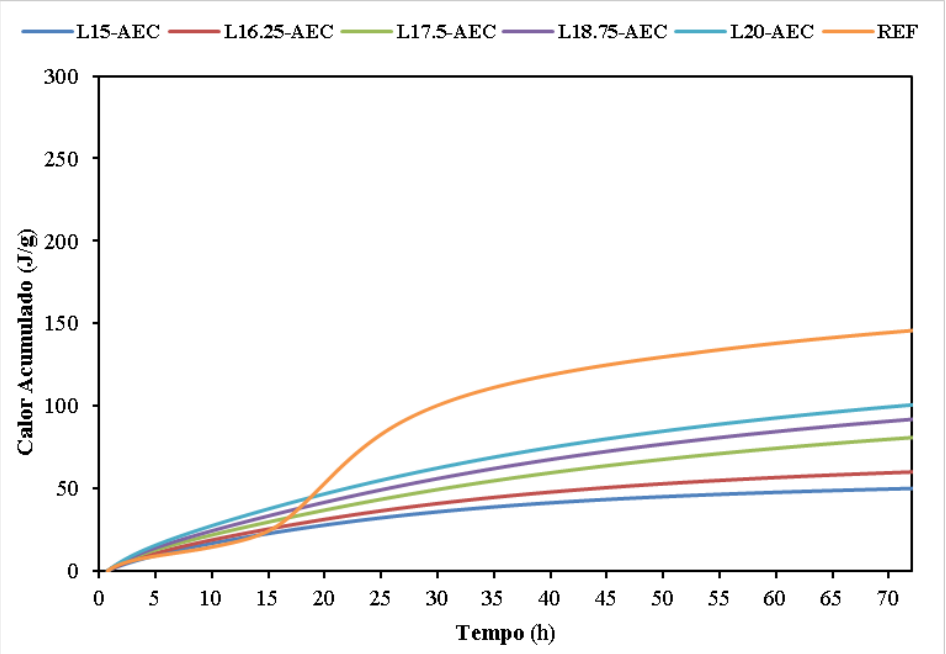
Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 19 – Fluxo de calor do sistema ternário



Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 20 – Calor acumulado do sistema ternário



Fonte: Próprio autor, 2026.

Tabela 3 – Fluxo de calor máximo e calor acumulado total das misturas

Misturas	Fluxo de calor máximo (mW/g)	Calor acumulado total (J/g)
L15-AE	64,11	56,86
L16.25-AE	84,08	78,81
L17.5-AE	84,81	100,73
L18.75-AE	97,22	117,06
L20-AE	106,44	129,14
L15-AEC	63,04	50,05
L16.25-AEC	69,15	60,01
L17.5-AEC	70,76	80,84
L18.75-AEC	82,73	91,91
L20-AEC	95,51	100,65
REF	56,60	145,69

Fonte: Próprio autor, 2026.

A análise da calorimetria isotérmica evidenciou diferenças na cinética de reação das formulações. A mistura REF apresentou um pico inicial de elevada liberação de calor, atingindo 56,60 mW/g aos 4,46 min, associado à dissolução inicial da escória. Entretanto, esse primeiro pico pode estar parcialmente superestimado devido à estabilização térmica do sistema no calorímetro durante os instantes iniciais do ensaio. Após essa etapa, observou-se um período de indução seguido por um pico secundário próximo de 20 h, comportamento típico de sistemas à base de escória ativada (Usherov-marshak et al., 2021). Esse segundo pico está relacionado à aceleração das reações de hidratação e à formação dos géis C-A-S-H, responsáveis pelo endurecimento da matriz e pelo elevado calor acumulado do sistema, de 129,14 J/g.

A introdução da argila calcinada no sistema binário e ternário, juntamente com o aumento do teor de ativador, alterou significativamente o comportamento térmico do sistema. Diferentemente da mistura REF, as pastas contendo argila exibiram apenas um pico inicial intenso, seguido por um longo período de desaceleração até o final do ensaio. Esse comportamento está relacionado à rápida dissolução das espécies de alumínio, que promove a formação precoce de uma camada de gel sobre as partículas ainda não reagidas. Essa camada dificulta o avanço das reações, fazendo com que o processo passe a ocorrer de forma mais lenta por difusão (Siyal et al., 2024), o que explica a ausência de um segundo pico bem definido e a manutenção de baixos valores de fluxo de calor ao longo do ensaio, período associado à formação simultânea dos géis N-A-S-H

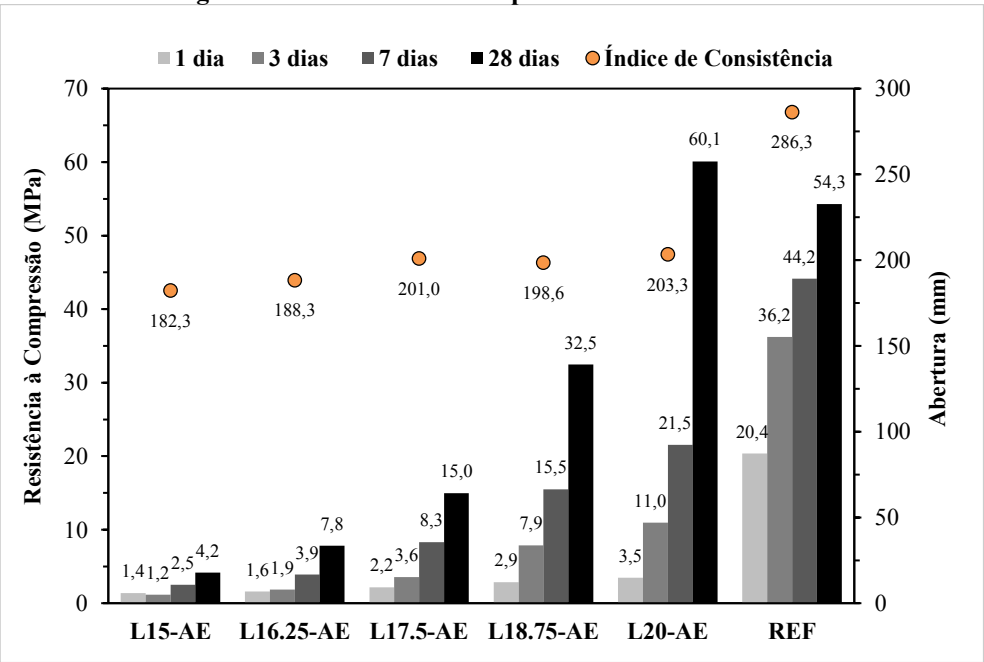
e C-A-S-H (Yip; Lukey; Van Deventer, 2005). Além disso, o aumento do teor de ativador elevou o calor total acumulado devido à maior disponibilidade de íons hidroxila, intensificando a dissolução dos precursores e as reações de ativação.

Por outro lado, a incorporação de calcário no sistema ternário reduziu o fluxo de calor máximo, atingindo 95,51 mW/g, além de diminuir o calor total acumulado para 100,65 J/g. Esse comportamento pode ser explicado principalmente pelo efeito de diluição, uma vez que o calcário apresenta menor reatividade inicial em comparação aos demais precursores. Segundo Ren *et al*. (2024), a menor participação inicial do calcário nas reações aumenta a quantidade de água livre disponível no sistema. Essa água excedente atua absorvendo parte da energia térmica gerada pela ativação alcalina dos demais precursores, resultando na medição de um menor fluxo de calor.

5.4 Desempenho Mecânico

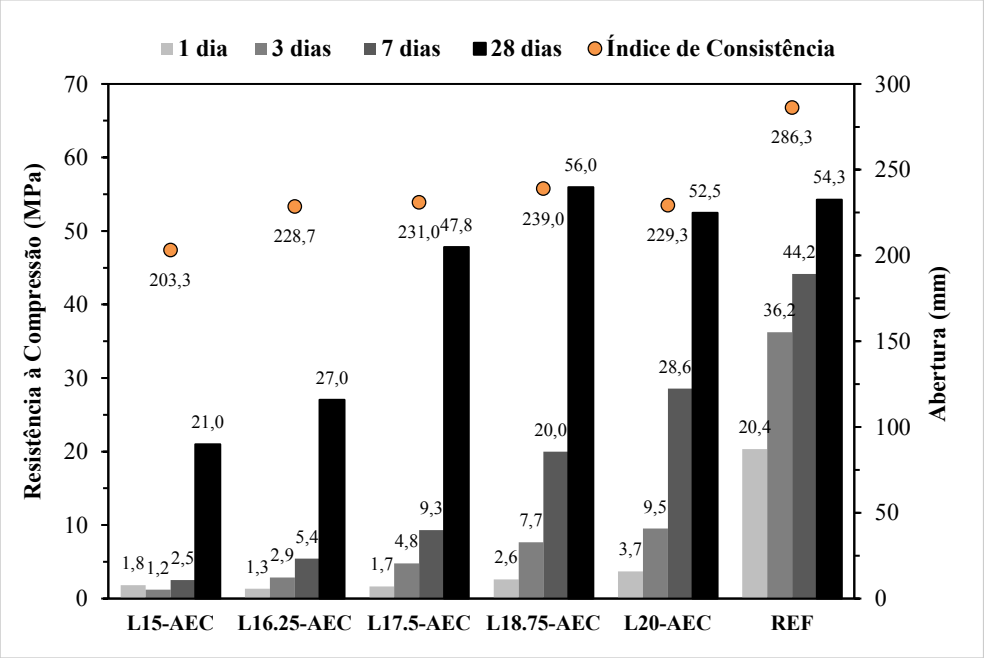
Os resultados de resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, bem como os valores de índice de consistência das formulações binárias e ternárias, estão apresentados na Figura 21 e Figura 22, respectivamente.

Figura 21 – Resistência à compressão do sistema binário



Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 22 – Resistência à compressão do sistema ternário



Fonte: Próprio autor, 2026.

O cimento REF apresentou a elevada reatividade esperada, com ganho de resistência inicial de 20,4 MPa em 1 dia, atingindo 54,3 MPa aos 28 dias. Além disso, suas resistências em idades iniciais e intermediárias foram superiores às observadas nos sistemas AE e AEC.

Nos sistemas álcali-ativados binário e ternário, a introdução da argila calcinada modificou significativamente a cinética inicial das reações. Conforme observado na análise de calorimetria, a rápida formação de uma camada de gel primário sobre as partículas ainda não reagidas faz com que a reação passe a ocorrer principalmente por difusão (Siyal et al., 2024). Esse comportamento explica as baixas resistências iniciais observadas em todos os sistemas contendo argila, em comparação com a mistura de referência. Além disso, o desenvolvimento da resistência mostrou forte dependência do teor de ativador. Em baixas dosagens, como no traço L15-AE, a quantidade de íons hidroxila (OH^-) disponível não é suficiente para manter a dissolução eficiente dos precursores, resultando em baixos valores de resistência, atingindo apenas 4,2 MPa aos 28 dias.

Com o aumento do teor de ativador, a maior alcalinidade intensificou a dissolução da sílica e da alumina, favorecendo uma maior formação e interligação dos géis gerados. Esse efeito explica

o bom desempenho do traço L20-AE, que atingiu 60,1 MPa aos 28 dias, superando a resistência final da mistura de referência.

No sistema ternário, observou-se que as formulações apresentaram maiores resistências aos 7 e 28 dias para teores de ativador entre 15% e 18,75%, superando o sistema binário nessa faixa. Esse ganho de resistência pode estar relacionado a dois mecanismos principais. O primeiro está associado ao papel físico e químico do calcário. Do ponto de vista físico, ele melhora o empacotamento das partículas e funciona como sítio de nucleação para os produtos formados. Do ponto de vista químico, o carbonato de cálcio pode sofrer dissolução parcial em meio alcalino, liberando íons Ca^{2+} que interagem com sílica e alumina, favorecendo a formação de géis híbridos, como N-(C)-A-S-H, contribuindo para o refinamento da microestrutura e para o aumento da resistência mecânica (Ren et al., 2024).

Além disso, a presença do calcário altera o balanço reativo do sistema. Enquanto no sistema binário todos os precursores consomem simultaneamente o ativador alcalino, no sistema ternário apenas cerca de 67% da matriz corresponde a fases altamente reativas. Isso aumenta a quantidade efetiva de ativador disponível para essas fases, intensificando a dissolução dos precursores e acelerando a polimerização.

Entretanto, o comportamento do traço L20-AEC mostrou uma limitação importante. Apesar da maior resistência inicial, a resistência final de 52,5 MPa foi inferior à obtida na formulação L18.75-AEC, que atingiu 56,0 MPa. Diferentemente do sistema binário, a aplicação de 20% de ativador em uma matriz com menor quantidade de fases reativas gerou um excesso de alcalinidade. Essa condição favorece uma formação muito rápida dos produtos de reação, criando camadas mais densas ao redor das partículas e dificultando a continuidade das reações, o que reduz o ganho de resistência em idades mais avançadas (Provis; Van Deventer, 2014). Dessa forma, o traço L18.75-AEC apresentou o melhor equilíbrio entre disponibilidade de ativador e desenvolvimento da resistência para o sistema ternário estudado.

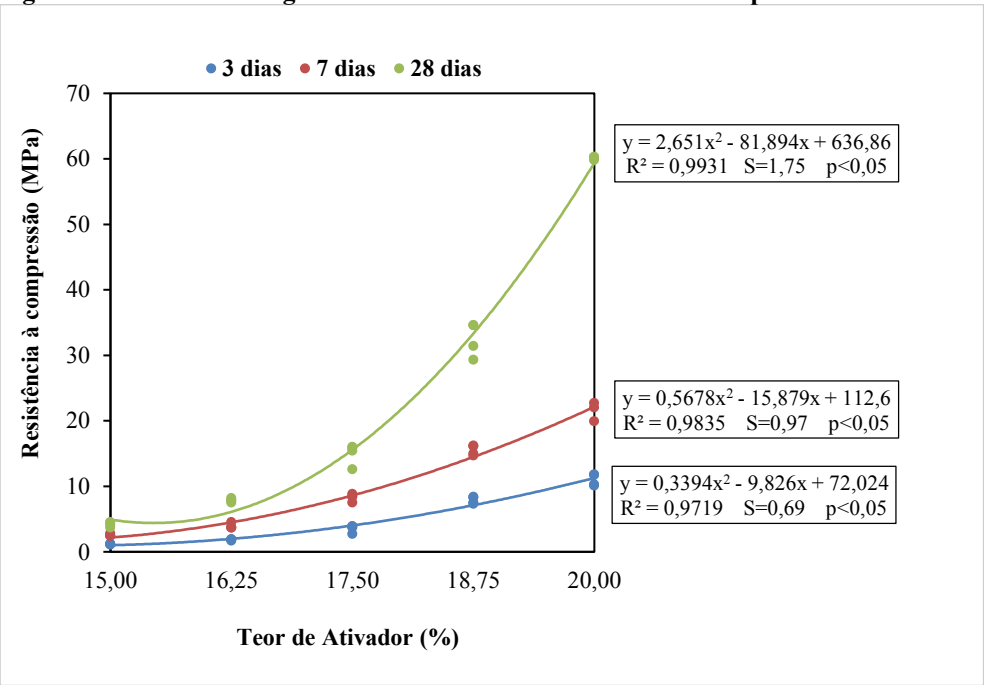
Os resultados do ensaio de *mini-slump* corroboram o índice de consistência, uma vez que a presença da argila calcinada reduziu a fluidez das misturas devido à elevada demanda de água de suas partículas, enquanto a incorporação de calcário favoreceu o escoamento do sistema. Além disso, em ambos os ensaios, o aumento do teor de ativador promoveu redução da tensão limite de escoamento das formulações.

Segundo os critérios da norma ASTM C1948-24 (ASTM, 2024), a mistura REF atendeu plenamente aos requisitos, sendo classificada como cimento do tipo AACM-RTC, destinado à cura em temperatura ambiente. A REF também se enquadrou na categoria de Alta Resistência Inicial (HE – *High Early-Strength*), por superar os valores mínimos de 12,0 MPa em 1 dia e 24,0 MPa aos 3 dias. Em contrapartida, as formulações contendo argila calcinada não atenderam aos critérios normativos, uma vez que nenhuma alcançou a resistência mínima obrigatória de 13,0 MPa aos 3 dias. Apesar disso, as misturas otimizadas L18.75 e L20 da série AE e L17.5, L18.75 e L20 da série AEC atenderam com folga aos requisitos estruturais de longo prazo, que correspondem a 20,0 MPa aos 7 dias e 28,0 MPa aos 28 dias. Já os sistemas com menores dosagens de ativador, L15 e L16.25 em ambas as séries, não atingiram os limites estabelecidos pela norma em nenhuma das idades avaliadas.

Cabe ressaltar que os parâmetros de aceitação da ASTM C1948-24 exigem o rompimento conforme o método ASTM C1928/C1928M (ASTM, 2023), que utiliza corpos de prova cúbicos e argamassas com maior teor de cimento. A literatura aponta que amostras cúbicas possuem resistência quase 15% superior à de cilindros equivalentes devido à diferença na relação de aspecto e ao confinamento de tensões (Bezerra et al., 2016). Dessa forma, essa comparação está sendo realizada de forma conservadora, demonstrando excelente desempenho mecânico dos sistemas AE-L20 e AE-L18,75.

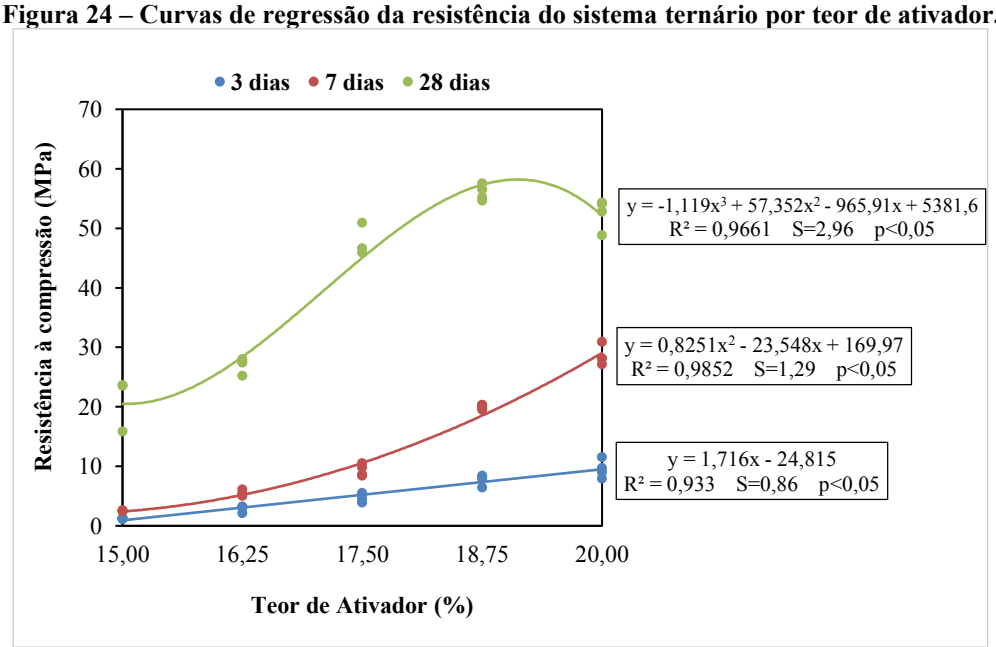
Os modelos de regressão com relação ao aumento da resistência mecânica em função da variação do teor de ativador estão apresentados abaixo nas Figura 23 e 24, referentes, respectivamente, às misturas binárias e ternárias.

Figura 23 – Curvas de regressão da resistência do sistema binário por teor de ativador.



Fonte: Próprio autor, 2026.

Figura 24 – Curvas de regressão da resistência do sistema ternário por teor de ativador.



Fonte: Próprio autor, 2026.

A avaliação estatística demonstrou bom grau de ajuste para os modelos matemáticos gerados. A análise de variância confirmou a significância estatística do teor de ativador alcalino ($p < 0,05$) sobre a resistência à compressão em todas as idades analisadas. De modo geral, os modelos apresentaram elevados coeficientes de determinação e baixos erros padrão da regressão (S), indicando boa capacidade de representação dos dados experimentais. Entretanto, para o sistema ternário aos 28 dias, o ajuste cúbico deve ser interpretado com cautela, uma vez que foi obtido a partir das médias experimentais de apenas cinco níveis de teor de ativador alcalino. Nessas condições, embora o modelo apresente bom ajuste aos dados experimentais, sua capacidade preditiva, especialmente para extrapolações ou estimativas fora da faixa investigada, pode ser limitada.

Na mistura binária, a evolução da resistência mecânica foi descrita por modelos quadráticos com comportamento crescente aos 3, 7 e 28 dias. Já a mistura ternária apresentou comportamento distinto devido à incorporação de calcário, com evolução linear aos 3 dias, quadrática aos 7 dias e ajuste cúbico aos 28 dias. De acordo com esse modelo, observou-se uma tendência de aproximação a um limite de saturação alcalina dentro da faixa de teores de ativador investigada.

Com base no modelo preditivo ajustado, estimou-se um teor ótimo de ativador alcalino de 19,12%, correspondente a uma resistência máxima estimada de $58,26 \pm 2,96$ MPa.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar como o teor de ativador alcalino afeta as propriedades dos sistemas cimentícios álcali-ativados compostos por escória de alto-forno, argila calcinada e calcário. A substituição parcial da escória por argila calcinada reduz a trabalhabilidade e aumenta a tensão limite de escoamento das misturas binárias, devido à elevada área superficial e à morfologia lamelar desse material.

No entanto, a adição de calcário ao sistema ternário ajuda a mitigar esse efeito, atuando como fíler e disponibilizando água livre para lubrificação do sistema, o que melhora a fluidez. Do ponto de vista termoquímico, a calorimetria mostrou que a argila calcinada altera a cinética de reação, suprimindo o segundo pico de hidratação típico da escória e estabelecendo um regime controlado por difusão, enquanto o calcário reduz o fluxo de calor máximo devido ao efeito de diluição.

A avaliação estatística mostrou que o teor de ativador alcalino exerce efeito significativo na resistência à compressão, permitindo a construção de modelos de regressão. Nos sistemas binários, a resistência aumenta continuamente, sem saturação na faixa investigada, atingindo 60,1 MPa aos 28 dias. Já no sistema ternário, a presença do calcário otimiza o desenvolvimento mecânico em dosagens intermediárias, mas o modelo estatístico indica um limite de saturação química.

Desse modo, determinou-se que o teor ótimo de ativação é de 19,12%, correspondente a uma resistência máxima teórica de 58,26 ± 2,96 MPa. Esse resultado indica que teores de ativador superiores ao valor ótimo podem comprometer o desempenho mecânico do sistema, possivelmente em decorrência do excesso de alcalinidade. Embora as formulações contendo argila calcinada apresentem desenvolvimento mais lento da resistência nas primeiras idades em comparação ao sistema de referência, elas alcançam elevado desempenho mecânico em idades mais avançadas.

Em suma, os resultados obtidos evidenciam que os sistemas álcali-ativados contendo escória de alto-forno, argila calcinada e calcário representam uma alternativa promissora aos ligantes convencionais à base de cimento Portland, reforçando seu potencial para o desenvolvimento de ligantes cimentícios de baixo carbono e para a redução das emissões de CO_2 associadas à construção civil.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para o aprofundamento desta linha de pesquisa, recomenda-se investigar o uso de aditivos químicos, como superplastificantes e aceleradores de pega, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade e favorecer o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades dos sistemas contendo argila calcinada. Também são sugeridos estudos envolvendo diferentes teores de substituição e proporções entre os precursores, buscando reduzir o consumo de escória sem comprometer a trabalhabilidade e o desempenho mecânico inicial.

Adicionalmente, recomenda-se avaliar o comportamento desses ligantes em matrizes de concreto, contemplando propriedades mecânicas e aspectos relacionados à durabilidade frente à ação de agentes agressivos. Estudos microestruturais complementares também são necessários para identificar as fases formadas e compreender os mecanismos responsáveis pelo desempenho observado. O desenvolvimento dessas investigações poderá ampliar o conhecimento sobre os sistemas estudados e fornecer subsídios para sua futura aplicação em maior escala.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-6**: cimento Portland: análise química - parte 6: determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12154**: determinação da densidade por deslocamento volumétrico: densidade-esqueleto por picnometria a gás. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASTM. **ASTM C618-17a**: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

ASTM. **ASTM C1928/C1928M-23**: standard test method for compressive strength of alkali activated cementitious material mortars (using 50 mm [2 in.] cube specimens). West Conshohocken: ASTM International, 2023.

ASTM. **ASTM C1948/C1948M-24**: standard specification for alkali-activated cementitious materials. West Conshohocken: ASTM International, 2024.

BAKHAREV, T. Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 658–670, 2005.

BERNAL, S. A. *et al*. Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 46–54, 2011.

BEZERRA, U. T.; ALVES, S. M. S.; BARBOSA, N. P.; TORRES, S. M. Hourglass-shaped specimen: compressive strength of concrete and mortar (numerical and experimental analyses). **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 4, p. 510–524, 2016.

CHEN, J.; PLANK, J. Alkali-activated calcined clay blended cement: effect of NaOH activator on performance of HPEG PCEs and on early strength. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 183, p. 107626, 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Indústria brasileira de cimento**: base para a construção do desenvolvimento. Brasília: CNI, 2012. Disponível em: http://www.cni.org.br. Acesso em: 22 jan. 2026.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, [s. l.], v. 37, p. 1633–1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 1994. Disponível em: http://www.geopolymer.org. Acesso em: 22 jan. 2026.

DÖRR, G. *et al*. *Mini-slump*: traditional test application to evaluate workability in a fresh state of metacaulin-based geopolymers. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DO CIMENTO, 2., 2020, Santa Maria. **Anais [...]**. Santa Maria: [s. n.], 2020.

DUXSON, P. *et al*. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

FARIA OLIVEIRA, T. *et al*. **Otimização de sulfatos em cimentos com substituição parcial de argilas calcinadas e areias de mineração**. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2025.

FAROOQ, F. *et al*. Geopolymer concrete as sustainable material: a state of the art review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 306, p. 124762, 2021.

FOŘT, J. *et al*. Review on the sustainable development of alkali-activated materials using waste-derived activators: mechanical and environmental perspectives. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 117, p. 114857, 2026.

GAO, Y. *et al*. Research progress on the preparation and performance of recycled mortars using solid waste-based cementitious materials. **Coatings**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 1483, 2025.

GARCÍA-LODEIRO, I. *et al*. FTIR study of the sol-gel synthesis of cementitious gels: C-S-H and N-A-S-H. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 63–72, 2008.

GLUKHOVSKY, V. D. **Gruntosilikaty (Soil Silicates)**. Kiev: [s. n.], 1959.

GOMES, S. D. C. *et al*. Shrinkage and carbonation of alkali-activated calcined clay-ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 194, p. 107985, 2025.

HASSAN, S. *et al*. Compressive strength of clay-based geopolymers: a concise review of the influencing factors and underlying mechanisms. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 453, p. 139064, 2025.

JAMES, P. F. *et al*. Crystallisation of silicate and phosphate glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Sheffield, 1997.

JINGLIANG, D. *et al*. Development of sustainable alkali activated red mud composite cement: mechanical properties, hydration mechanisms, and environmental benefits. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 499, p. 138356, 2025.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 95–102, 1980.
KÜHL, H. **Slag cement and process of making the same**. Estados Unidos (USA), 1908.

LI, C. *et al*. C-A-S-H gel and pore structure characteristics of alkali-activated red mud–iron tailings cementitious mortar. **Materials**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2022.

LONG, W. J. *et al*. Design, dynamic performance and ecological efficiency of fiber-reinforced mortars with different binder systems: ordinary Portland cement, limestone calcined clay cement and alkali-activated slag. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 337, 2022.

MAIER, M. *et al*. Potential of calcined recycling kaolin from silica sand processing as supplementary cementitious material. In: BISHNOI, S. (org.). **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. Singapore: Springer Singapore, 2020. v. 25, p. 75–83.
MYERS, R. J. *et al*. Generalized structural description of calcium-sodium aluminosilicate hydrate gels: the cross-linked substituted tobermorite model. **Langmuir**, [s. l.], v. 29, n. 17, p. 5294–5306, 2013.

POL SEGURA, I. *et al*. A review: alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. e15718, 2023.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Alkali Activated Materials**. London: Springer, 2014. Disponível em: http://www.springer.com/series/8780. Acesso em: 22 jan. 2026.

PURDON, A. O. The action of alkalis on blast-furnace slag. **Journal of the Society of Chemical Industry**, [s. l.], v. 59, p. 191–202, 1940.

REN, J. *et al*. The effects of calcium carbonate on sodium metasilicate-activated metakaolin-based geopolymer pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 448, p. 138218, 2024.

ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: from slump to spreading flow. **Journal of Rheology**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 705–718, 2005.

ROUSSEL, N.; STEFANI, C.; LEROY, R. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 817–822, 2005.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 114, p. 2–26, 2018.

SHARMA, M. *et al*. Limestone calcined clay cement and concrete: a state-of-the-art review. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 149, p. 106564, 2021.
SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. M. **Alkali-Activated Cements and Concretes**. Abingdon: Taylor & Francis, 2006.

SIYAL, A. A. *et al*. A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers. **RSC Advances**, [s. l.], v. 14, p. 2530, 2024.

SNELLINGS, R. Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials. **RILEM Technical Letters**, [s. l.], v. 1, p. 50–55, 2016.

SONG, B. *et al*. Study on high supplementary cementitious materials content cement: design and analysis based on response surface method. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 467, p. 140412, 2025.

TAN, Z.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. Reproducible *mini-slump* test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 50, p. 235, 2017.

TOME, S. *et al*. Mineralogical evolution of raw materials transformed to geopolymer materials: a review. **Ceramics International**, [s. l.], v. 50, p. 11145, 2024.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. Santiago: [s. n.], 2017. Disponível em: http://www.ricuc.cl. Acesso em: 22 jan. 2026.

USHEROV-MARSHAK, A. *et al*. Calorimetric studies of alkali-activated blast-furnace slag cements at early hydration processes in the temperature range of 20–80 °C. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 19, 2021.

VAN DEVENTER, J. S. J. *et al*. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 145–155, 2010.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 29, p. 89–104, 2012.

YIP, C. K.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 9, p. 1688–1697, 2005.

YU, X. *et al*. Review of the materials composition and performance evolution of green alkali-activated cementitious materials. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [s. l.], v. 25, p. 1541–1563, 2023.

ZAFARANA, S. E.; BARONE, G.; MAZZOLENI, P. Preliminary evaluation of Design of Experiments (DoE) approach for the performance prediction of basalt sawing sludge-metakaolin-based Alkali Activated Materials (AAMs). **Applied Materials Today**, [s. l.], v. 48, p. 103116, 2026.

ZHANG, W. *et al*. Revolutionizing sustainable transport infrastructure with low-carbon alkali-activated materials: solid waste valorization, diverse applications, and future challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 189, p. 116607, 2026.

ZHAO, G. *et al*. Utilization of high fine-grained shield tunnel spoil in CLSM and effect of foam agent content. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 21, p. e03800, 2024.