



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

IURI VERÍSSIMO MENDONÇA

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA MISTURA BINÁRIA
ÁLCALI-ATIVADA DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E ESCÓRIA
PANELA

FORTALEZA

2026

IURI VERÍSSIMO MENDONÇA

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA MISTURA BINÁRIA
ÁLCALI-ATIVADA DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E ESCÓRIA
PANELA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2026

IURI VERÍSSIMO MENDONÇA

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA MISTURA BINÁRIA ÁLCALI-
ATIVADA DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA E ESCÓRIA PANELA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 19/03/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. PhD. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emilio Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Catedrático João Paulo de Castro Gomes
Universidade da Beira Interior (UBI)

A Deus.

Aos meus pais, Cildo e Luciene.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e meu pai, Cildo e Luciene, por todo o apoio, motivação, amor e nunca ter me deixado faltar nada.

Agradeço ao meu irmão, Ígor, por todos os conselhos e apoio nessa fase da minha vida, e a minha sobrinha Marina, que com sua alegria e pureza ilumina nossos dias.

E a toda a minha família, em nome da minha vó Clemozilda, pelo amor, carinho e pelos momentos de lazer que foram fundamentais nesse período.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa e meu coorientador Prof. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, por me aceitarem como orientando e me guiarem tão bem nessa trajetória.

A minha namorada Ana Luiza e meu amigo Eric Matheus, pela companhia durante essa fase.

Também agradeço aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Estruturas e Construção Civil) por dividirmos as alegrias, tristezas e lutas nessa etapa das nossas vidas.

À Instituição CNPQ, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Professor Catedrático João Castro Gomes, pelas orientações e apoio durante a minha estadia em Portugal, juntamente com a equipe CMADE – Centro de Materiais e Engenharia Civil para a Sustentabilidade, pelo acolhimento.

E por fim, ao professor participante da banca examinadora Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira, pela disponibilidade em fazer parte desse momento.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”
(Madre Teresa de Calcuta).

RESUMO

A produção de cimento Portland é uma das principais fontes de emissões de CO₂ na construção civil, impulsionando a pesquisa por ligantes alternativos mais sustentáveis. Esta pesquisa avaliou a durabilidade de pastas álcali-ativadas produzidas com misturas binárias de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória de forno panela (PAN), ativadas com soluções de NaOH e Na₂SiO₃ em diferentes proporções. Foram desenvolvidas seis formulações variando o teor de precursores (70/30, 50/50 e 30/70% RCV/PAN) e a relação ativadora (60/40 e 40/60% NaOH/Na₂SiO₃). As pastas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido e submetidas a ensaios de durabilidade em ambientes agressivos: solução de H₂SO₄ 5%, MgSO₄ 10%, NaCl 3% e água do mar natural, em ciclos de imersão-secagem. Duas formulações também foram avaliadas após cura por carbonatação acelerada. Os resultados demonstraram que as misturas com maior teor de PAN (70%) e maior proporção de silicato de sódio apresentaram os melhores desempenhos, alcançando resistências à compressão superiores a 40 MPa aos 28 dias e mantendo ou aumentando a resistência mecânica após exposição aos meios agressivos, com perdas de massa geralmente inferiores a 5%. As análises microestruturais (FTIR, TG/DTG e MIP) revelaram a formação de matrizes densas com géis C-A-S-H e N-A-S-H estáveis, redução de porosidade e maior resistência à lixiviação e degradação química, especialmente em ambientes salinos e sulfatados. A carbonatação acelerada mostrou-se benéfica para as misturas ricas em cálcio, melhorando a estabilidade em meio de cloretos. Os achados confirmam o elevado potencial das misturas binárias RCV-PAN como alternativa sustentável ao cimento Portland, com excelente durabilidade em condições agressivas e contribuição para a economia circular por meio da valorização de resíduos industriais locais.

Palavras-chave: pastas álcali-ativadas; resíduo de cerâmica vermelha; escória panela; durabilidade.

ABSTRACT

Portland cement production is one of the main sources of CO₂ emissions in the construction industry, driving research into more sustainable alternative binders. This research evaluated the durability of alkali-activated pastes produced with binary mixtures of red ceramic waste (RCV) and ladle furnace slag (PAN), activated with NaOH and Na₂SiO₃ solutions in different proportions. Six formulations were developed varying the precursor content (70/30, 50/50 and 30/70% RCV/PAN) and the activator ratio (60/40 and 40/60% NaOH/Na₂SiO₃). The pastes were characterized in the fresh and hardened state and subjected to durability tests in aggressive environments: 5% H₂SO₄ solution, 10% MgSO₄, 3% NaCl and natural seawater, in immersion-drying cycles. Two formulations were also evaluated after accelerated carbonation curing. The results demonstrated that the mixtures with higher PAN content (70%) and a higher proportion of sodium silicate showed the best performance, achieving compressive strengths greater than 40 MPa at 28 days and maintaining or increasing mechanical strength after exposure to aggressive environments, with mass losses generally less than 5%. Microstructural analyses (FTIR, TG/DTG, and MIP) revealed the formation of dense matrices with stable C-A-S-H and N-A-S-H gels, reduced porosity, and greater resistance to leaching and chemical degradation, especially in saline and sulfate environments. Accelerated carbonation proved beneficial for calcium-rich mixtures, improving stability in chloride media. The findings confirm the high potential of RCV-PAN binary mixtures as a sustainable alternative to Portland cement, with excellent durability in aggressive conditions and a contribution to the circular economy through the valorization of local industrial waste.

Keywords: alkali-activated pastes; red ceramic residue; ladle slag; durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Processo de produção das escórias	24
Figura 2	- Processo de fabricação das peças cerâmicas	26
Figura 3	- Fluxograma da revisão da literatura	29
Figura 4	- Amostragem de artigos por base de dados	31
Figura 5	- Tendências anuais de publicação	31
Figura 6	- Produções por países	33
Figura 7	- Ensaio de durabilidade em compósitos álcali-ativados	35
Figura 8	- Fluxograma das etapas da pesquisa	42
Figura 9	- Processamento dos precursores	42
Figura 10	- Curva cumulativa granulométrica dos precursores	43
Figura 11	- Corpo de Prova envolvido com papel filme após desforma	45
Figura 12	- Câmara de carbonatação	47
Figura 13	- Ensaio no estado fresco	49
Figura 14	- Ciclo de exposição nas soluções agressivas	53
Figura 15	- Tempo de pega	57
Figura 16	- Resistência à compressão das misturas de referência	58
Figura 17	- Resistência à compressão das misturas imersas em H_2SO_4	59
Figura 18	- Resistência à compressão das misturas imersas em $MgSO_4$	60
Figura 19	- Resistência à compressão das misturas imersas em NaCl	61
Figura 20	- Resistência à compressão das misturas imersas em água do mar	62
Figura 21	- Resistência à compressão das misturas após carbonatação acelerada	64
Figura 22	- Perda de massa percentual após imersão em H_2SO_4	66
Figura 23	- Perda de massa percentual após imersão em NaCl	66
Figura 24	- Perda de massa percentual após imersão em $MgSO_4$	67
Figura 25	- Perda de massa percentual após imersão em água do mar	68
Figura 26	- Misturas após 4 ciclos de imersão em H_2SO_4	69
Figura 27	- Misturas após 4 ciclos de imersão em $MgSO_4$	70
Figura 28	- Misturas após 4 ciclos de imersão em NaCl	70
Figura 29	- Misturas após 4 ciclos de imersão em água do mar	71
Figura 30	- Misturas carbonatadas após 3 ciclos de imersão	72
Figura 31	- FTIR: Misturas de referência (sem imersão)	73

Figura 32	- FTIR. a) H_2SO_4 ; b) NaCl	74
Figura 33	- FTIR. a) MgSO_4 ; b) H_2O	74
Figura 34	- DTG: Perda de massa derivada das misturas de referência	77
Figura 35	- TG: Perda de massa derivada das misturas de referência	78
Figura 36	- DTG: Misturas após imersão em H_2SO_4	79
Figura 37	- DTG: Misturas após imersão em MgSO_4	80
Figura 38	- DTG: Misturas após imersão em NaCl	81
Figura 39	- DTG: Misturas após imersão em água do mar	81
Figura 40	- DTG: Misturas após carbonatação acelerada	82
Figura 41	- MIP: Intrusão cumulativa. a) REF; b) H_2SO_4	85
Figura 42	- MIP: Logaritmo da intrusão diferencial. a) REF; b) H_2SO_4	85
Figura 43	- MIP: Intrusão cumulativa. a) MgSO_4 ; b) NaCl ; c) H_2O	86
Figura 44	- MIP: Logaritmo da intrusão diferencial. a) MgSO_4 ; b) NaCl ; c) H_2O ..	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Subsetores da indústria cerâmica	26
Tabela 2	- Periódicos mais produtivos e o número de artigos publicados ao longo do tempo	32
Tabela 3	- Autores mais prolíficos em publicações	32
Tabela 4	- Composição química dos precursores na literatura	34
Tabela 5	- Avaliação da durabilidade de compósitos álcali-ativados sob diferentes parâmetros	36
Tabela 6	- Composição química dos precursores utilizados	43
Tabela 7	- Proporções de mistura	44
Tabela 8	- Fluxograma dos regimes adotados na carbonatação acelerada	46
Tabela 9	- Ficha técnica do silicato de sódio alcalino L60	48
Tabela 10	- Análise físico-química da água do mar natural	51
Tabela 11	- Mini-slump Test, viscosidade no funil copo Ford e massa unitária das misturas	56
Tabela 12	- Análise físico-química da água do mar após imersão dos CPs	63
Tabela 13	- Bandas espectrais FTIR das misturas após exposição aos diferentes meios	75
Tabela 14	- Parâmetros de porosimetria por intrusão de mercúrio	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C-A-S-H	Aluminossilicato de cálcio hidratado
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
trad.	Tradutor
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha
PAN	Escória Panela
KR	Escória de dessulfuração
BOF	Escória de forno de oxigênio básico
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
MAA	Material álcali-ativado
RCD	Resíduos de construção e demolição
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sódio
GGBFS	Escória granulada de alto-forno moída
EAFS	Escória de forno de arco elétrico
N-A-S-H	Aluminossilicato de sódio hidratado
FRX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
MIP	Porosimetria por intrusão de mercúrio
TGA	Análise Termogravimétrica
pH	Potencial hidrogeniônico
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
DRX	Difração de raios X
FS	Fayalita

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
£	Libra
¥	Iene
€	Euro
§	Seção
©	Copyright
®	Marca Registrada
MPa	Megapascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contexto e justificativa	17
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
1.3	Estrutura da dissertação	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: MATERIAS ÁLCALI-ATIVADOS	22
2.1	Processo de ativação alcalina	22
2.2	Fonte de aluminossilicatos (precursores)	23
2.2.1	<i>Escória panela</i>	23
2.2.2	<i>Resíduo de cerâmica vermelha</i>	25
2.3	Ativadores e parâmetros alcalinos	27
2.4	Durabilidade de compósitos álcali-ativados produzidos com resíduo de cerâmica vermelha e escória panela: uma revisão sistemática da literatura	29
2.4.1	<i>Bibliometria</i>	30
2.4.2	<i>Análise dos artigos sobre o tema</i>	33
2.4.2.1	<i>Composição química dos precursores</i>	33
2.4.2.2	<i>Ensaio de durabilidade identificados nos estudos</i>	34
2.4.2.3	<i>Influência das variáveis experimentais no desempenho em durabilidade</i>	36
2.4.2.4	<i>Desempenho mecânico frente a ambientes agressivos</i>	38
2.4.2.5	<i>Propriedades relacionadas à durabilidade</i>	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Ligantes	42
3.2	Métodos	44
3.2.1	<i>Carbonatação acelerada</i>	46
3.3	Ensaio no estado fresco	48
3.4	Soluções de ataque químico	50
3.4.1	<i>Ataque ácido (H₂SO₄)</i>	50
3.4.2	<i>Ataque de sulfato (MgSO₄)</i>	50

3.4.3	<i>Ataque de cloreto (NaCl)</i>	51
3.4.4	<i>Ataque por água do mar natural (H₂OM)</i>	51
3.5	Testes no estado endurecido	52
3.5.1	<i>Resistência à compressão</i>	52
3.5.2	<i>Perda de massa</i>	52
3.5.3	<i>Análise visual</i>	53
3.6	Microestrutura	53
3.6.1	<i>Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i>	53
3.6.2	<i>Análise Termogravimétrica (TG)</i>	54
3.6.3	<i>Porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP)</i>	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Ensaio no estado fresco	56
4.2	Ensaio no estado endurecido	57
4.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	57
4.2.2	<i>Perda de massa</i>	65
4.2.3	<i>Análise visual</i>	68
4.3	Microestrutura	72
4.3.1	<i>Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i>	72
4.3.2	<i>Análise Termogravimétrica (TG)</i>	77
4.3.3	<i>Porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP)</i>	84
5	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS	93
ANEXO A - RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DAS MISTURAS AO LONGO DOS CICLOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÕES SIMULANDO AMBIENTES AGRESSIVOS.....		106

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e justificativa

A indústria da construção civil enfrenta desafios crescentes relacionados ao impacto ambiental dos materiais convencionais, em especial o cimento Portland, cuja produção contribui significativamente para as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). Em 2022, a produção mundial de cimento ultrapassou 4 bilhões de toneladas, representando entre 5% e 8% das emissões globais de CO₂ (Davidovits, 2020; Araos; Aponte; Barra, 2024), reforçando a necessidade de alternativas mais sustentáveis. A capacidade de produção de cimento no estado do Ceará é robusta, impulsionada principalmente pela Votorantim Cimentos e Cimento Apodi, com destaque para o Complexo Industrial do Pecém e Sobral. A capacidade total instalada ultrapassa 2 milhões de toneladas por ano, sendo que a Votorantim, após expansão, atinge cerca de 2,2 milhões de toneladas anuais somando suas unidades (Votorantim Cimentos, 2021; Cimento Apodi, 2021). Além das emissões, o processo consome grandes quantidades de energia e recursos naturais, tornando urgente o desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental (Scrivener *et al.*, 2018).

Nesse contexto, os materiais álcali-ativados (MAA), também conhecidos como geopolímeros, têm se destacado como soluções promissoras. Obtidos pela reação de precursores ricos em sílica e alumina com soluções alcalinas, esses ligantes apresentam propriedades mecânicas e de durabilidade competitivas, além de reduzirem significativamente as emissões de carbono em comparação ao cimento Portland (Davidovits, 2015; Turner; Collins, 2013; McLellan *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2021). O uso de resíduos industriais, como o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escórias siderúrgicas, alinha-se aos princípios da economia circular e contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), promovendo a valorização de subprodutos e a redução do descarte em aterros (Azevedo *et al.*, 2020). O RCV, abundante na indústria cerâmica brasileira, é rico em sílica e alumina, enquanto escórias como a escória panela (PAN) contêm óxidos de cálcio, silício e alumínio, favorecendo a formação de géis cimentantes como C-A-S-H e N-A-S-H (Lemougna *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022).

A durabilidade é um fator determinante para a vida útil de estruturas cimentícias. Estudos recentes indicam que os MAA apresentam maior resistência a agentes agressivos, como

sulfatos, cloretos e carbonatação, em comparação ao cimento Portland, devido à microestrutura densa e à estabilidade química dos produtos de reação (Nedunuri; Muhammad, 2023). No entanto, a variabilidade na composição dos resíduos e as condições de cura podem influenciar o desempenho a longo prazo, exigindo investigações específicas para cada combinação de precursores e ativadores (Lemougna *et al.*, 2020).

No estado do Ceará, pesquisas recentes reforçam o potencial dos ligantes álcali-ativados utilizando resíduos locais. Costa *et al.* (2021) e Costa (2022), exploraram o uso da escória de dessulfuração (KR), escória de forno de oxigênio básico (BOF), cinza volante e cinza pesada como precursores na fabricação de cimentos álcali-ativados, demonstrando potencial de álcali-ativação. Araújo (2023), Vanutti *et al.* (2023) e Tavares *et al.* (2024) conduziram pesquisas que utilizavam os cimentos à base de cinza volante e escória BOF para aplicações em argamassas, concretos e artefatos, como blocos vazados (cobogó). Carvalho *et al.* (2024) investigaram ligantes álcali-ativados produzidos com escória de alto-forno e resíduos de cerâmica vermelha gerados na região. O estudo avaliou propriedades no estado fresco e endurecido, mostrando que o uso desses resíduos locais resulta em alto desempenho mecânico e menor impacto ambiental. Araújo *et al.* (2025) ampliaram essa abordagem ao desenvolver concretos autoadensáveis de alta resistência ativados alcalinamente, utilizando cinza volante e escória de aciaria como precursores locais.

No estado do Ceará, o aproveitamento de resíduos industriais em MAA é particularmente relevante. O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), com a ArcelorMittal, gera grandes quantidades de escórias de aciaria, incluindo a escória panela, com produção anual estimada em 24.000 mil toneladas (Leão, 2025). Segundo Piatak, Parsons e Seal (2015), a produção de uma tonelada de aço gera, em média, entre 150 e 200 kg de escória como subproduto dos processos metalúrgicos. Paralelamente, o Arranjo Produtivo Local de cerâmica vermelha do Baixo Jaguaribe/CE destaca-se pela intensa produção de tijolos e telhas, gerando resíduos com potencial para reaproveitamento. O Brasil possui mais de 6.900 unidades industriais dedicadas à cerâmica vermelha (Rodrigues *et al.*, 2021). Os resíduos cerâmicos representam entre 45% e 55% dos resíduos de construção e demolição (RCD), com cerca de 16 milhões de toneladas descartadas de forma irregular em áreas como encostas, margens de rodovias e terrenos não preparados, contribuindo para impactos ambientais (Azevedo *et al.*, 2020; Gaibor *et al.*, 2020). A produção de tijolos, em escala global, é responsável por gerar anualmente cerca de 40 milhões de toneladas de resíduos de cerâmica vermelha (Carvalho *et al.*, 2020). Esses números evidenciam a relevância da pesquisa para a valorização de resíduos locais e para a sustentabilidade da construção civil.

Na literatura, apenas três artigos publicados por Gaibor e colaboradores (2021; 2023; 2025) abordam o uso de matrizes formadas por resíduos de cerâmica vermelha e escória de panela. Entretanto, nenhum desses estudos teve como objetivo principal a avaliação da durabilidade. A investigação sobre misturas binárias desses materiais permanece bastante restrita, sobretudo no que diz respeito ao desempenho em ambientes agressivos (Azevedo *et al.*, 2020). Assim, esta dissertação tem como objetivo avaliar a durabilidade de pastas produzidas com mistura binária de resíduo de cerâmica vermelha e escória panela álcali-ativada, sob condições de exposição a ambientes quimicamente agressivos em cura ambiente e em cura por carbonatação. A pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, capazes de atender às demandas da construção civil com menor impacto ambiental.

A relevância deste estudo está na possibilidade de oferecer uma alternativa viável ao cimento Portland, promovendo a sustentabilidade e o reaproveitamento de resíduos locais. A avaliação da durabilidade dessas composições é importante para aplicações em ambientes agressivos, como na cidade de Fortaleza, cuja posição geográfica, influenciada por correntes oceânicas e alta salinidade do oceano, torna o ambiente atmosférico um dos mais agressivos do mundo (Campos, 2016). Com isso, essa dissertação pretende preencher lacunas no conhecimento sobre MAA à base de resíduos cearenses, apoiando sua adoção em larga escala e contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a degradação físico-química de pastas álcali-ativadas produzidas a partir de misturas binárias de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória panela (PAN), sob ciclos de secagem e molhagem em ambientes quimicamente agressivos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) Desenvolver formulações de pastas álcali-ativadas com teores variados de resíduo de cerâmica vermelha e escória de panela, utilizando diferentes combinações de ativadores (hidróxido de sódio e silicato de sódio);
- b) Caracterizar suas propriedades no estado fresco e avaliar a resistência mecânica à compressão;
- c) Avaliar a degradação das pastas frente a ambientes agressivos, incluindo exposição a soluções de H_2SO_4 (ácido sulfúrico), $MgSO_4$ (sulfato de magnésio), $NaCl$ (cloreto de sódio) e água do mar natural (ambiente salino multifásico);
- d) Compreender os mecanismos de degradação ocasionados nas pastas submetidas aos ciclos de degradação por meio de análises microestruturais;
- e) Avaliar os efeitos da carbonatação como condição inicial de cura das pastas álcali-ativadas e, posteriormente, investigar o impacto da imersão em soluções agressivas (cloreto e ácido), analisando de forma integrada os mecanismos de degradação e suas implicações microestruturais.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco seções, organizados de forma a apresentar, desenvolver e consolidar os objetivos da pesquisa. Este tópico (Introdução) introduz o tema, oferecendo uma justificativa detalhada sobre a relevância do estudo, além de apresentar informações iniciais sobre os materiais utilizados, resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escórias panela (PAN), destacando seu potencial como precursores em pastas álcali-ativadas. Esta seção também contempla os objetivos da pesquisa e descreve a organização geral do trabalho.

A seção 2 é dedicada ao referencial teórico, abordando os fundamentos dos materiais álcali-ativados, o processo de ativação alcalina, suas aplicações e outras informações relevantes que contribuem para a contextualização teórica do estudo, além de apresentar uma atualização do estado da arte sobre a durabilidade de compósitos álcali-ativados produzidos com resíduo cerâmico e/ou escória panela. Este tópico tem como propósito identificar lacunas de conhecimento e fornecer subsídios técnicos para o contribuir com a seções experimentais subsequentes.

A seção 3 apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento das pastas álcali-ativadas utilizando resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória panela como precursores. Nela são descritas as etapas de processamento dos materiais, o processo de

produção das pastas, os ensaios realizados nos estados fresco e endurecido, as soluções químicas empregadas como agentes agressivos e os procedimentos de análise microestrutural conduzidos para avaliar os mecanismos de degradação. A seção apresenta os principais achados da pesquisa, incluindo o desempenho mecânico das pastas, a resistência frente a diferentes ambientes agressivos e as análises microestruturais que evidenciam os mecanismos de durabilidade.

Por fim, a seção 5 reúne as considerações finais da pesquisa, destacando os principais resultados obtidos, as limitações do estudo e as perspectivas para futuras investigações no campo dos materiais cimentícios alternativos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS

2.1 Processo de ativação alcalina

A ativação alcalina é um campo de pesquisa que ressurgiu como uma opção viável para a obtenção de materiais cimentícios capazes de substituir o cimento Portland, sendo um processo de repolimerização química no qual um material fino à base de aluminossilicato (precursor) é misturado a um agente alcalino (ativador) para formar uma pasta com capacidade de endurecimento em tempo controlável (Pacheco-Torgal *et al.*, 2014).

Durante o processo de geopolimerização ocorre a dissolução do precursor de aluminossilicato como as escórias, promovendo a liberação de espécies reativas que interagem quimicamente para formar oligômeros inorgânicos complexos compostos por múltiplos íons de silício tetravalente (Si^{4+}) e alumínio trivalente (Al^{3+}), os quais se conectam por meio de pontes de átomos de oxigênio derivados de grupos hidroxila terminais presentes na estrutura inicial (Catauro *et al.*, 2025). Essas reações são seguidas por etapas de policondensação e reorganização estrutural que resultam na formação de uma matriz predominantemente amorfa ou semicristalina, com elevada resistência mecânica e propriedades aprimoradas para aplicações estruturais (Albidah *et al.*, 2021).

Segundo Retamal-Rojas *et al.* (2025), a ativação alcalina de matrizes ricas em sílica e alumina ocorre por meio de uma sequência de reações de dissolução impulsionadas pelo transporte de íons alcalinos em um meio poroso reativo onde o aumento do pH causado pelo ativador, como hidróxido de sódio (NaOH) ou silicato de sódio (Na_2SiO_3) favorece a solubilização de fases amorfas ou pouco cristalinas contendo silício e alumínio.

Para Lei *et al.* (2025), o processo de ativação alcalina de materiais ricos em aluminossilicatos geralmente se desenvolve em quatro etapas contínuas: [1] a dissolução das fases reativas; [2] a quebra das estruturas existentes (despolimerização); [3] a formação de novas cadeias (polimerização); e [4] a consolidação final da matriz sólida por meio da condensação.

Estudos recentes têm aprofundado a compreensão do processo de ativação alcalina, revelando que sua eficiência depende não apenas das reações químicas envolvidas, mas também das condições de processamento e das características dos precursores utilizados. Nanthini *et al.*, (2024) destacam que parâmetros como o tipo de ativador, a temperatura e o tempo de cura influenciam diretamente a formação da estrutura geopolimérica, refletindo em propriedades como resistência mecânica e durabilidade.

Assim, o processo de ativação alcalina se consolida como uma alternativa eficiente e sustentável ao cimento Portland, envolvendo reações químicas complexas que dependem da composição do precursor e das condições de processamento, sendo essencial para a formação de geopolímeros com alto desempenho.

2.2 Fonte de aluminossilicatos (precursores)

2.2.1 Escória panela (PAN)

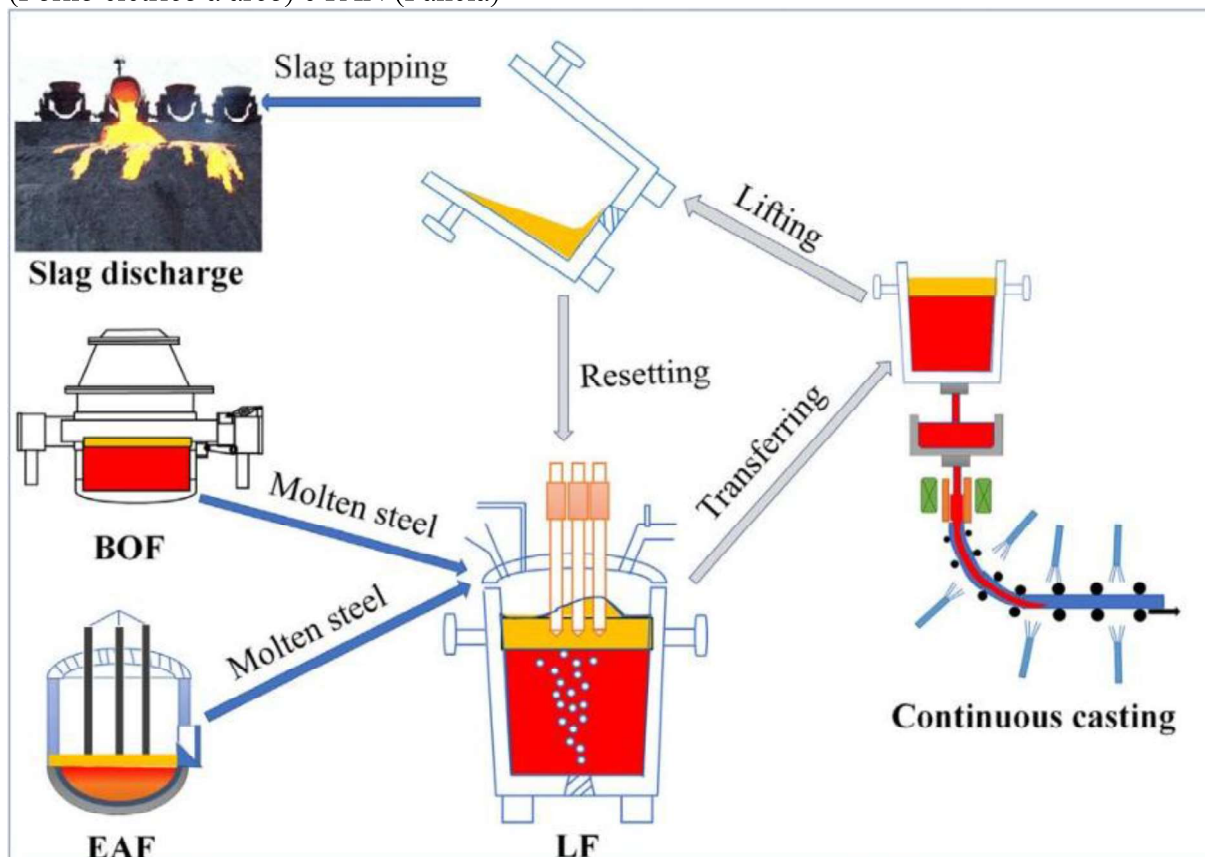
A escória siderúrgica é um subproduto gerado durante o processo de fabricação do aço, formado pela reação entre os componentes fundentes e as impurezas presentes no minério de ferro e nos aditivos utilizados. Sua composição e características variam conforme a etapa em que é produzida. Na fase de fusão, forma-se a escória de aciaria, rica em óxidos metálicos e silicatados, enquanto na etapa de refino é gerada a escória de panela (PAN), composta por óxidos de cálcio e magnésio utilizados para ajustar a composição do aço e remover impurezas como enxofre e fósforo. Ambas são passíveis de reaproveitamento em aplicações industriais e na construção civil, desde que devidamente tratadas e caracterizadas (Aponte *et al.*, 2020).

A escória siderúrgica pode ser classificada em escória de alto-forno, como a escória granulada de alto-forno moída (GGBFS), gerada na produção de ferro-gusa, e escórias de aciaria, como a escória de forno de oxigênio básico (BOF), a escória de forno a arco elétrico (EAFS) e a escória de forno panela (PAN). EAFS são produzidas durante a fusão de sucata metálica, enquanto a PAN é gerada na etapa final do refino do aço, sendo utilizada para ajuste da composição química (Ng *et al.*, 2021).

Atualmente, a escória de forno panela (PAN) tem sido estudada em diversas aplicações industriais e ambientais, incluindo obras de engenharia civil, estabilização e melhoria de solos, tratamento de águas residuais, processos de metalurgia secundária, construção de pavimentos, formulação de misturas asfálticas e produção de fertilizantes (Jiang *et al.*, 2018). Devido às suas propriedades cimentícias, a escória de forno panela (PAN) apresenta grande potencial para aplicação na síntese de geopolímeros, contribuindo para o desenvolvimento de materiais alternativos e sustentáveis na construção civil (Ng *et al.*, 2021).

A Figura 1 contém, de forma esquemática, as etapas envolvidas na geração da escória de forno panela.

Figura 1 – Processo de produção das escórias BOF (Conversor básico de oxigênio), EAF (Forno elétrico a arco) e PAN (Panela)



Fonte: Wu *et al.*, 2023

A escória panela (PAN) é um subproduto gerado durante o refino secundário do aço, etapa que sucede a fusão inicial realizada em fornos como o forno a arco elétrico (EAF) ou a escória de forno de oxigênio básico (BOF). Nessa fase, o aço líquido ainda contém impurezas, como enxofre, fósforo e oxigênios dissolvidos, que precisam ser removidas para garantir a qualidade do produto final (Jiang *et al.*, 2018).

Após a fusão, o aço é transferido para o forno panela, onde ocorre o ajuste da composição química, o controle da temperatura e a remoção de impurezas residuais. Para isso, são adicionados fundentes como cal (CaO), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), fonte de MgO e alumina (Al_2O_3), que reagem com os contaminantes presentes no aço líquido. Essas reações formam uma escória que flutua sobre o metal fundido, sendo posteriormente separada por processos como *slag tapping* ou *slag discharge* (Wu *et al.*, 2023).

A escória formada nessa etapa é denominada escória de forno panela (PAN). Sua composição química é predominantemente constituída por óxidos como CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO e FeO , além de traços de metais pesados e compostos sulfurosos. A variação na composição depende dos materiais utilizados no refino e do tipo de aço produzido (Rezende *et*

al., 2018). Por isso, a caracterização físico-química da PAN é essencial para determinar sua viabilidade em aplicações industriais.

Diversos estudos apontam que a PAN pode apresentar comportamento cimentício ou pozolânico quando devidamente processada, por exemplo, por moagem, ativação química ou envelhecimento. Nessas condições, ela se torna um material promissor para uso em argamassas, concretos e geopolímeros, podendo substituir parcialmente ligantes tradicionais e contribuir para a sustentabilidade da construção civil ao reduzir o consumo de recursos naturais e a emissão de CO₂ (Santos, 2019; Jiang *et al.*, 2018). Entretanto, é importante destacar que seu desempenho é variável e que há riscos associados, como a expansão volumétrica devido à presença de CaO e MgO livres e a possibilidade de lixiviação de metais, o que exige tratamentos adequados e avaliação técnica antes de aplicações em larga escala (Wu *et al.*, 2023).

Além de seu potencial técnico, o reaproveitamento da escória de forno panela representa uma estratégia eficaz para a gestão de resíduos sólidos industriais. A correta valorização desse subproduto pode mitigar impactos ambientais associados ao descarte inadequado, como a contaminação por metais pesados e a geração de poeira (Wu *et al.*, 2023).

Azdejkovic *et al.*, (2025) estudaram o uso de materiais álcali-ativados (MAAs), incluindo escória panela (PAN), na reabilitação sísmica e energética de paredes de alvenaria. Os resultados mostraram que o uso de MAA em sistemas de reforço com argamassa têxtil aumentou significativamente a capacidade de carga e a dissipação de energia, evidenciando o potencial da PAN como alternativa sustentável aos ligantes convencionais. Luo *et al.*, (2022) analisaram o impacto da escória panela (PAN) em geopolímeros à base de cinza volante Classe F. O estudo mostrou que a PAN melhora a resistência térmica e mecânica dos materiais, graças à presença de cálcio que favorece reações de formação de fases estáveis.

2.2.2 Resíduo de cerâmica vermelha (RCV)

A indústria cerâmica abrange a fabricação de uma ampla variedade de produtos obtidos a partir de materiais essencialmente inorgânicos e não metálicos. Esses materiais são conformados e adquirem resistência mecânica por meio de transformações químicas que ocorrem durante a etapa de queima em altas temperaturas. Considerando as finalidades e aplicações dos produtos gerados, o setor cerâmico é dividido em cinco subsetores principais, dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Subsetores da indústria cerâmica

Subsetor da Cerâmica	Tipos de Produtos
Estrutural	Telhas, tijolos, abobadilhas, produtos de grés para a construção e pavimentos rústicos
Pavimentos e Revestimentos	Azulejos, ladrilhos, mosaicos, placas cerâmicas
Sanitária	Louça sanitária em porcelana, grés fino: bacias, bidês, lavatórios, tanques, colunas, bases de chuveiro e outros
Utilitária e Decorativa	Louça de cozinha, de mesa e de decoração em porcelana, faiança, grés e terracota
Técnicas e Especiais	Isoladores elétricos, produtos refratários e outros

Fonte: Adaptado de PwC, 2016

O processo de fabricação de produtos cerâmicos estruturais, alvo da pesquisa, inicia-se com a extração das argilas por meio de escavadoras, seguida da preparação da massa, etapa em que a pá carregadora, o doseador e o moinho são utilizados para garantir a homogeneização adequada do material. Em seguida, ocorre a extrusão ou prensagem, realizada com o auxílio de laminadores, feiras e prensas, responsáveis pela conformação das peças. Após essa fase, os produtos passam pela secagem em secadores semi-contínuos, etapa essencial para reduzir a umidade antes da sinterização, operando entre 800 e 900 °C, promovendo as transformações físico-químicas que conferem resistência ao material. Por fim, as peças são submetidas às etapas de escolha, paletização e armazenamento, normalmente executadas com o apoio de empilhadeiras. A Figura 2 apresenta o processo de fabricação da cerâmica estrutural.

Figura 2 – Processo de fabricação da cerâmica



Fonte: Autor, 2026

A composição e as propriedades físicas das matérias-primas influenciam diretamente todas as etapas do processo cerâmico, afetando desde o comportamento reológico da massa até a formação da microestrutura durante a sinterização. Para que a sinterização ocorra de forma eficiente, é fundamental realizar uma seleção criteriosa e uma preparação adequada das matérias-primas, além de controlar rigorosamente parâmetros como temperatura, taxa de aquecimento e atmosfera de queima. Características como tamanho e forma das partículas, densidade, área superficial, compacidade e grau de aglomeração determinam a qualidade final do produto, sendo que a presença de aglomerados pode gerar heterogeneidades, poros indesejados e retrações diferenciais. A variação no tamanho das partículas, de poucos a dezenas de micrômetros, também influencia a reatividade e os mecanismos de aglomeração durante a sinterização (Baptista, 2024).

O tijolo é o segundo material mais usado na construção depois do concreto, sendo escolhido por muitos arquitetos e designers por ser fácil de encontrar e por existir em vários tipos, tamanhos e níveis de eficiência (Moodi; Hanafi; Shariatinia, 2025).

Na indústria cerâmica, o acúmulo de tijolos cerâmicos sinterizados, quebrados ou defeituosos que não atendem aos padrões de mercado representa um desafio ambiental significativo, já que, após a sinterização, esses resíduos não podem ser reutilizados na fabricação e seu armazenamento inadequado contribui para impactos ambientais (Carrillo Beltrán *et al.*, 2025).

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) tem sido amplamente investigado como precursor promissor na síntese de geopolímeros, em razão de seu elevado teor de aluminossilicatos, que favorece a reatividade química durante o processo de ativação alcalina (Mendes *et al.*, 2022).

2.3 Ativadores e parâmetros alcalinos

Quanto aos ativadores, esses compostos são caracterizados como hidróxidos, silicatos, sulfatos ou carbonatos de metais alcalinos que, ao serem diluídos em água na proporção adequada, promovem o endurecimento do material precursor (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes e Jalali, 2008).

Li *et al.*, (2025) avaliaram o uso de diferentes ativadores químicos (NaOH , Na_2SiO_3 e Na_2CO_3) na produção de geopolímeros a partir da lama vermelha, resíduo gerado no beneficiamento da bauxita. O NaOH acelerou a geopolymerização ao promover rápida dissolução das fases reativas; o Na_2SiO_3 favoreceu a formação de estruturas mais densas e

melhor trabalhabilidade; já o Na_2CO_3 retardou o tempo de pega e reduziu a resistência mecânica. A combinação de NaOH e Na_2SiO_3 resultou em matriz homogênea e desempenho superior, evidenciando a importância do equilíbrio entre os ativadores.

Abdel Aziz e El Malky (2025) investigaram o uso de uma solução ativadora à base de sílica ativa como substituta do silicato de sódio comercial na produção de concreto geopolimérico com cinza volante. Foram avaliadas diferentes proporções de substituição de sílica ativa (20%, 25%, 30% e 35% do peso do ligante) e razões SF/ NaOH (0,75; 1,5; 2,0), observando-se que a razão 1,5 resultou no melhor desempenho mecânico, com resistência à compressão otimizada e formação de uma matriz mais densa e homogênea.

Carrillo Beltrán *et al.*, (2025) investigaram a ativação alcalina de resíduos de mineração e cerâmica utilizando cinzas de caroço de oliva (OSBA) como ativador sustentável em combinação com silicato de sódio (Na_2SiO_3). Foram testadas diferentes razões em massa entre OSBA e Na_2SiO_3 (1,7; 1,9; 2,2; e 2,4), observando-se que a razão 2,2 resultou no melhor desempenho mecânico, com resistência à compressão de 33,1 MPa após 28 dias de cura. A análise microestrutural revelou que o aumento da proporção de OSBA favoreceu a formação de uma matriz mais densa e com menor porosidade, indicando que o equilíbrio entre os ativadores é essencial para otimizar a reatividade e a consolidação da estrutura geopolimérica.

Quando se utiliza o hidróxido de sódio (NaOH) como solução alcalina, a concentração é expressa em termos de molaridade, isto é, o número de mols de NaOH dissolvidos por litro de solução. Esse parâmetro define a força da solução alcalina e influencia diretamente as reações de ativação. Ao ser misturado com o silicato de sódio (Na_2SiO_3), passa-se a considerar o módulo de sílica (M_s), que corresponde à razão molar entre o dióxido de silício (SiO_2) e o óxido de metal alcalino ($M_2\text{O}$) em sistemas compostos por silicatos e hidróxidos, sendo M um metal alcalino como o sódio ou o potássio (Provis e Bernal, 2014).

A ausência de uma metodologia padronizada para definir a quantidade ideal de ativador alcalino ou a proporção entre diferentes ativadores no sistema tem levado pesquisadores a adotarem critérios variados como o módulo de sílica ($M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), o teor de sódio expresso em porcentagem, a concentração molar de NaOH ou ainda relações em massa entre o ativador e o precursor ou entre os próprios ativadores (Retamal-Rojas *et al.*, 2025).

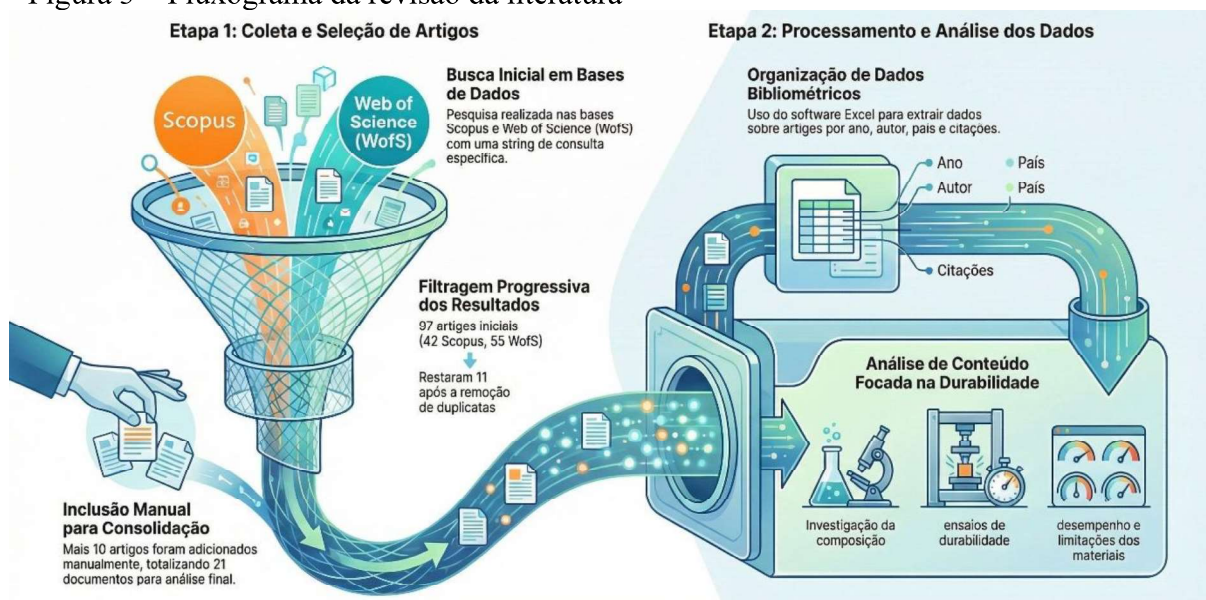
Por exemplo, Chira *et al.*, (2025) investigaram o comportamento corrosivo de armaduras de aço em ligantes geopoliméricos ativados com diferentes concentrações de NaOH (6 M, 8 M e 10 M) e proporções de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (1:1, 1:2 e 2:1), observando que a combinação de 8 M com razão 1:2 resultou na menor densidade de corrente de corrosão e na maior densidade aparente, indicando melhor desempenho mecânico e durabilidade.

Outro parâmetro relevante é o tempo de cura. Quando o material é submetido à cura em estufa a 60 °C, observa-se um aumento considerável na resistência à compressão, resultado da aceleração das reações de dissolução e polimerização dos precursores (Nasir *et al.*, 2020). Estudos complementares confirmam que temperaturas mais elevadas favorecem a formação de uma matriz mais densa e homogênea, reduzindo a porosidade e aumentando a durabilidade (Wu *et al.*, 2025). Além disso, diferentes condições de cura, combinando tempo prolongado e controle térmico, contribuem para maior estabilidade dimensional e resistência química, especialmente em sistemas ativados com NaOH e Na₂SiO₃ (Tavares *et al.*, 2024).

2.4 Durabilidade de compósitos álcali-ativados produzidos com resíduo de cerâmica vermelha e escória panela: uma revisão sistemática da literatura

Foram escolhidas as bases de dados da Scopus e Web of Science (WofS) devido à sua cobertura abrangente de artigos revisados por pares de editoras respeitáveis e à acessibilidade de dados bibliométricos para a realização de análises aprofundadas. A Figura 3 mostra as etapas realizadas, que serão detalhadas nas seções seguintes.

Figura 3 – Fluxograma da revisão da literatura



Fonte: Autor, 2026

A primeira etapa foi a coleta de dados em ambas as bases. A string de consulta usada neste estudo foi TITLE-ABS-KEY ("ceramic waste" OR "ceramic residue" OR "red ceramic" OR "Ladle slag" OR "Ladle furnace slag") AND TITLE-ABS-KEY (geopolymer OR "alkali

activated" OR "alkali activation" OR "alkali-activated binder" OR "alkali-activated materials" OR "AAMs") AND TITLE-ABS-KEY (Durability OR longevity OR Hardiness OR Consistency OR "Service life"), que retornou 42 artigos na Scopus e 55 na WofS. Uma delimitação foi aplicada para filtrar apenas artigos publicados em periódicos e artigos “open access”, o que rendeu 11 documentos na Scopus e 18 na WofS. Posteriormente, foi realizada a leitura dos títulos e resumos desses trabalhos, resultando em 18 artigos para análise. Por fim, foram removidos os documentos duplicados dentro das duas bases de dados, deixando um acervo de 11 artigos para análise.

Dado o número limitado de artigos sobre o tema, mais 10 artigos foram incluídos manualmente com os mesmos critérios de inclusão, excluindo-se a necessidade de serem artigos publicados em periódicos e “All open access”, para consolidar os conceitos e experiências, totalizando um conjunto de 21 documentos analisados na presente revisão.

A segunda etapa consistiu no processamento dos dados. Após a importação da base de dados, foi utilizado o software Excel para a organização dos dados e a extração de tabelas com informações referentes a quantidades de artigos por ano, por autores, quantidade de citações por artigos e autores e a quantidade de artigos por países, além dos artigos mais relevantes por periódicos. Por fim, foi realizada a análise dos trabalhos selecionados, com foco na composição na caracterização dos precursores, nos ensaios de durabilidade realizados, propriedades relacionadas, parâmetros experimentais, desempenho frente aos ambientes agressivos e as limitações identificadas na literatura quanto à durabilidade dos sistemas álcali-ativados.

2.4.1 Bibliometria

A amostra final foi composta por 21 trabalhos de 2019 a 2025, sendo 38,09% presentes na Scopus, 9,52% na WofS, e 52,38% presentes em ambas as bases. A Figura 4 apresenta a composição dos artigos por banco de dados. Os artigos foram publicados em 13 periódicos com um total de 283 citações.

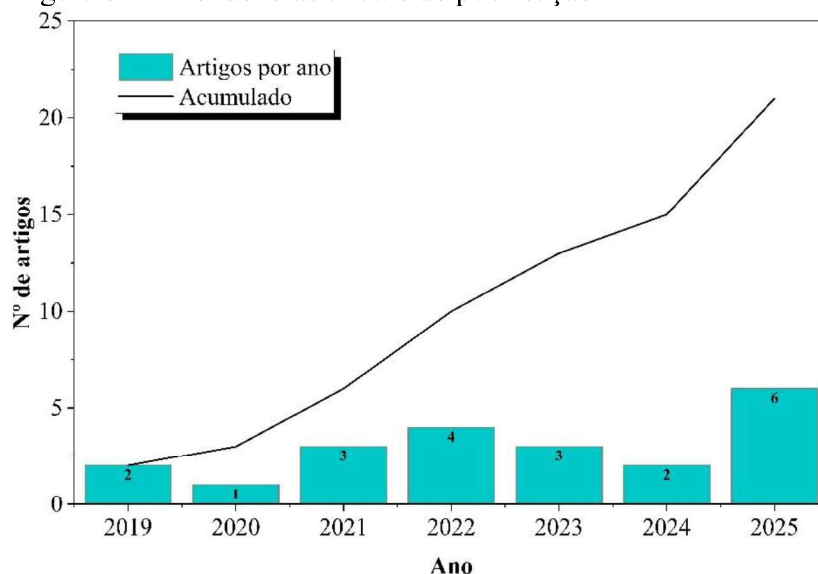
Figura 4 – Amostragem de artigos por base de dados



Fonte: Autor, 2026

A Figura 5 contém as tendências anuais de publicação. A linha representa a soma cumulativa de publicações ao longo dos anos e as barras indicam a quantidade de publicações por ano. Apesar de ainda existirem poucos estudos, é possível notar um aumento gradual no interesse pelo tema, especialmente com os picos de publicações em 2021, 2022 e o crescimento mais forte em 2025. O acumulado de artigos também confirma essa tendência de expansão. O primeiro artigo registrado é de autoria de Nguyen *et al.*, (2019), o primeiro mais citado na amostra. O artigo foi publicado no periódico Construction And Building Materials, que está classificado entre os 4 periódicos mais produtivos da amostra.

Figura 5 – Tendências anuais de publicação



Fonte: Autor, 2026

A Tabela 2 contém o resultado dos periódicos mais produtivos e o número de artigos publicados ao longo do tempo.

Tabela 2 – Periódicos mais produtivos e o número de artigos publicados ao longo do tempo

Classificação	Periódico	2019 - 2022	2023	2024	2025	Total	% de artigos
1	Materials	1	1		2	4	19,05
2	Construction and Building Materials	1			1	2	9,52
3	Buildings			1	1	2	9,52
4	Journal of Materials Research and Technology	1			1	2	9,52
5	Sustainability	2				2	9,52
6	Archives of Metallurgy and Materials			1		1	4,76
7	Boletín de La Sociedad Espanhola de Ceramica y Vidrio		1			1	4,76
8	Coatings		1			1	4,76
9	Cement and Concrete Research	1				1	4,76
10	Processes	1				1	4,76
11	Civil Engineering Journal-Tehran	1				1	4,76
12	Science of Sintering	1				1	4,76
13	Cement & Concrete Composites	1				1	4,76
14	Infrastructures				1	1	4,76
Total		10	3	2	6	21	100,00

Fonte: Autor, 2026

Inicialmente, observa-se uma concentração significativa de documentos nos primeiros cinco periódicos, enquanto os restantes apresentam alta dispersão, ou seja, 57,13% dos artigos foram publicados em cinco periódicos (35,71% do número de periódicos). Essas revistas são: Materials, Construction and Building Materials, Buildings, Journal of Materials Research and Technology e Sustainability.

Na Tabela 3 estão dispostos os principais autores com base no número de artigos publicados como primeiro autor, coautor e total de citações. A Tabela mostra apenas autores com dois ou mais artigos na amostra.

Tabela 3 – Autores mais prolíficos em publicações

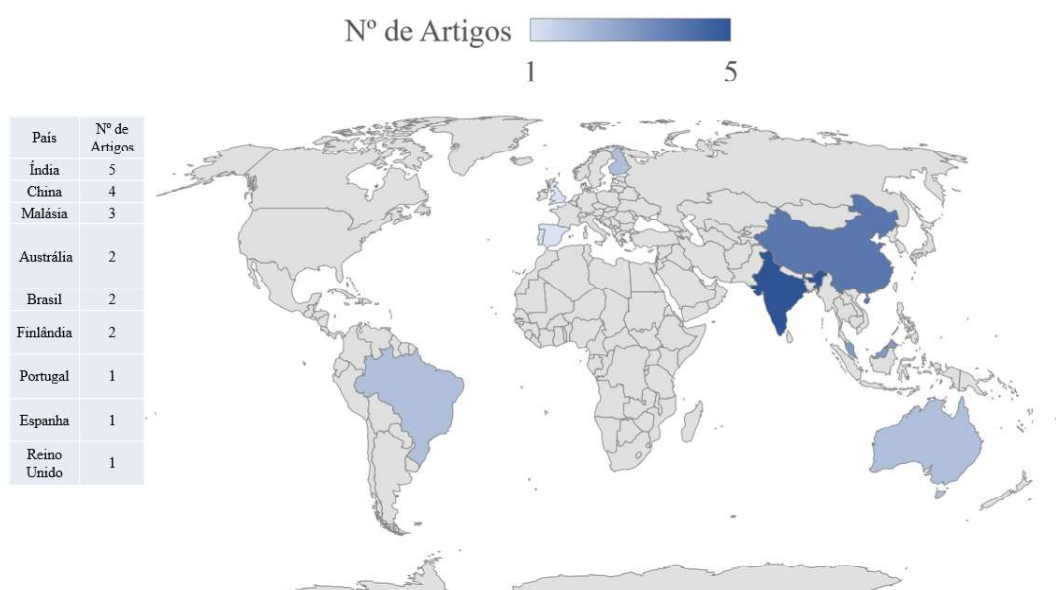
Nº	Nome do autor	Nº de vezes como autor principal	Nº de vezes como co-autor	Total de citações
1	Nguyen, H	2	0	103
2	Kinnunen, P	0	2	103
3	Illikainen, M	0	3	133
4	Huseien, GF	0	2	30

5	Youssif, O	1	1	3
---	------------	---	---	---

Fonte: Autor, 2026

A Figura 6 destaca os países em que os artigos foram produzidos. A Índia aparece como o país com maior número de estudos. Em seguida, a China se destaca com quatro publicações, impulsionada por grupos de pesquisa consolidados em durabilidade, ativação alcalina e técnicas avançadas de cura com CO₂.

Figura 6 – Produções por países



Fonte: Autor, 2026

Brasil e Finlândia aparecem com participação relevante, cada uma focada em tipos específicos de resíduos ou abordagens tecnológicas. Já Portugal, Espanha e Reino Unido contribuem de forma mais pontual, mas com estudos de alta qualidade. No conjunto, os dados revelam um campo internacional em expansão, com forte potencial de colaboração entre países com diferentes recursos e especializações.

2.4.2 Análise dos artigos sobre o tema

2.4.2.1 Composição química dos precursores

Para compreender o potencial de reatividade dos precursores utilizados na produção de compósitos álcali-ativados, é essencial analisar sua composição química. A Tabela 4 contém os teores de óxidos principais (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, entre outros) de diferentes amostras de

resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória panela (PAN), conforme reportado nos trabalhos da amostra.

Tabela 4 – Composição química dos precursores

Material	Composição química (%)								Referência
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	
RCV	2,73	68,99	8,98	3,97	-	-	1,04	1,75	Yousuf <i>et al.</i> , 2025
RCV	2,73	68,99	18,18	3,87	-	-	1,04	2,89	Al-Tam <i>et al.</i> , 2025
RCV	7,34	58,89	15,28	7,45	0,83	2,43	0,42	5,01	Carrillo-Beltran <i>et al.</i> , 2025
RCV	5,49	64,74	20,7	0,63	0,01	2,89	2,01	0,77	Kurtay-Yildiz; Emiroğlu, 2025
RCV	0,64	54,89	26,28	9,1	0,59	1,3	0,13	3,97	Gaibor <i>et al.</i> , 2025
PAN	64,23	19,68	4,86	1,39	4,69	3,54	0,31	-	
PAN	46,2	19,6	6,54	8,12	2,53	5,51	-	-	Yong-Jie <i>et al.</i> , 2024
PAN	51,75	13,97	25,45	1,2	2,35	3,75	0,12	-	Liu <i>et al.</i> , 2025
PAN	54,6	9,78	0,8	7,59	0,6	5,79	-	-	Silva <i>et al.</i> , 2024
PAN	51	8,3	27,9	1,1	0,8	6,3	-	-	Nguyen <i>et al.</i> , 2019
PAN	44,21	22,2	15,6	6,82	-	8,44	0,01	0,01	Bjelcic <i>et al.</i> , 2020
PAN	48,6	9,3	29,6	1,8	0,4	6,6	0,2	0,03	Adediran <i>et al.</i> , 2022

Fonte: Autor, 2026

A análise comparativa evidencia que os resíduos de cerâmica vermelha apresentam predominância de SiO₂ e Al₂O₃, predominando a formação do gel N-A-S-H nas reações da mistura. Já as amostras de escória panela (PAN) demonstram maior teor de CaO e MgO, indicando potencial para formação de C-A-S-H nas reações álcali-ativadas e adequado para produção de compósitos com captura e armazenamento de CO₂.

Apenas um artigo da amostragem apresentou compósitos formulados especificamente com RCV e PAN como precursores, como pode ser identificado na Tabela. Trata-se do trabalho de Gaibor *et al.*, (2025), que investigou o desenvolvimento de painéis meio-sanduíche com revestimentos alcalinos ativados, explorando a sinergia entre os dois resíduos industriais.

2.4.2.2 Ensaios de durabilidade identificados nos estudos

A avaliação da durabilidade dos compósitos álcali-ativados produzidos com resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e/ou escória panela (PAN) emprega uma variedade de ensaios para simular condições agressivas e verificar o desempenho a longo prazo dos materiais. Entre os principais métodos identificados na amostragem, destacam-se os testes de absorção de água, resistência à ação de sulfatos, cloretos e ácidos, estabilidade térmica, resistência à abrasão e ciclos de congelamento e descongelamento. A Figura 7 ilustra cada tipo de ensaio.

Figura 7 – Ensaio de durabilidade em compósitos álcali-ativados



Fonte: Autor, 2026

No estudo de Bijeljić *et al.* (2020), a avaliação da durabilidade das argamassas geopoliméricas foi conduzida por meio de diferentes ensaios normativos. A determinação da absorção de água foi realizada conforme a norma EN 1015-18, enquanto a resistência ao congelamento e descongelamento das argamassas à base de escória panela seguiu os procedimentos da EN 14617-5. Já a resistência a sulfatos foi avaliada de acordo com o relatório de desempenho CEN/TR 15697. As amostras foram inicialmente curadas em condições ambientais até atingirem 28 dias de idade e, posteriormente, imersas em solução de Na_2SO_4 a 5% por um período contínuo de 180 dias, permitindo analisar a estabilidade química e mecânica dos compósitos frente ao ataque por sulfatos.

No estudo de Adediran *et al.*, (2022), a resistência ao congelamento e descongelamento das argamassas foi avaliada conforme a norma ASTM C666/C666M-15. Para cada traço, três amostras com 28 dias de idade foram submetidas a três meios de exposição distintos: água potável, solução combinada de sulfato de sódio e cloreto de sódio, e solução de ácido sulfúrico com pH igual a 1, todas acondicionadas em uma câmara climática. O nível das soluções e o pH foram mantidos constantes durante todo o ensaio, totalizando 180 ciclos de congelamento e descongelamento ao longo de aproximadamente dois meses. Cada ciclo variou de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, com duração total de 8 horas. Paralelamente, amostras adicionais de cada mistura foram imersas nas mesmas soluções (exceto água) e mantidas à temperatura ambiente por dois meses, permitindo comparar o comportamento em condições agressivas típicas de regiões frias e tropicais. A solução de ácido sulfúrico a 5% foi preparada conforme metodologia

previamente estabelecida, enquanto a solução combinada de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio seguiu referência específica para simular ambientes marinhos severos. Em todos os casos, as amostras permaneceram totalmente imersas, e as soluções foram renovadas a cada 15 dias, correspondendo a 45 ciclos.

No estudo de Costa *et al.*, (2021), o comportamento de durabilidade das cerâmicas produzidas por ativação alcalina de resíduos de tijolos foi avaliado por meio de quatro ensaios distintos: envelhecimento natural, envelhecimento acelerado, exposição ao ambiente marinho e exposição a meios ácidos. No ensaio de envelhecimento natural, as amostras foram mantidas em ambiente controlado, protegido de variações climáticas, com temperatura entre 22 °C e 33 °C e umidade relativa em torno de 75%, sendo avaliadas aos 28, 60 e 90 dias. O envelhecimento acelerado foi conduzido por meio de um teste de chuva simulada, composto por ciclos de 2 horas de umedecimento seguidos de 48 horas de secagem em estufa a 35 °C, totalizando 24 ciclos. Para a avaliação em ambiente marinho, as amostras foram expostas à névoa salina em uma área costeira situada a 100 m da linha de costa, também pelos períodos de 28, 60 e 90 dias. Já no ensaio de resistência a ácidos, as amostras foram imersas em soluções a 5% de HCl e H₂SO₄ pelos mesmos intervalos de exposição, sendo posteriormente secas em estufa a 35 °C por 48 horas.

2.4.2.3 Influência das variáveis experimentais no desempenho em durabilidade

A tabela 5 sintetiza os principais estudos experimentais que avaliaram o desempenho de compósitos cimentícios álcali-ativados quando expostos a soluções químicas agressivas.

Tabela 5 – Avaliação da durabilidade de compósitos álcali-ativados sob diferentes parâmetros

Referência	Precusores / Ativadores	Solução	Concentração	Ciclos / Período	Observações
Costa <i>et al.</i> (2021)	RCV / NaOH, KOH, Na ₂ SiO ₃	HCl	5%	Imersão contínua por 28, 60 e 90 dias	Secagem apenas antes do ensaio; lixiviação moderada.
Costa <i>et al.</i> (2021)	RCV / NaOH, KOH, Na ₂ SiO ₃	H ₂ SO ₄	5%	Imersão contínua por 28, 60 e 90 dias	Secagem apenas antes do ensaio; redução de resistência.
Adediran <i>et al.</i> (2022)	AAFS-LS / NaOH, Na ₂ SiO ₃	H ₂ SO ₄	5%	Imersão contínua por 30 e 60 dias	Deterioração moderada; integridade mantida.
Adediran <i>et al.</i> (2022)	AAFS-LS / NaOH, Na ₂ SiO ₃	Na ₂ SO ₄ + NaCl	5% + 3%	Imersão contínua por 30 e 60 dias	Estável; leve dano superficial.

Bijeljić <i>et al.</i> (2020)	FA, LS / NaOH, Na ₂ SiO ₃	Na ₂ SO ₄	5%	Imersão contínua por 180 dias	Aumento da resistência à compressão (até +26%); sem danos visuais.
-------------------------------	---	---------------------------------	----	-------------------------------	--

Fonte: Autor, 2026

Foram considerados diferentes tipos de precursores e ativadores, bem como variações nas concentrações das soluções, nos ciclos de imersão e nas metodologias de envelhecimento.

A análise comparativa revela que os compósitos ativados com silicato de sódio apresentam desempenho superior frente ao ataque ácido, especialmente quando combinados com resíduos cerâmicos ou escórias ricas em sílica e alumina. Estudos como os de Costa *et al.*, (2021) e Adediran *et al.*, (2022) demonstram que a imersão contínua em H₂SO₄ e HCl provoca redução de resistência, mas sem perda estrutural crítica quando há controle de cura e formulação adequada.

Além dos estudos apresentados na Tabela 5, a literatura apresenta um conjunto consistente de investigações que adotam diferentes soluções agressivas e concentrações padronizadas para avaliar a durabilidade de materiais álcali-ativados. A utilização de ácido sulfúrico a 5% é amplamente fundamentada em pesquisas que analisam o comportamento de concretos ativados alcalinamente sob ataque ácido severo, demonstrando ser uma concentração suficientemente agressiva para acelerar mecanismos de degradação sem descaracterizar o ensaio (Qureshi *et al.*, 2025; Ný e Bilenler Altundal, 2023; Khan *et al.*, 2024). De forma semelhante, a aplicação de sulfato de magnésio a 10% é usada para ensaios de ataque externo por sulfatos, especialmente relevantes para sistemas álcali-ativados, nos quais o magnésio desempenha papel crítico na desestabilização de géis e na formação de fases expansivas (Jagadisha *et al.*, 2024; Kanaan *et al.*, 2023; Allahvedi e Hashemi, 2015).

Para ambientes associados à penetração de cloretos, diversos autores empregam soluções de NaCl a 3%, representativas de condições marinhas e de exposição a névoa salina, permitindo avaliar processos de lixiviação, alteração microestrutural e perda de resistência mecânica (Wardhono *et al.*, 2023; Udhaya Kumar *et al.*, 2024; Azar *et al.*, 2024). Complementarmente, alguns estudos recorrem ao uso de água do mar natural, cuja composição química diversificada, rica em íons cloreto, sulfato, magnésio, cálcio e compostos orgânicos, reproduz de forma mais realista a agressividade encontrada em estruturas costeiras e submersas. Essa abordagem tem sido especialmente valorizada por sua capacidade de simular a ação

combinada de múltiplos agentes deteriorantes, ampliando a representatividade dos ensaios de durabilidade (Silva *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2024).

2.4.2.4 Desempenho mecânico frente a ambientes agressivos

No estudo de Gaibor *et al.*, (2023), foram produzidas pastas álcali-ativadas contendo 75% de RCV e 25% de PAN, utilizando silicato de sódio como ativador químico e um superplastificante à base de policarboxilato, alcançando uma resistência mecânica de aproximadamente 22 MPa aos 28 dias. Em Gaibor *et al.*, (2021), a mesma pasta modificada composta por 72% de RCV e 28% de PAN, com o mesmo ativador e superplastificante, foi empregada na produção de argamassas, resultando em uma resistência de 34,44 MPa. Já em Gaibor *et al.*, (2025), a pasta foi aprimorada com a incorporação de fibras de poliacrilonitrila, atingindo 37,2 MPa aos 28 dias, desempenho que permitiu sua aplicação como camada rígida em painéis sanduíche.

No conjunto desses estudos, observa-se que a combinação dos precursores RCV e PAN resulta em matrizes álcali-ativadas com excelentes desempenhos mecânicos. Esses resultados evidenciam o elevado potencial desses materiais para aplicações estruturais e semiestruturais. Contudo, para consolidar sua viabilidade tecnológica, torna-se essencial avançar para a avaliação da durabilidade dos compósitos, incluindo ensaios de imersão em soluções que simulem ambientes agressivos, como meios ácidos, salinos ou de elevada umidade, a fim de compreender sua estabilidade química, resistência à lixiviação e comportamento a longo prazo. Até o momento, entretanto, os estudos de durabilidade disponíveis na literatura avaliam RCV e PAN apenas de forma isolada ou combinados com outros precursores.

No estudo de Costa *et al.*, (2021), após os ensaios de durabilidade nas pastas utilizando RCV, a perda de resistência à flexão foi evidente em todos os sistemas, mas com intensidades distintas. No ataque ácido com HCl e H₂SO₄ a 5%, as amostras ativadas com Na₂SiO₃, que inicialmente apresentavam cerca de 10 a 15 MPa, reduziram para aproximadamente 8 a 10 MPa aos 28 dias, 6 a 8 MPa aos 60 dias e 5 a 7 MPa aos 90 dias, mantendo-se ainda superiores aos demais sistemas. As amostras ativadas com NaOH, partindo de 2–3 MPa, apresentaram reduções mais moderadas, atingindo cerca de 1,5 a 2 MPa aos 28 dias, 1 a 1,5 MPa aos 60 dias e valores próximos de 1 MPa aos 90 dias. Já no caso da ativação com KOH, inicialmente com 1,5 a 3 MPa, a degradação foi muito mais severa: após 60 dias, a resistência já se encontrava abaixo de 1 MPa, com danos visíveis, e aos 90 dias a deterioração

era tão avançada que impossibilitou a medição, evidenciando a maior vulnerabilidade desse sistema em ambientes agressivos.

Em concretos, no estudo de Youssf *et al.*, (2025), a incorporação de RCV permitiu alcançar resistências próximas de 110 MPa. Após imersão em meios agressivos por 30 e 90 dias, incluindo MgSO_4 5%, NaCl 5% e HCl 5%, os compósitos apresentaram reduções típicas entre 15% e 33%, e mesmo sob ataque ácido, o cenário mais severo, os concretos com RCV ainda preservaram resistências significativamente elevadas. Em argamassas, na pesquisa de Adediran *et al.*, (2022), a mistura utilizando escória PAN e escória fayalítica (FS) preservou grande parte da resistência à compressão inicial, após imersão em solução ácida ($\text{pH} = 1$) e em solução combinada de sulfato e cloreto, com perdas típicas entre 10% e 25%.

2.4.2.5 Propriedades relacionadas à durabilidade

A partir dos ensaios de durabilidade, diversos estudos reportaram propriedades físico-químicas e mecânicas que refletem o desempenho dos compósitos frente às condições agressivas simuladas. Entre essas propriedades, destacam-se a resistência à compressão e à flexão após exposição prolongada, a variação de massa, a formação de fissuras superficiais, a estabilidade dimensional e a integridade estrutural dos materiais. Tais parâmetros são fundamentais para compreender os mecanismos de degradação, a eficiência da ativação alcalina e o potencial de aplicação dos compósitos em ambientes críticos, como regiões costeiras, industriais ou sujeitas a ciclos térmicos intensos.

Além das propriedades mecânicas e físico-químicas, os estudos também investigaram parâmetros microestruturais que auxiliam na compreensão dos mecanismos de degradação das misturas álcali-ativados. Entre os métodos empregados, destacam-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizada para observar a morfologia, a presença de fissuras e a distribuição de fases reativas, a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), aplicada para identificar alterações nas ligações químicas após exposição aos ambientes agressivos, a difração de raios X (DRX), que permite acompanhar transformações cristalinas e a estabilidade das fases formadas, e a porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), essencial para avaliar mudanças na distribuição e no volume de poros.

As análises microestruturais apresentadas por Adediran *et al.*, (2022) evidenciam como a adição de escória altera o comportamento dos compósitos após a exposição a ambientes agressivos. Os resultados de DRX mostram que o material produzido apenas com fayalita (FS) manteve cerca de 55% de fase amorfa, mas apresentou intensa perda de integridade após os

ataques, enquanto as misturas com PAN e BFS exibiram maior formação de géis C-A-S-H e N-A-S-H, associados à maior estabilidade química. A porosimetria por intrusão de mercúrio revelou que o volume total de poros da mistura de referência com FS aumentou significativamente após os ensaios, ultrapassando 0,30 ml/g, enquanto os compósitos FS-PAN e FS-BFS mantiveram valores inferiores a 0,15 ml/g, indicando microestruturas mais densas e menos suscetíveis à penetração de agentes agressivos. As imagens de MEV reforçam esse comportamento, em que o FS apresentou matriz altamente fissurada e perda de pasta após 90 ciclos de congelamento-descongelamento, apresentando desintegração completa após 180 ciclos em ácido sulfúrico e na solução combinada de sulfato e cloreto. Em contrapartida, as misturas com PAN e BFS permaneceram estruturalmente estáveis, exibindo apenas danos superficiais, mesmo após 180 ciclos.

A análise microestrutural do concreto geopolimérico de alto desempenho no estudo de Youssf *et al.*, (2025) mostrou diferenças claras entre as misturas contendo borracha moída, vidro reciclado e resíduo cerâmico. As amostras com borracha moída apresentaram matriz heterogênea, com zonas de descontinuidade e poros arredondados associados à baixa aderência entre a borracha e o gel geopolimérico, o que explica a expressiva redução de resistência observada (até 83,5%). Já as misturas com vidro reciclado exibiram microestrutura mais densa, com partículas bem ancoradas e menor volume de vazios, coerente com a redução de até 72% na absorção de água. As amostras com resíduo cerâmico apresentaram a microestrutura mais compacta entre todas as formulações, com formação abundante de gel aluminosilicato e boa integração entre partículas cerâmicas e matriz, o que se refletiu no aumento de 24% a 29% da resistência à compressão.

Os estudos analisados demonstram que ambos os precursores possuem composição química favorável à formação de géis cimentantes estáveis (N-A-S-H e C-A-S-H), resultando em matrizes com bom desempenho mecânico e potencial para aplicações estruturais e semiestruturais. Entretanto, a literatura ainda é limitada quanto à avaliação sistemática da durabilidade desses materiais, especialmente quando RCV e PAN são utilizados em conjunto, havendo predominância de investigações isoladas ou combinadas com outros precursores.

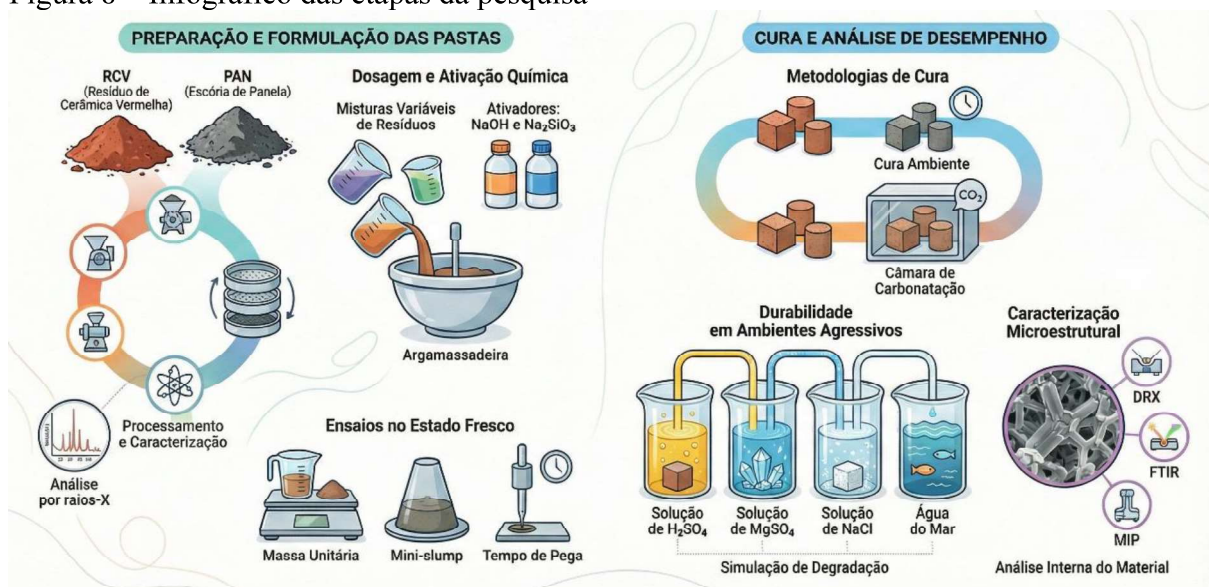
Os resultados disponíveis indicam que sistemas contendo RCV apresentam boa resistência inicial e comportamento satisfatório frente a meios ácidos e salinos, enquanto compósitos com PAN, sobretudo quando associados a escórias ricas em Ca e Al, demonstram desempenho superior em ambientes severos, preservando grande parte da resistência mesmo, ataques sulfáticos e exposição a soluções ácidas.

Dessa forma, conclui-se que o uso combinado de RCV e PAN em sistemas álcali-ativados é promissor, mas carece de estudos aprofundados que investiguem sua estabilidade química, microestrutural e mecânica em longo prazo. Ensaio de durabilidade mais abrangentes, incluindo ciclos térmicos, ataques químicos múltiplos, exposição natural prolongada e análises microestruturais, são essenciais para consolidar o conhecimento e permitir a aplicação segura desses materiais em escala industrial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 8 são apresentadas as etapas da pesquisa, que serão detalhadas nos próximos tópicos.

Figura 8 – Infográfico das etapas da pesquisa

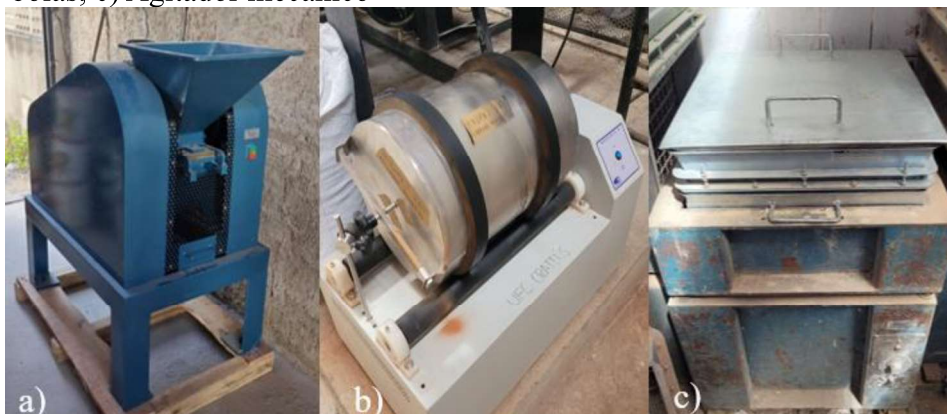


Fonte: Autor, 2026

3.1 Ligantes

Os precursores (RCV e PAN) foram inicialmente britados, moídos, secos em estufa a 100°C por 24 horas e peneirados para reter apenas partículas com espessuras inferiores a $150\ \mu\text{m}$, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Processamento dos precursores. a) Britador; b) Moinho de bolas; c) Agitador mecânico



Fonte: Autor, 2026

A composição química dos materiais foi determinada por Fluorescência de Raios X (FRX), no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Cariri (UFCA), conforme a Tabela 6. De acordo com a ABNT NBR 16605:2017, o RCV apresentou massa específica de $2,76 \text{ g/cm}^3$, enquanto a escória PAN registrou $3,03 \text{ g/cm}^3$. Além disso, as áreas específicas determinadas pelo método de Blaine, conforme a ABNT NBR 16372:2020, foram de $5061,74 \text{ cm}^2/\text{g}$ para o RCV e $4367,81 \text{ cm}^2/\text{g}$ para a PAN.

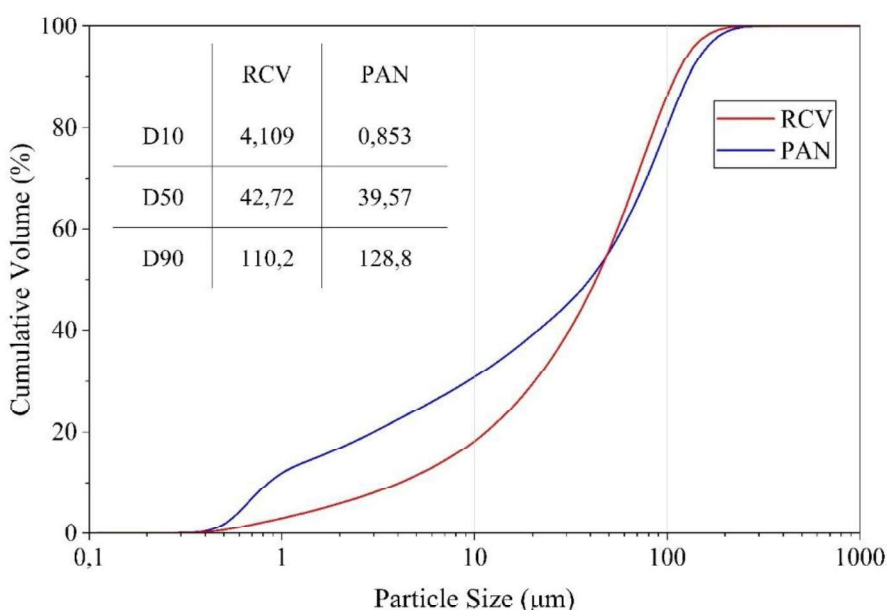
Tabela 6 – Composição química dos precursores utilizados

Composição química (%)								
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Outros
RCV	63,21	20,53	8,77	1,35	-	4,05	0,1	1,99
PAN	14,48	5,16	21,93	36,08	2,33	0,15	0,36	19,51

Fonte: Autor, 2026

A análise granulométrica das amostras RCV e PAN foi realizada por difração a laser, procedimento realizado no Laboratório de Inovações em Cimentos Ecoeficientes (LINCE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), conforme apresentado na Figura 10, permitindo a caracterização precisa da distribuição de partículas. Os valores de diâmetro médio (D50) obtidos foram de $42,72 \mu\text{m}$ para a amostra RCV e $39,57 \mu\text{m}$ para a amostra PAN, indicando perfis granulométricos semelhantes, com diferenças relevantes nas faixas de partículas finas e grossas. A curva cumulativa evidencia a progressão volumétrica.

Figura 10 – Curva cumulativa granulométrica dos precursores



Fonte: Autor (2026)

3.2 Métodos

A ativação química foi realizada utilizando uma solução alcalina de dois componentes. Primeiramente, escamas de NaOH (98,5% de pureza; densidade 2,130 g/cm³) foram dissolvidas em água destilada para preparar uma solução de 4 mol/l. Solução comercial de silicato de sódio (densidade 1,583 g/cm³; 33% SiO₂, 15% Na₂O, 53% H₂O; fórmula geral Na₂SiO₃) foi então adicionada à solução de NaOH um minuto antes da mistura da pasta. Os precursores foram colocados em um misturador de argamassa e, após 30 segundos de mistura, foi feita a introdução do ativador pré-misturado, misturadas a 125 rpm por 4,5 minutos para produzir uma pasta homogênea.

Seis sistemas ligantes distintos foram formulados, conforme detalhado na Tabela 7 sobre proporções de mistura. As relações entre os componentes de óxido na mistura são amplamente utilizadas como indicadores-chave da formação e evolução da matriz álcali-ativada (Bignozzi *et al.*, 2013; Rafeet *et al.*, 2017). Neste estudo, as razões CaO/SiO₂ e Al₂O₃/SiO₂ representam as razões molares de óxido nos precursores. De acordo com Provis e Van Deventer (2014), as razões CaO/SiO₂, para matrizes com alto teor de cálcio, e Al₂O₃/SiO₂ para matrizes com baixo teor de cálcio (em % em peso) entre 0,5 e 2,0 e 0,1 e 0,6, respectivamente, são adequadas para a síntese de materiais álcali-ativados.

Tabela 7 – Proporções de mistura

Mistura	RCV- PAN (%)	NaOH / Na ₂ SiO ₃ (%)	RCV (kg/m ³)	PAN (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	Razão % Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Razão % CaO/SiO ₂
7R3P64	70-30	60/40	1274	546	491,4	327,6	0,33	-
5R564	50-50	60/40	910	910	491,4	327,6	0,33	0,48
3R7P64	30-70	60/40	546	1274	491,4	327,6	-	0,88
7R3P46	70-30	40/60	1274	546	327,6	491,4	0,33	-
5R5P46	50-50	40/60	910	910	327,6	491,4	0,33	0,48
3R7P46	30-70	40/60	546	1274	327,6	491,4	-	0,88

Legenda: R = Resíduo cerâmico; P = Escória panela. 3 = 30%; 4 = 40%; 5 = 50%; 6 = 60%; 7 = 70%.

Fonte: Autor, 2026

Além disso, a literatura demonstra o bom desempenho de sistemas híbridos compostos por um precursor de baixo teor de cálcio (como metacaulim ou cinza volante) e outro de alto teor de cálcio (como escória de alto-forno), especialmente quando utilizados em proporções entre 30% e 70%, metodologia utilizada por Araujo (2023) e Costa (2023). Essa abordagem favorece a formação de fases cimentantes complementares, como C-A-S-H e N-A-

S-H, resultando em maior resistência mecânica e estabilidade química (Costa *et al.*, 2022; Provis & van Deventer, 2014).

A primeira mistura, com 70%RCV e 30%PAN, apresenta alto teor de SiO_2 e Al_2O_3 e baixo teor de CaO , favorecendo a formação de gel N-A-S-H. A segunda, com 30%RCV e 70%PAN, possuindo baixo teor de SiO_2 e Al_2O_3 e elevado teor de CaO , estimula a formação de gel C-A-S-H. Uma terceira proporção, 50%RCV e 50%PAN, foi formulada para equilibrar os principais óxidos, buscando sinergia entre resistência mecânica e durabilidade.

Os ensaios no estado fresco (Tópico 4.2.3) foram realizados logo após a produção das pastas. Os corpos de prova foram moldados em formas cúbicas de 4 cm e deixados para endurecer por 24 horas antes de serem desmoldados. Assim que retirados dos moldes, cada cubo foi envolvido com filme plástico de polipropileno (PP) para evitar a perda de umidade, conforme apresentado na Figura 11. As misturas produzidas permaneceram em cura ambiente por 28 dias ($\approx 25^\circ\text{C}$) antes de serem submetidas aos ensaios de degradação, metodologia também realizada no estudo de Mawire *et al.* (2026). Após esse período, todos os corpos de prova foram imersos em diferentes soluções agressivas: ácido sulfúrico em recipientes de vidro; e sulfato de magnésio, cloreto de sódio e água do mar natural em recipientes plásticos. As avaliações mecânicas foram realizadas aos 28 e 56 dias de exposição cíclica, na qual os corpos de prova permanecem imersos por 6 dias consecutivos e, em seguida, mantidos por 1 dia em ambiente natural, simulando condições reais de alternância entre saturação e secagem. Após cada ciclo, conforme detalhado no Tópico 3.5.2, os corpos de prova são analisados e retornam à imersão, garantindo a continuidade do ensaio e a representatividade das condições ambientais.

Figura 11 – Corpo de Prova envolvido com filme plástico de PP após a desforma



Fonte: Autor, 2026

Ao final dos 28 dias de exposição cíclica, amostras dos corpos de prova foram cuidadosamente coletadas para a realização de ensaios microestruturais, conforme detalhado no Tópico 3.6. Essas análises foram realizadas por meio de técnicas como espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TG) e porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP), com o objetivo de investigar alterações internas nos ligantes álcali-ativados, identificar produtos de degradação e avaliar a estabilidade estrutural dos materiais frente aos diferentes meios agressivos.

3.2.1 Carbonatação acelerada

Com base nos resultados obtidos na etapa inicial, duas formulações foram selecionadas para a realização dos ensaios após cura em carbonatação acelerada (7R3P46 e 3R7P46). Nesta etapa, buscou-se, primeiramente, definir o momento mais adequado para a aplicação da carbonatação, uma vez que a literatura indica que a exposição precoce de materiais álcali-ativados ao CO₂ pode interferir negativamente na formação dos géis N–A–S–H e C–A–S–H, comprometendo o desenvolvimento microestrutural e, consequentemente, a resistência mecânica (Nguyen *et al.*, 2022). Assim, foram avaliados dois regimes de cura e carbonatação.

No primeiro regime (C1), os corpos de prova foram moldados e mantidos em cura em ambiente por 24 h, sendo em seguida submetidos à carbonatação acelerada por 24 h e, posteriormente, retornados à cura em ambiente por mais 5 dias. No segundo regime (C2), corpos de prova da mesma mistura permaneceram inicialmente em cura ambiente por 5 dias, sendo então expostos por 24 h à câmara de carbonatação acelerada, e mantidos por mais 24 h em cura ambiente. Aos 7 dias de idade, todos os corpos de prova foram ensaiados à compressão, de modo a avaliar o impacto da sequência de cura/carbonatação na resistência mecânica. Na Tabela 8 encontra-se o fluxograma resumido dos regimes adotados na carbonatação acelerada.

Tabela 8 – Fluxograma dos regimes adotados na carbonatação acelerada

Regime	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
C1	Cura em ambiente por 24 h	Carbonatação acelerada por 24 h	Cura em ambiente por 5 dias
C2	Cura em ambiente por 5 dias	Carbonatação acelerada por 24 h	Cura em ambiente por 24 h

Fonte: Autor, 2026

Os resultados indicaram que os corpos de prova submetidos à carbonatação precoce (C1) apresentaram resistências significativamente inferiores (5,35 Mpa para 7R3P46 e 33,90

MPa para 3R7P 46), corroborando a hipótese de que a exposição antecipada ao CO₂ prejudica a evolução dos géis de ligação nos sistemas álcali-ativados. Em contrapartida, o regime C2 favoreceu o desenvolvimento mecânico, resultando em resistências mais elevadas aos 7 dias (16,85 Mpa para 7R3P46 e 42,12 MPa para 3R7P 46), motivo pelo qual essa metodologia foi adotada para a continuidade do estudo. Assim, novas séries das misturas 7R3P46 e 3R7P46 foram produzidas e submetidas ao regime C2, nomeadas por 7R3P46CC e 3R7P46CC, respectivamente. Aos 7 dias, já apresentando resistência adequada, os corpos de prova foram destinados aos ensaios de durabilidade por imersão em soluções de H₂SO₄ e NaCl. Esses meios agressivos foram selecionados por terem se mostrado mais críticos para as amostras sem carbonatação, permitindo, portanto, comparar diretamente o desempenho antes e após a carbonatação sob as mesmas condições de exposição.

A carbonatação acelerada foi realizada na Universidade da Beira Interior (UBI), Covilhã, Portugal, operando nas seguintes condições: durante 24 horas, concentração de CO₂ superior a 99%, pressão parcial de CO₂ de 0,1 a 0,8 bar, temperatura controlada de 60 ± 2 °C e humidade relativa acima de 99%, metodologia adaptada de Constantino, Castro-Gomes e Vicente (2025).

Figura 12 – Câmara de carbonatação.



Fonte: Autor, 2026

Considerando a diferença de temperatura entre Fortaleza, Brasil ($30\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$), onde foram produzidos e curados em ambiente os primeiros corpos de prova, e Covilhã, Portugal ($5\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$), foram moldados corpos de prova da mesma composição e

posteriormente rompidos aos 7 e 28 dias de cura ambiente (resultado em anexo), com o objetivo de comparação. Os resultados mostraram que a mistura 7R3P46 apresentou resistência média de 5,85 MPa aos 7 dias e 27,35 MPa aos 28 dias, enquanto a mistura 3R7P46 alcançou 12,40 MPa aos 7 dias e 26,70 MPa aos 28 dias. Para a produção das misturas, manteve-se a metodologia previamente adotada, alterando apenas o tipo de silicato de sódio utilizado, sendo empregado o silicato de sódio alcalino L60, cuja especificação está detalhada na Tabela 9, produto de características semelhantes ao já utilizado nas primeiras formulações.

Tabela 9 – Ficha técnica do silicato de sódio alcalino L60

Propriedades químicas				
	Expresso em	Unidade	Garantia	Método
Óxido de Silício	SiO ₂	g/kg	350-362	LAB/IT - SIS 01
Óxido de Sódio	Na ₂ O	g/kg	179-185	LAB/IT - SIS 02
Rp (SiO₂/Na₂O)	-	-	1,92-2,0	Por cálculo
Propriedades físicas				
Aspecto	Solução com coloração ligeiramente amarelada			
Peso específico	-	g/dm ³	1680-1705	Por cálculo
Densidade a 20°C	Baumé	°Be	58,7-60,0	LAB/IT - SIS

Fonte: Conforme Fabricante

3.3 Ensaios no estado fresco

Foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco, incluindo o teste de mini-abatimento de Kantro (Kantro, 1980), viscosimetria cinemática utilizando o copo Ford, conforme adaptação das normas da ABNT NBR 5849 (2015), e a determinação da massa unitária, calculada pela equação $\gamma = m/v$. Adicionalmente, foi determinado o tempo de pega das misturas, conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 16607. Em seguida, os corpos de prova foram moldados para os ensaios de resistência.

Com base nos resultados do mini-slump e da massa específica aparente, foi possível estimar a tensão de escoamento por meio da Equação 1. Essa propriedade representa a tensão de cisalhamento mínima necessária para iniciar o escoamento de materiais com comportamento não-Newtoniano, como os que se aproximam do modelo de fluido de Bingham. Segundo Roussel e Coussot (2005) e Tan, Bernal e Provis (2017), esse procedimento é recomendado para a avaliação reológica de materiais álcali ativados (MAA).

$$\tau_0 = \frac{225\rho g\Omega^2}{128}\pi^2 R^5 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde, τ_0 : tensão de escoamento (Pa); ρ = massa específica aparente (kg/m^3); g : aceleração da gravidade (9.81 m/s^2); Ω : volume do mini-slump (m^3); R : raio de espalhamento (m).

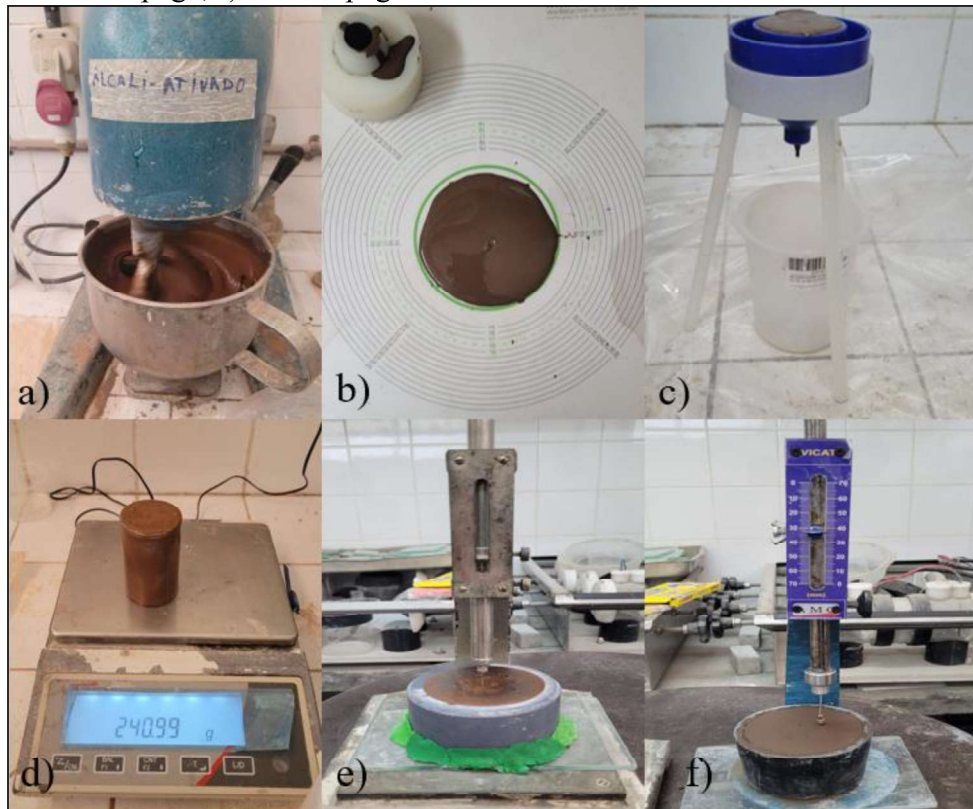
Através dos resultados do tempo de escoamento do funil copo Ford, foi realizado o cálculo da viscosidade cinemática baseado na Equação de Poiseulle para o viscosímetro utilizado, apresentado na equação 2:

$$\nu = 12,1 \cdot t + 24,2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde, ν : viscosidade cinemática (cSt); t : tempo (s).

A Figura 13 apresenta os ensaios realizados no estado fresco mencionados.

Figura 13 – Ensaio no estado fresco. a) Produção da mistura em argamassadeira; b) Mini-Slump; c) Funil Copo Ford; d) Massa unitária; e) Início de pega; f) Fim de pega



Fonte: Autor, 2026

3.4 Soluções de ataque químico

3.4.1 Ataque ácido (H_2SO_4)

O ataque químico foi realizado utilizando uma solução de ácido sulfúrico a 5% (massa/volume). Para sua preparação, foram pesados cuidadosamente 50 g de H_2SO_4 grau reagente, os quais foram adicionados lentamente a um béquer de vidro contendo cerca de 500 ml de água destilada. A adição do ácido foi feita gota a gota, sob agitação suave e contínua, com o objetivo de controlar a reação exotérmica e assegurar a completa dissolução do reagente.

Após o resfriamento da mistura até atingir a temperatura ambiente, o conteúdo foi transferido para um balão volumétrico de 1 litro. Em seguida, completou-se o volume com água destilada até a marca de calibração. O balão foi invertido diversas vezes para garantir a homogeneização da solução antes de sua utilização nos ensaios de ataque ácido.

A concentração de 5% foi selecionada com base em estudos prévios sobre a durabilidade de concretos álcali-ativados expostos ao ácido sulfúrico (Qureshi *et al.*, 2025; Ný e Bilenler Altundal, 2023; Khan *et al.*, 2024).

3.4.2 Ataque de sulfato (MgSO_4)

O ensaio de ataque por sulfato foi realizado utilizando uma solução de sulfato de magnésio anidro a 10% (massa/volume). Para sua preparação, foram pesados com precisão 100 g de MgSO_4 anidro grau reagente, os quais foram transferidos para um béquer de vidro. Em seguida, adicionou-se aproximadamente 500 ml de água destilada sob agitação suave, visando facilitar a dissolução completa do sal e evitar elevações localizadas de temperatura.

Após o resfriamento da solução até a temperatura ambiente, ela foi transferida para um balão volumétrico de 1 litro e completada com água destilada até a marca de calibração. O balão foi invertido repetidamente para assegurar a homogeneização da solução antes da imersão das amostras.

A escolha da concentração de 10% e do uso de MgSO_4 anidro segue protocolos estabelecidos para ensaios de ataque externo por sulfato em sistemas álcali-ativados (Jagadisha *et al.*, 2024; Kanaan *et al.*, 2023; Allahvedi e Hashemi, 2015).

3.4.3 Ataque de cloreto (NaCl)

O ensaio de ataque com cloreto foi realizado utilizando uma solução de cloreto de sódio (NaCl) grau reagente a 3% (massa/volume), preparada seguindo o mesmo procedimento adotado para a solução de sulfato de magnésio anidro. A preparação envolveu a dissolução cuidadosa do NaCl em água destilada, com controle da temperatura e homogeneização adequada antes da aplicação nos testes.

A escolha da concentração de 3% e do uso de NaCl grau reagente foi baseada em estudos de durabilidade conduzidos em ambientes marinhos e em condições de exposição ao cloreto (Wardhono *et al.*, 2023; Udhaya Kumar *et al.*, 2024; Azar *et al.*, 2024).

3.4.4 Ataque por água do mar natural

O ensaio de ataque com água do mar (H₂O_M) foi realizado utilizando amostras naturais coletadas semanalmente na faixa litorânea da Beira Mar de Fortaleza, considerada um ambiente atmosférico agressivo. As amostras foram substituídas a cada semana para garantir a representatividade contínua do meio agressivo. Essa abordagem visa simular as condições reais de exposição de materiais cimentícios em ambientes marinhos, marcados pela ação combinada de íons cloreto, sulfato, magnésio, cálcio e compostos orgânicos, sendo especialmente relevante para aplicações em estruturas costeiras e submersas (SILVA *et al.*, 2023; LIMA *et al.*, 2024).

A caracterização química e física da água do mar foi realizada antes do início das imersões, conforme a Tabela 10. Após o período de exposição, a mistura que apresentou os maiores danos em decorrência da imersão foi selecionada para análise complementar da água utilizada em seu ensaio. Essa análise físico-química foi conduzida pela empresa Tecnoplus, sediada em Fortaleza, tanto antes quanto após a imersão, com o objetivo de identificar possíveis alterações na composição do meio agressivo resultantes da interação com o material alcali-ativado.

Tabela 10 – Análise química e física da água do mar natural

Análise	Água do Mar Natural	Referência
Cloreto	24242 mg /L	SMEWW - 3120 B
Cloro Residual Livre	0,10 mg/L	Fotômetro - Adaptação do método 330.5 da USEPA
Condutividade	56900,0 uS/cm	SMEWW - 2510 A e B

Co Aparente	29 uH	SMEWW - 2120 C
Dureza Total	8044,8 mg/L	SMEWW - 2340 C
Ferro Total	1,660 mg/L	SMEWW 3125 B
Nitrato	1 mg/L	SMEWW - 4500 NO3 - A
Nitrito	< 0,02 mg/L	SMEWW - 4500 NO2 - B
pH	8,06	SMEWW - 4500 B
Sólidos Totais Dissolvidos	50641 mg/L	SMEWW - 2540 C e F
Soma das razões nitrito e nitrato	0,1	Art. 39 da Portaria 888 (05/2021)
Sulfato	2850 mg/L	SMEWW - 4500 F C
Temperatura	27 °C	SMEWW - 2550 B
Turbidez	26,2 NTU	SMEWW 2130 B

Fonte: Autor, 2026

3.5 Testes no estado endurecido

3.5.1 Resistência à compressão

Para as misturas curadas em ambiente natural e desenvolvidas na Universidade Federal do Ceará (UFC), o ensaio foi executado com uma velocidade de aplicação de carga de (2400 ± 200) N/s, utilizando a Máquina Universal de Ensaio, modelo DL 30000, da marca EMIC, com capacidade de 300 kN. A idade de análise foi realizada aos 7, 28, 56 e 90 dias. Para as amostras desenvolvidas na Universidade da Beira Interior (UBI), os rompimentos ocorreram em uma máquina de compressão ELE International, modelo ADR Touch 3000BS EN, equipada com leitura digital e placas autocentrantes, operada a uma taxa de carga constante de 0,5 kN/s. A idade de análise foi realizada aos 7 e 28 dias. Para ambos os casos, foram utilizados três CPS para obter a resistência média à compressão de cada amostra.

3.5.2 Perda de massa

A perda de massa dos corpos de prova (CPs) foi monitorada semanalmente, por meio da pesagem da massa seca dos cubos após o ciclo de exposição (composto por 6 dias de imersão e 1 dia de secagem em ambiente natural), procedimento adaptado de Nasrollahzadeh e Rostami (2025), conforme apresentado na Figura 14. Os CPs são pesados em balança de precisão ($\pm 0,01$ g) e posteriormente reinseridos em suas respectivas soluções. A variação de massa (%) foi calculada com base na massa inicial após 28 dias de cura, permitindo a obtenção

de um perfil temporal da degradação por dissolução ou lixiviação sob exposição a H_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl e água do mar.

Figura 14 – Ciclo de exposição nas soluções agressivas



Fonte: Autor, 2026

3.5.3 Análise visual

Ao final de cada ciclo, os corpos de prova foram levemente secos e examinados quanto à descoloração, corrosão superficial, microfissuras e escamação. Fotografias padronizadas são tiradas em dois momentos: imediatamente após a imersão (6 dias) e após o período de secagem (24 horas), permitindo documentar a progressão da degradação sob ação de H_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl e água do mar.

3.6 Microestrutura

Todos os ensaios microestruturais foram realizados na Universidade da Beira Interior (UBI), Covilhã, Portugal.

3.6.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Após 28 dias de imersão, os espécimes foram analisados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando o espectrômetro Shimadzu IR-Prestige-21, com resolução de 4 cm^{-1} e alcance mínimo de 400 cm^{-1} . Essa técnica foi empregada

para investigar as bandas estruturais características dos materiais. Os dados brutos obtidos foram processados para gerar espectros de absorbância, permitindo a identificação dos grupos funcionais presentes nos ligantes ativados por álcali sintetizados. Além disso, a análise possibilitou avaliar as alterações químicas provocadas por processos de degradação e mostrar modificações na microestrutura dos materiais. Todo o procedimento seguiu a metodologia descrita por Al-Sodani *et al.* (2022).

3.6.2 Análise termogravimétrica (TG)

Após 28 dias de imersão, os materiais foram analisados por termogravimetria (TG), técnica que mede a variação de massa da amostra conforme a temperatura aumenta. Foi usado o equipamento Shimadzu DTG-60H, aquecendo amostras de 5 a 10 mg de 25 °C até 1000 °C, a uma taxa de 10 °C por minuto, em atmosfera de nitrogênio (50 ml/min). O sistema de medição garante precisão e estabilidade térmica. Essa análise foi essencial para entender como os ligantes álcali-ativados reagem ao ataque químico, permitindo identificar a decomposição de fases e a perda de água ligada, além de avaliar a degradação da microestrutura quando expostos a ácidos, sulfatos, cloretos e água do mar, conforme a metodologia de Mabroum *et al.* (2024).

3.6.3 Porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP)

Para a realização dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), foram selecionadas duas misturas representativas: 3R7P46, por apresentar as maiores resistências à compressão, e 7R3P64, por apresentar as menores resistências à compressão. Essas misturas foram avaliadas em todas as condições de exposição (REF, H₂SO₄, MgSO₄, NaCl e água do mar), sendo previamente curadas em ambiente natural antes das imersões.

Adicionalmente, foram analisadas as misturas submetidas à cura em câmara de carbonatação e posteriormente expostas às soluções agressivas. Nesses casos, o MIP foi realizado para as amostras de referência (sem imersão) e para aquelas imersas em solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄), tanto para a mistura 3R7P46 quanto para a 7R3P46. A escolha do H₂SO₄ como solução agressiva para esta etapa se justifica por ser um dos meios mais severos de degradação química, capaz de promover alterações significativas na microestrutura das pastas álcali-ativadas.

Os dados de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) foram obtidos registrando-se o volume de mercúrio que penetrou na amostra porosa em função da pressão

aplicada. Essa medição permitiu avaliar diferenças na estrutura dos poros, considerando parâmetros como porosidade total, tamanho e distribuição dos poros.

As análises foram realizadas utilizando um porosímetro AutoPore IV 9500 (Micromeritics, Norcross, Geórgia, EUA), operando com pressões entre aproximadamente 3,45 kPa e 2,34 GPa, o que permite a caracterização de poros com diâmetros variando de 5 nm a 345 μm . Para os ensaios, foi adotada uma tensão superficial do mercúrio de 480 mN/m, com ângulos de contato mercúrio-sólido definidos em 130° para a intrusão e 104° para a extrusão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios no estado fresco

Os resultados dos ensaios no estado fresco estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Mini-slump Test, Viscosidade no Funil copo Ford e Massa Unitária das pastas

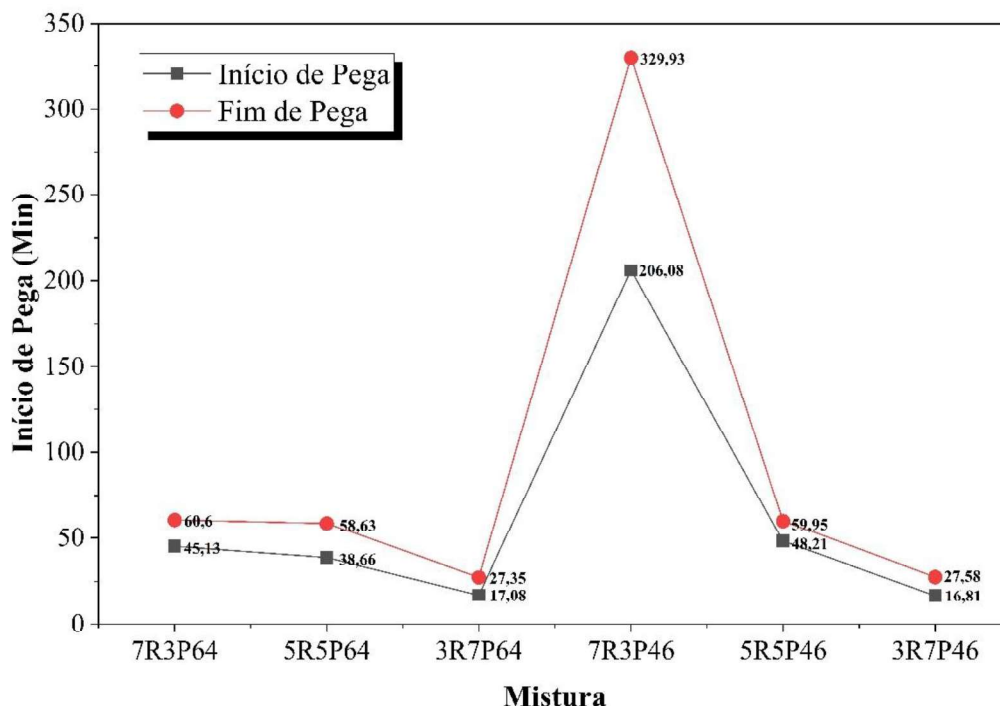
Mistura	Massa específica aparente (g/cm ³)	Espalhamento médio do mini-slump (cm)	Tensão de escoamento (Pa)	Viscosidade cinemática (cSt)
7R3P64	2,003	10,13	16,07	8893,50
5R5P64	2,021	11,00	10,69	9147,60
3R7P64	2,034	10,67	12,94	2214,30
7R3P46	2,049	7,70	64,46	-
5R5P46	2,054	8,87	29,10	-
3R7P46	2,058	9,03	29,35	-

Fonte: Autor, 2026

As pastas álcali-ativadas apresentaram variações significativas no estado fresco conforme a proporção entre os precursores (RCV/PAN) e ativadores (NaOH/Na₂SiO₃). A massa específica aumentou com o teor de escória de panela, reflexo da maior massa específica, como visto no tópico 4.2.1. Misturas com maior proporção de NaOH (60/40) mostraram melhor fluidez, com maiores valores de espalhamento e menores tensões de escoamento. Já aquelas com mais Na₂SiO₃ (40/60) apresentaram comportamento mais viscoso, o que impediu o escoamento pelo funil copo Ford durante o ensaio. Por esse motivo, não foi possível determinar a viscosidade cinemática dessas formulações, resultando na ausência desses valores na Tabela 10. Conforme Zhang, Jia e Liu (2022), se o teor de silicato de sódio for ligeiramente aumentado na mistura, a concentração de OH⁻ será suficiente para erodir o precursor, enquanto, se o teor de silicato de sódio continuar a aumentar, o excesso de OH⁻ formará Ca(OH)₂ com Ca²⁺, inibindo o aumento da fluidez.

A presença de silicatos nos cimentos álcali-ativados reduz a trabalhabilidade em comparação aos compósitos de cimento Portland comum (CPC), pois sua incorporação aumenta a viscosidade da mistura e, consequentemente, diminui a fluidez da pasta, com reduções típicas de 30–50% na trabalhabilidade em relação ao Portland (Gaibor *et al.*, 2023). Na Figura 15 estão dispostos os resultados do tempo de pega das misturas. Os resultados revelam diferenças marcantes entre as misturas, evidenciando o impacto da composição do ativador alcalino e da proporção entre RCV e PAN na reatividade inicial das pastas.

Figura 15 – Tempo de pega



Fonte: Autor, 2026

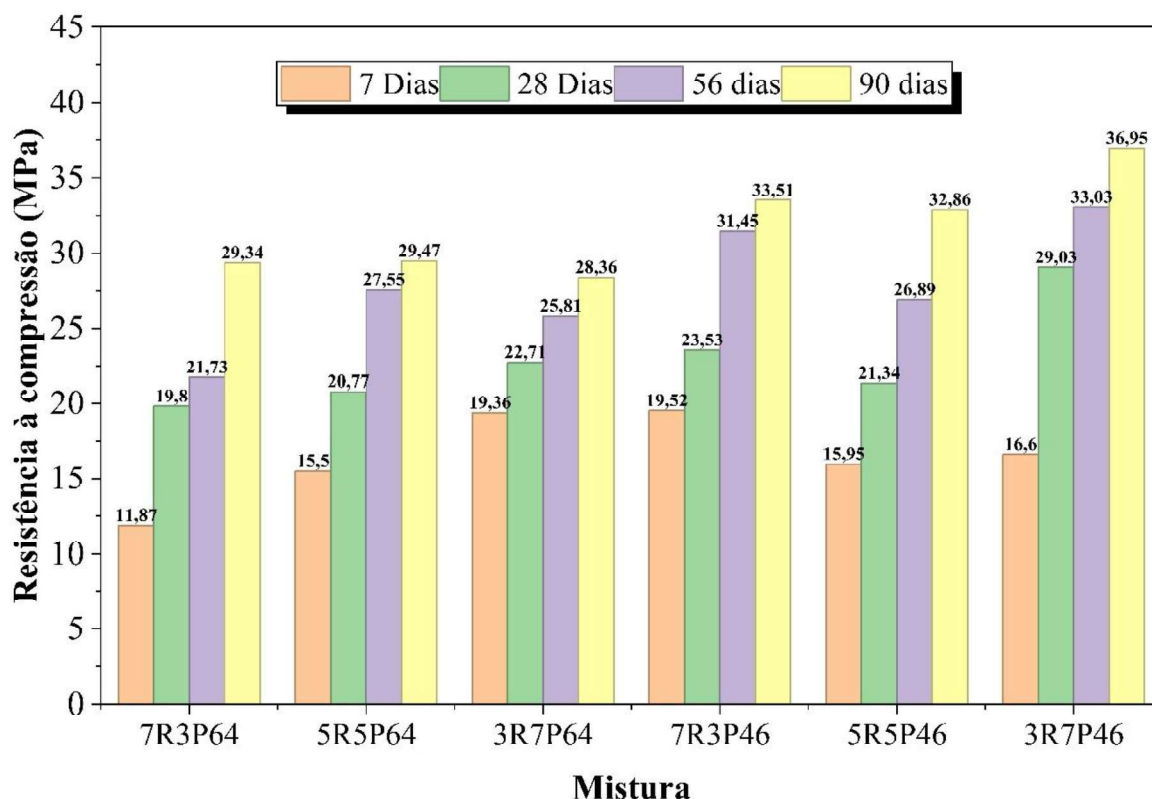
A mistura 7R3P46 apresentou os maiores tempos de início e fim de pega (206,08 min e 329,93 min, respectivamente). Em contraste, as misturas 3R7P64 e 3R7P46, com maior teor de PAN, exibiram os menores tempos de pega, com início em torno de 17 minutos e fim próximo a 27 minutos. As demais misturas apresentaram tempos intermediários, com destaque para 5R5P64 e 5R5P46, que mantiveram tempos de início entre 38 e 48 minutos. Esses resultados estão de acordo com Dong *et al.* (2023), que constataram a perda de fluidez e a redução do tempo de pega com o aumento do teor de escórias em compósitos álcali-ativado. Com o aumento da proporção de escória, o CaO ativo no sistema aumenta significativamente, o que leva a um aumento dos íons Ca^{2+} que podem participar de uma reação de álcali-ativação, acelerando a taxa de reação de hidratação e encurtando o tempo de pega (Nedunuri; Muhammad, 2021).

4.2 Ensaios no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão

Na Figura 16 são apresentados os resultados da resistência à compressão das misturas de referência (sem imersão) após 7, 28, 56 e 90 dias de cura ambiente.

Figura 16 – Resistência à compressão das misturas de referência



Fonte: Autor, 2026

Os resultados mostraram que todas as formulações apresentaram evolução significativa ao longo do tempo de cura, com aumentos consistentes entre 7 e 90 dias. Observa-se que as misturas com maior proporção de escória panela (PAN), especialmente a 3R7P46, alcançaram os melhores desempenhos, atingindo 36,95 MPa aos 90 dias. Em contrapartida, as misturas com maior teor de resíduo de cerâmica vermelha (RCV), como a 7R3P64, apresentaram os menores valores de resistência, com 29,34 MPa no mesmo período. Isso ocorre principalmente porque a reatividade da PAN é muito maior do que a do RCV, e mais Si e Ca são liberados e o gel C-A-S-H é formado (Duxson *et al.*, 2007).

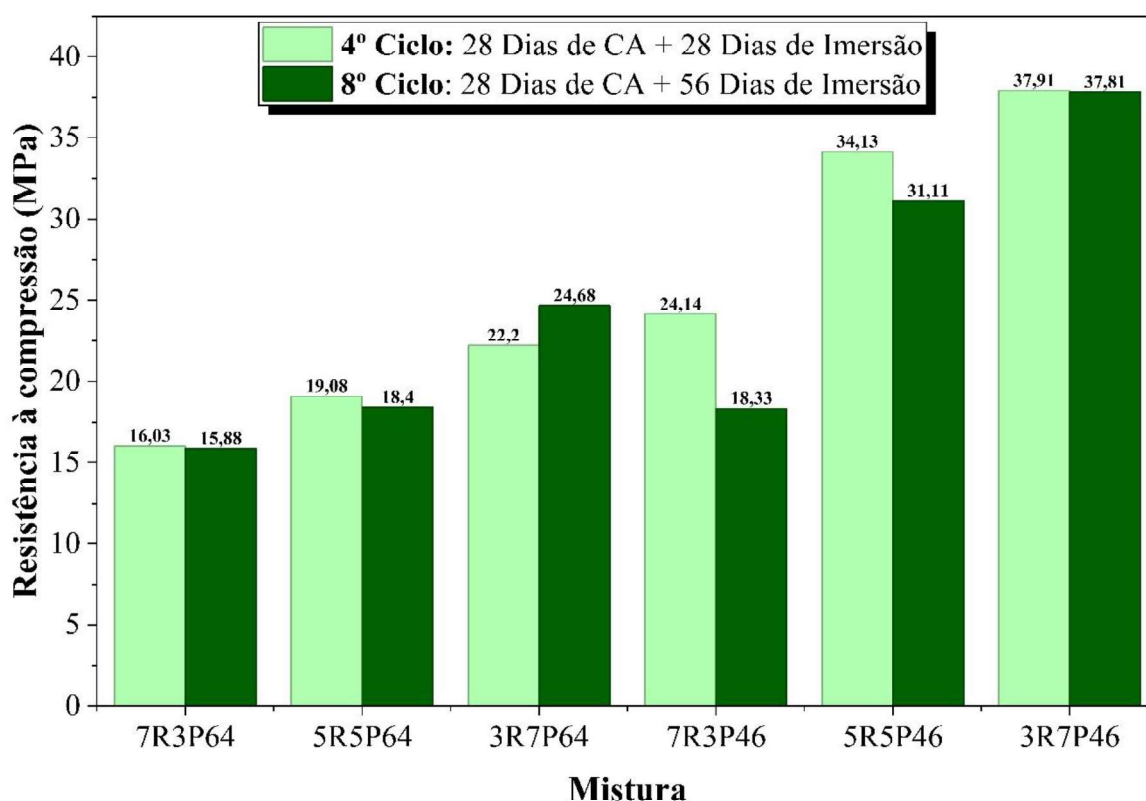
A composição do ativador alcalino teve impacto relevante, pois as misturas com maior teor de silicato de sódio (60%), mostraram desempenho superior em todas as idades de cura quando comparadas às suas equivalentes com 60% de hidróxido de sódio. Resultado semelhante foi observado por Dong *et al.* (2023), que verificaram que o uso de silicato de sódio como ativador promoveu maior resistência à compressão e melhor densificação da matriz em relação ao hidróxido de sódio.

Embora este estudo se concentre em formulações de pasta e não em concretos, vale ressaltar que a resistência à compressão de todas as misturas, com exceção da 7R3P64, estão

dentro da faixa de classes de resistência à compressão definidas na ABNT NBR 8953:2015 para concreto estrutural, como C20/25, que corresponde a 20 MPa em corpos de prova cilíndricos e 25 MPa em corpos de prova cúbicos aos 28 dias de cura. Essa comparação é fornecida para contextualizar o potencial mecânico da mistura quando considerado como aglomerante em futuras aplicações em escala de concreto.

A Figura 17 contém os resultados da resistência à compressão das misturas após os ciclos de imersão em H_2SO_4 .

Figura 17 – Resistência à compressão das misturas imersas em H_2SO_4



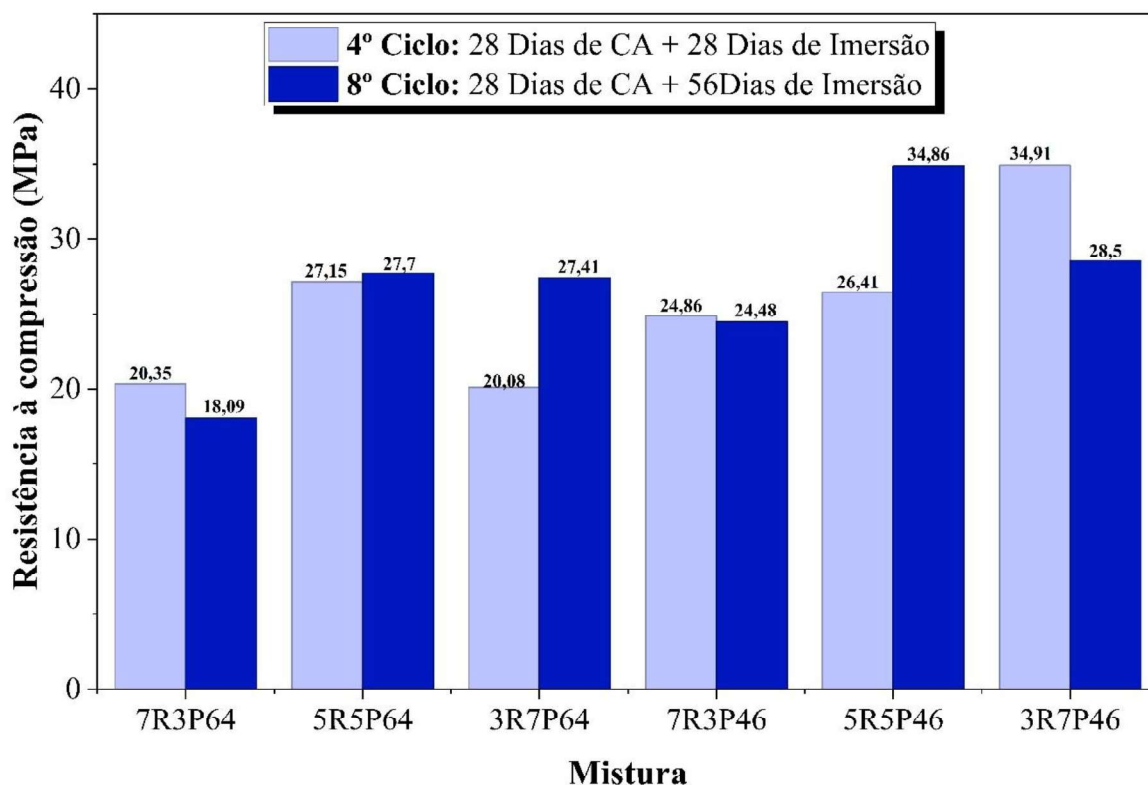
Fonte: Autor, 2026

Ao final do 4º ciclo, as amostras 7R3P64, 5R5P64, 3R7P64 e 7R3P46 obtiveram perdas de resistência de 26,23%, 30,74%, 13,98% e 23,24%, respectivamente, enquanto as amostras 5R5P46, 3R7P46 obtiveram ganhos de resistência de 26,92% e 14,77%, respectivamente, em relação as suas respectivas amostras curadas em temperatura ambiente sem degradação. Após 8 ciclos (56 dias), as amostras 3R7P64, 5R5P64 e 3R7P46 mantiveram a resistência, enquanto houve um aumento na amostra 3R7P46. E houve perda nas amostras 7R3P46 e 5R5P46. O ácido sulfúrico leva a uma redução severa da resistência porque a ação envolve tanto a lixiviação induzida por ácido quanto o ataque por sulfato (Alexander; Bertron; De Belie, 2013). A progressão da frente de ataque ácido causa uma perda de alcalinidade,

juntamente com um aumento na porosidade e permeabilidade dos compósitos, levando assim à perda de resistência (Beddoe; Dorner, 2005).

Na Figura 18 estão dispostos os resultados da resistência à compressão das misturas após os ciclos de imersão em MgSO_4 . Após 4 ciclos de imersão (28 dias), os valores variaram entre 20,08 MPa (3R7P64) e 34,91 MPa (3R7P46), com destaque para as misturas com maior teor de PAN e maior proporção de silicato de sódio, que demonstraram maior resistência inicial. Após 8 ciclos (56 dias), algumas misturas mantiveram ou ampliaram sua resistência, como 5R5P64 (27,7 MPa) e 3R7P64 (27,41 MPa), enquanto outras apresentaram leve redução, como 3R7P46 (28,5 MPa), embora ainda com desempenho elevado.

Figura 18 – Resistência à compressão das misturas imersas em MgSO_4



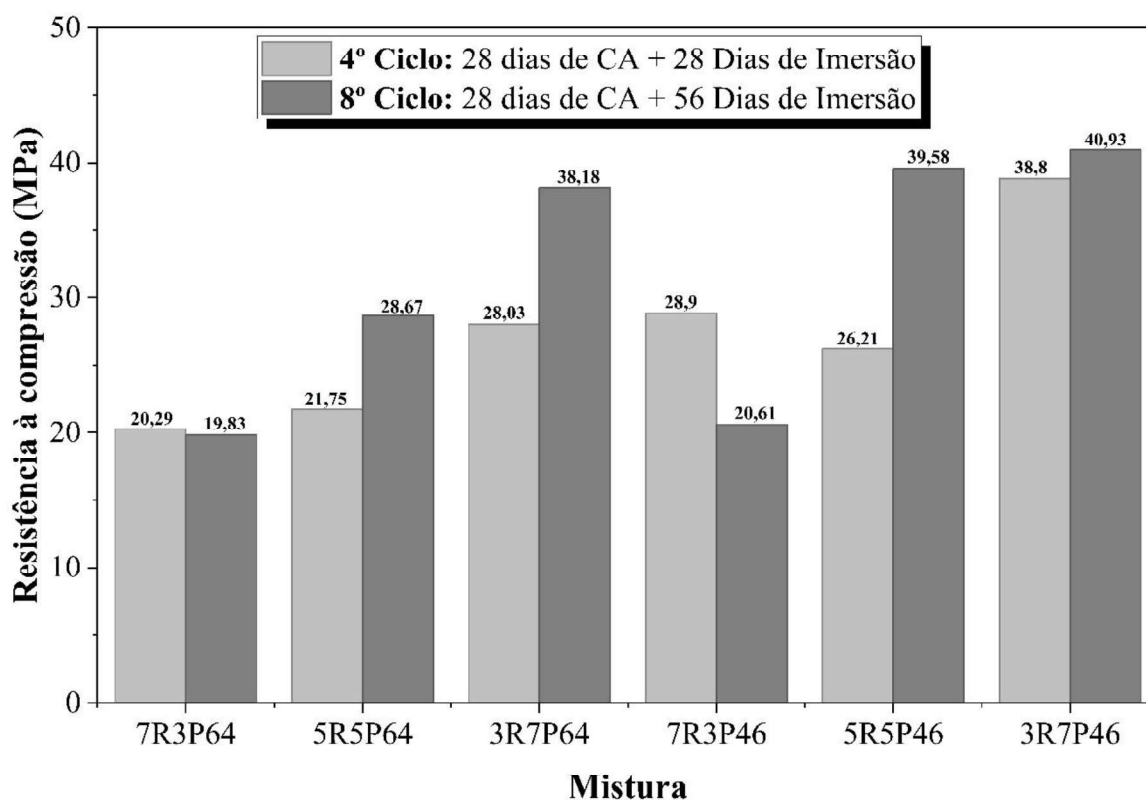
Fonte: Autor, 2026

Após a imersão dos CPs da mistura 5R5P46, houve um aumento da resistência à compressão aos 90 dias em relação aos corpos de prova de referência da mesma composição. Isso pode ser explicado pelo fato de que os precursores e os ativadores alcalinos, após a exposição à solução, mantêm sua estabilidade interna e continuam a endurecer, sem reagir aos efeitos externos. O mesmo ocorreu com as amostras de argamassas álcali-ativadas no estudo de Bijeljić *et al.* (2020), compostas por escória panela e cinza volante e ativadas com hidróxido de sódio e silicato de sódio, após submetidas em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) por 180

dias. Quando comparadas aos compósitos produzidos com cimento Portland, as matrizes álcali-ativadas 5R5P64, 3R7P64 e 555P46 apresentaram desempenho superior. Na pesquisa realizada por Bondar e Nanukuttan (2022), amostras compostas somente por escória de alto forno tiveram resistências inferiores à referência, porém, quando foi adicionada cinza volante de baixo cálcio, a resistência ultrapassou a da referência, após imersão em MgSO_4 . No estudo de Mohammed e Mohammed (2025), o compósito cimentício convencional perdeu cerca de 14% de sua resistência mecânica após 56 dias de imersão em solução de MgSO_4 , enquanto as formulações álcali-ativadas mantiveram maior estabilidade estrutural.

A Figura 19 contém os resultados da resistência à compressão das misturas após os ciclos de imersão em NaCl.

Figura 19 – Resistência à compressão das misturas imersas em NaCl



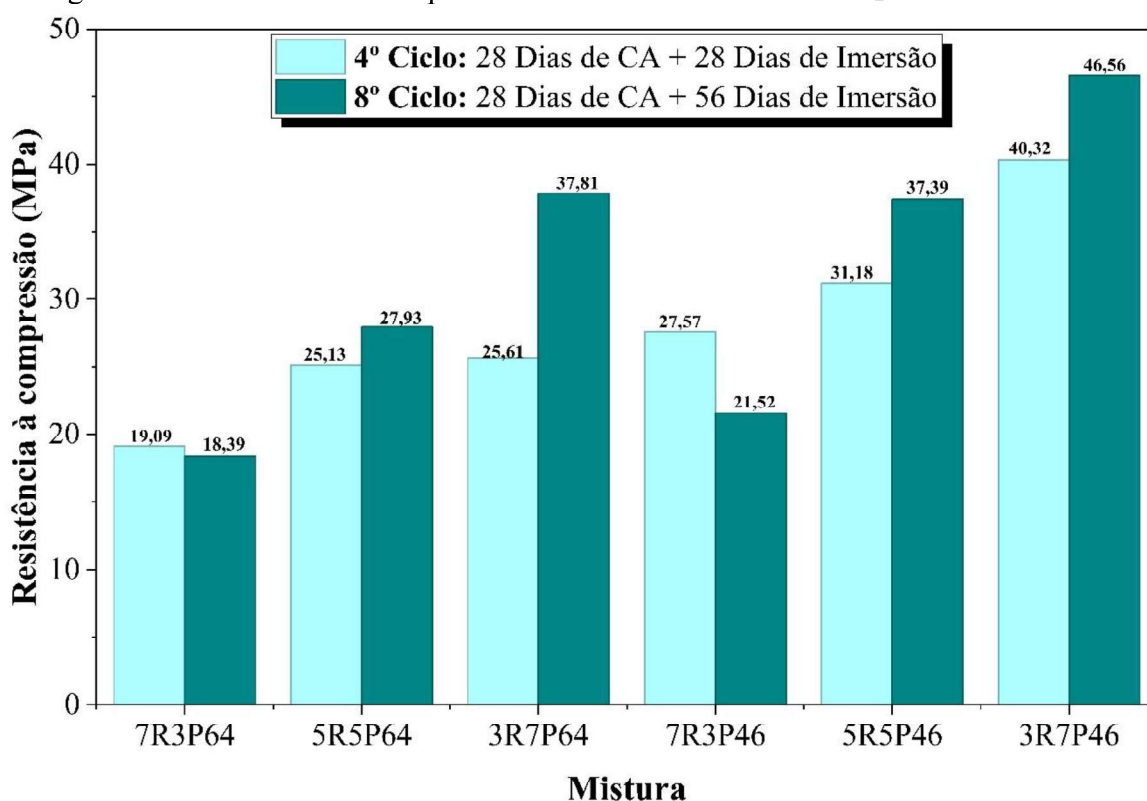
Fonte: Autor, 2026

Ao final do 4º ciclo, as amostras 7R3P64, 5R5P64, 7R3P46 e 5R5P46 obtiveram perdas de resistência de 6,62%, 21,05%, 8,10% e 2,52%, respectivamente, enquanto as amostras 3R7P64 e 3R7P46 obtiveram ganhos de resistência de 8,60% e 17,46%, respectivamente. As misturas com maior teor de PAN demonstraram melhor desempenho frente ao ataque de cloreto, em ambas as variações de ativadores. Após 8 ciclos (56 dias), observou-se aumento expressivo

em algumas formulações, como 5R5P64 (de 21,75 para 28,67 MPa) e 3R7P64 (de 28,03 para 38,18 MPa).

A mistura 3R7P46 manteve-se como a mais resistente, atingindo 40,93 MPa após 8 ciclos, com 10,77% a mais de resistência quando comparada com a sua mistura sem imersão. Esses resultados estão de acordo com o estudo de Bondar e Nanukuttan (2022), em que seu compósito com escória e cinza volante com baixo cálcio também ganharam resistência após ataque. A Figura 20 contém os resultados da resistência à compressão das misturas após os ciclos de imersão em H₂O.

Figura 20 – Resistência à compressão das misturas imersas em H₂O



Fonte: Autor, 2026

As misturas apresentaram as melhores resistências à compressão em relação aos demais ataques, com destaque para aquelas com maior teor de PAN e maior proporção de silicato de sódio. Após 4 ciclos de imersão (28 dias), os valores variaram de 19,09 MPa (7R3P64) a 40,32 MPa (3R7P46). Após 8 ciclos (56 dias), observou-se aumento expressivo em diversas formulações, como 3R7P64 (de 25,61 MPa aos 28 dias para 37,81 MPa aos 56 dias) e 5R5P46 (de 31,18 MPa aos 28 dias para 37,39 MPa aos 56 dias). A mistura 3R7P46 manteve-se como a mais resistente, atingindo 46,56 MPa após 8 ciclos. As misturas com maior teor de RCV, como

7R3P46, apresentaram queda de desempenho (de 27,57MPa aos 28 dias para 21,52 MPa aos 56 dias).

A análise da água após a imersão apresentada na Tabela 12 evidencia um aumento do pH de 8,06 para 9,12 após a imersão, indicando maior alcalinidade do meio. Esse ambiente favorece a continuidade das reações de polimerização nos materiais álcali-ativados, contribuindo para o ganho de resistência em misturas mais ricas em PAN e silicato de sódio. Além disso, o aumento da concentração de cloretos (de 24.242 para 26.465 mg/L) e da condutividade elétrica (de 56.900 para 58.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) revela a lixiviação de íons da matriz para a solução, fenômeno que pode comprometer a estabilidade estrutural em misturas com maior proporção de RCV. Outro aspecto relevante é a redução da dureza total (de 8.044 para 7.441 mg/L) e do ferro total (de 1,66 para 0,20 mg/L), sugerindo precipitação desses íons dentro da matriz. Esse processo está diretamente associado ao preenchimento de poros e à consequente melhoria da resistência mecânica, como observado na mistura 3R7P46, que atingiu 46,56 MPa após 8 ciclos. A diminuição da turbidez (de 26,2 para 12,2 NTU) e da cor aparente (de 29 para <5 uH) reforça essa interpretação, indicando que parte dos sais e partículas suspensas foi incorporada à matriz, reduzindo a porosidade.

Tabela 12 – Análise química e física da água do mar natural após imersão dos CPs

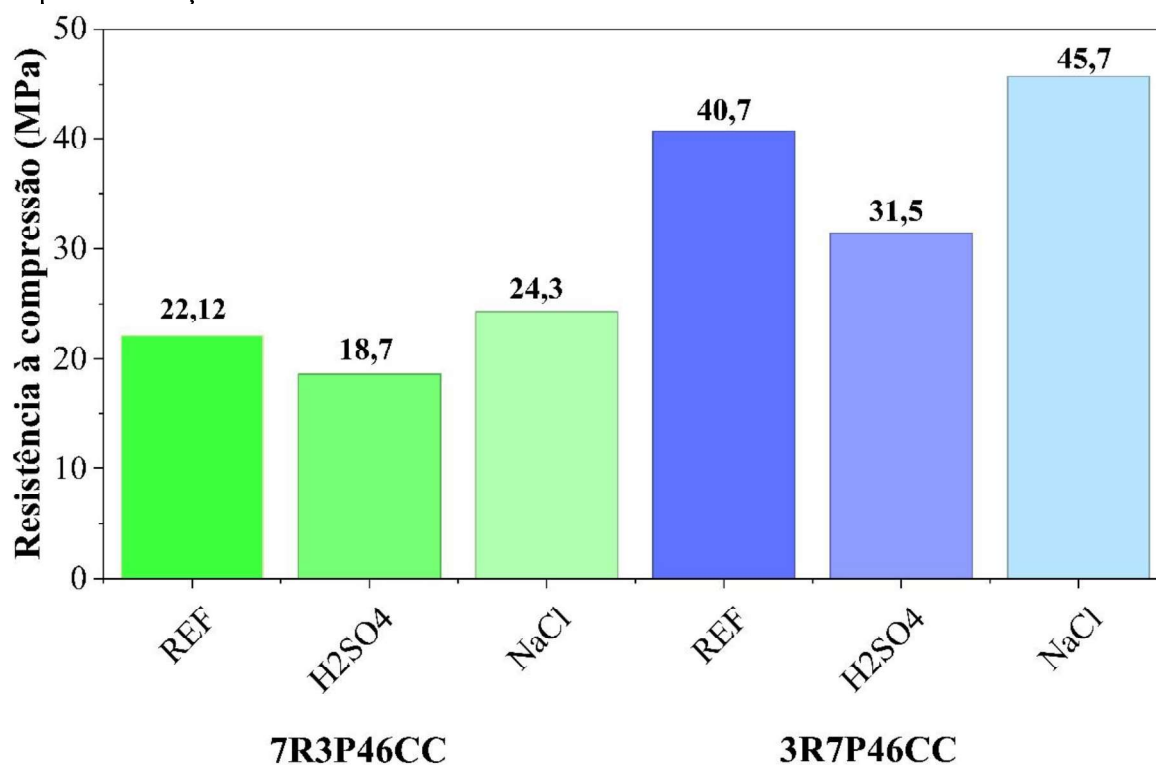
Análise	Água do Mar Natural após imersão dos CPs	Referência
Cloreto	26465 mg/L	SMEWW - 3120 B
Cloro Residual Livre	< 0,01 mg/L	Fotômetro - Adaptação do método 330.5 da USEPA
Condutividade	58300 uS/cm	SMEWW - 2510 A e B
Co Aparente	< 5 uH	SMEWW - 2120 C
Dureza Total	7441,44 mg/L	SMEWW - 2340 C
Ferro Total	0,20 mg/L	SMEWW 3125 B
Nitrato	2,4 mg/L	SMEWW - 4500 NO ₃ - A
Nitrito	< 0,02 mg/L	SMEWW - 4500 NO ₂ - B
pH	9,12	SMEWW - 4500 B
Sólidos Totais Dissolvidos	51798 mg/L	SMEWW - 2540 C e F
Soma das razões nitrito e nitrato	0,24	Art. 39 da Portaria 888 (05/2021)
Sulfato	3100 mg/L	SMEWW - 4500 F C
Temperatura	27 °C	SMEWW - 2550 B
Turbidez	12,2 NTU	SMEWW 2130 B

Fonte: Autor, 2026

Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores. No estudo de Rashad e Ouda (2021), a resistência à compressão de compósitos cimentícios com adição de cinza volante e metacaulim apresentaram uma diminuição na resistência após o ataque proveniente da água do mar do Mediterrâneo na região de Alexandria, Egito. E em outros estudos, houve um aumento da resistência, como no caso da pesquisa de (Wang *et al.*, 2022). O mecanismo descrito por Ganjian e Pouya (2005), de precipitação de sais no interior da matriz, explica o ganho temporário de resistência em algumas formulações. Já Mengasini, Mavroulidou e Gunn (2021) destacam que materiais álcali-ativados apresentam maior resistência inicial ao ataque da água do mar, corroborando os resultados obtidos neste estudo.

Os resultados das resistências das misturas após carbonatação acelerada e exposição ao ácido sulfúrico e cloreto de sódio, após 28 dias, encontram-se na Figura 21.

Figura 21 – Resistência à compressão das misturas 7R3P46CC e 3R7P46CC, aos 28 dias, após ataque em solução de ácido sulfúrico e cloreto de sódio



Fonte: Autor, 2026

Observa-se que a amostra 3R7P46CC apresentou desempenho superior em todas as condições, com destaque para o valor de 45,7 MPa após imersão em solução de NaCl, superando inclusive sua referência não imersa (REF), que registrou 40,7 MPa, assim como ocorreu com sua mistura sem carbonatação acelerada. Já a mistura 7R3P46CC mostrou menor resistência geral, com queda significativa após exposição ao H₂SO₄ (18,7 MPa), em comparação

à sua referência (22,12 MPa). Esses resultados sugerem que a composição 3R7P46CC possui maior estabilidade frente à agressividade química, especialmente ao cloreto de sódio, enquanto a 7R3P46CC demonstra maior vulnerabilidade, sobretudo ao ácido sulfúrico.

Em comparação aos valores de referência das misturas curadas em ambiente natural, a mistura 7R3P46CC apresentou um decréscimo de aproximadamente 6%, enquanto a amostra 3R7P46CC registrou um aumento de 40,2%. Esse acréscimo está relacionado à maior concentração de cálcio presente na mistura, que reage com o dióxido de carbono formando carbonatos estáveis, conforme o princípio fundamental da mineralização do CO₂ (Huijgen, Witkamp e Comans, 2005).

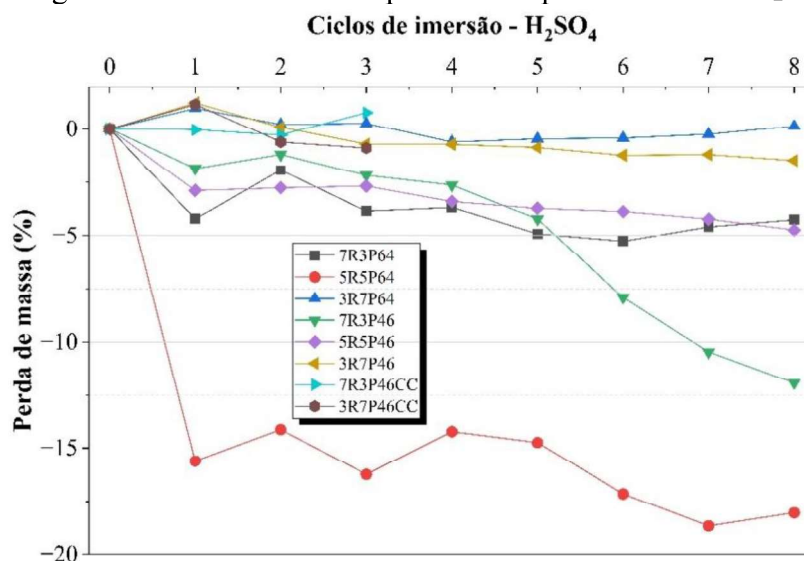
4.2.2 Perda de massa

Nas Figuras 22, 23, 24 e 25 podem ser vistos as variações percentuais das perdas de massa das misturas após os ciclos de imersão nas soluções de H₂SO₄ e NaCl, MgSO₄ e H₂OM respectivamente. As amostras 3R7P64, 3R7P46 e 3R7P46CC imersas em ácido sulfúrico, 3R7P46CC imersa cloreto de sódio, 3R7P64 e 3R7P46 imersas em sulfato de magnésio, apresentaram um aumento repentino na massa logo após o primeiro ciclo, indicando o comportamento de sorção da camada superficial, durante o qual as forças capilares atuam para equilibrar o teor de umidade e atingir o equilíbrio, seguida por uma fase estável durante a qual a variação de massa, quando presente, é mínima, como aconteceu semelhante no estudo de Bondar e Nanukuttan (2022).

Por outro lado, as amostras 5R5P64 e 7R3P46 imersas em H₂SO₄ apresentaram perdas de massa significativas ao longo dos ciclos, atingindo 18,03% e 11,93%, respectivamente, ao final do 8º ciclo (Fig. 22). A análise visual (Fig. 26 ‘c’ e ‘e’) evidencia o elevado nível de degradação: a amostra 7R3P46 mostra a formação de lâminas em suas faces, enquanto a 5R5P64 já apresenta essas lâminas destacadas e caídas. Esse comportamento foi confirmado pela redução na resistência à compressão. Entre 56 e 90 dias, a mistura 5R5P64 registrou uma queda de 3,56%, enquanto a 7R3P46 sofreu uma perda mais acentuada, de 24,06%, no mesmo intervalo.

Geralmente, a perda de massa de compósitos álcali-ativados em ambiente ácido pode ser atribuída à troca de cátions na estrutura por prótons e à deterioração física, resultando no desprendimento de alguns componentes da superfície da amostra (Bakharev, 2005).

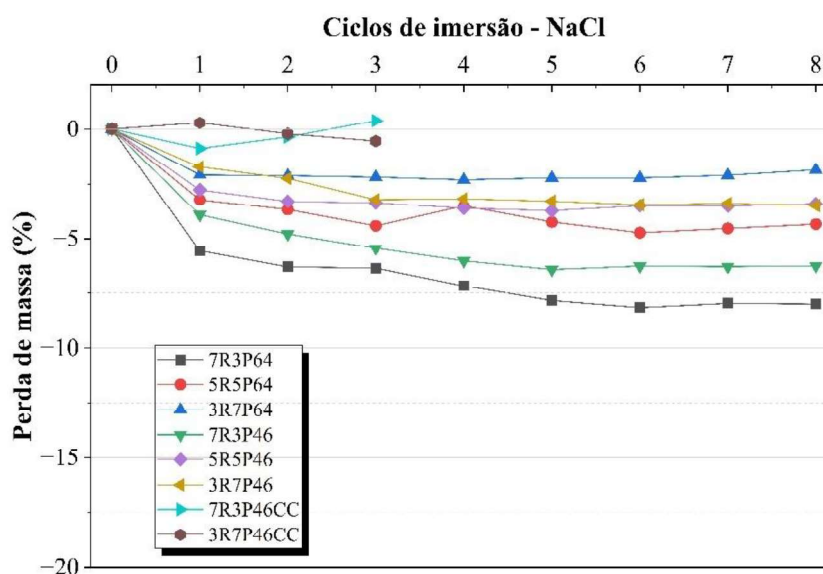
Figura 22 – Perda de massa percentual após imersão em H_2SO_4



Fonte: Autor, 2026

As amostras submetidas à solução de cloreto de sódio (Figura 23) apresentaram variações mínimas ao longo dos ciclos de exposição (inferiores a 5%). Entre elas, destacaram-se as amostras carbonatadas, que mantiveram maior estabilidade até o 3º ciclo, com a mistura 7R3P46CC registrando inclusive um ganho de massa em relação ao estado inicial. Esse intervalo é semelhante ao do estudo de Adediran *et al.*, (2022), em seus compósitos compostos por escória de fayalita. Por outro lado, as misturas 7R3P46 e 7R3P64 sofreram as maiores perdas, atingindo 6,24% e 8,00%, respectivamente, ao final do 8º ciclo.

Figura 23 – Perda de massa percentual após imersão em NaCl

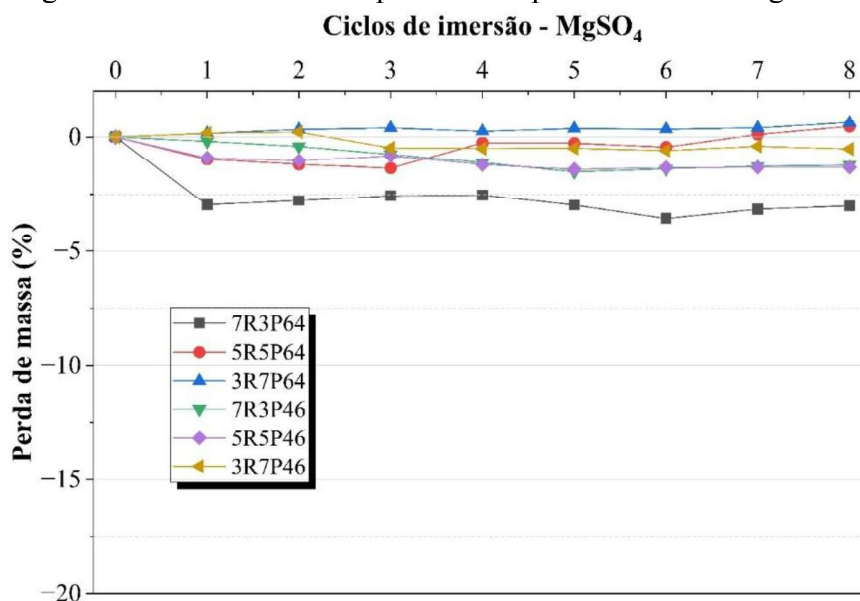


Fonte: Autor, 2026

Esses resultados evidenciam que composições com maior teor de resíduo cerâmico são mais suscetíveis ao ataque da solução de NaCl. Além disso, confirmam que a carbonatação acelerada na mistura 7R3P46CC contribuiu para reduzir essa vulnerabilidade, possivelmente em razão da reação entre o cloreto e o carbonato de cálcio formado durante a cura.

As amostras submetidas ao sulfato de magnésio (Figura 24) obtiveram a menor variação de massa em relação aos demais ataques. A precipitação ocorrida pode atuar bloqueando os poros e, portanto, permitindo menor entrada da solução (Gutberlet; Hilbig; Beddoe, 2015). As perdas de massa foram, em geral, menos acentuadas, com destaque negativo para a mistura 7R3P64, que apresentou a maior variação, atingindo $-3,573\%$ no sexto ciclo. Essas faixas de variação estão de acordo com o estudo de Bondar e Nanukuttan (2022), levando em consideração que suas amostras obtiveram uma variação de 1% a 2,8%, mas em solução que continha apenas 5% de concentração MgSO_4 .

Figura 24 – Perda de massa percentual após imersão em MgSO_4

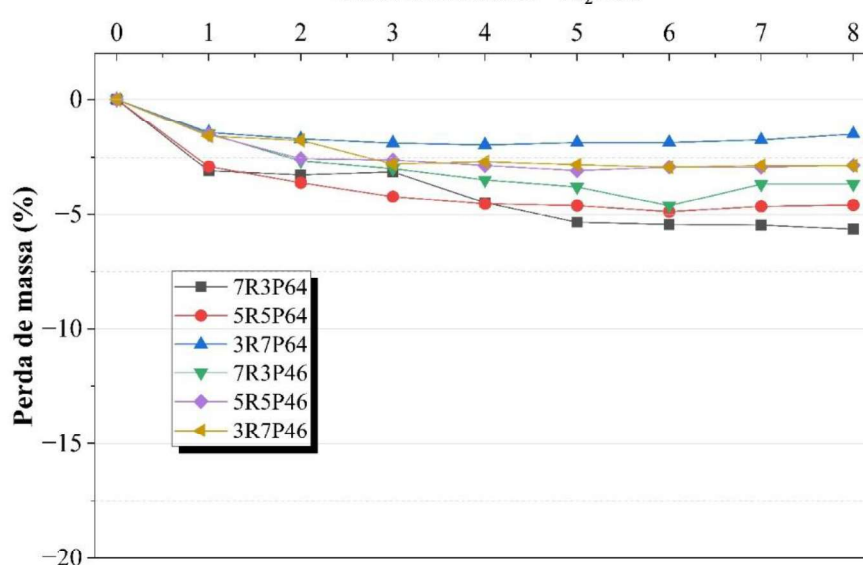


Fonte: Autor, 2026

No ambiente de água do mar, os efeitos foram mais agressivos, com todas as misturas apresentando perdas significativas, especialmente nos primeiros ciclos. A mistura 7R3P64 novamente se destacou negativamente, atingindo $-5,636\%$ no oitavo ciclo. As misturas com maior proporção de escória panela, como a 3R7P46, mantiveram desempenho mais estável, com perdas progressivas, mas menos acentuadas, encerrando o oitavo ciclo com $-2,866\%$. O ambiente salino da água do mar promoveu maior degradação das pastas com maior teor de resíduo de cerâmica vermelha (RCV). As misturas 3R7P64, 3R7P46 e 5R5P46 apresentaram

uma redução inicial de massa, seguida pela estabilização em valores constantes. Resultado semelhante foi observado no estudo de Zhang *et al.* (2022). Na revisão de Ting e Yi (2021), verificou-se que a perda de massa dos compósitos expostos à água do mar ocorre principalmente devido à cristalização de sais e ao desprendimento de detritos dos corpos de prova.

Figura 25 – Perda de massa percentual após imersão em H₂O



Fonte: Autor, 2026

4.2.3 Análise visual de degradação

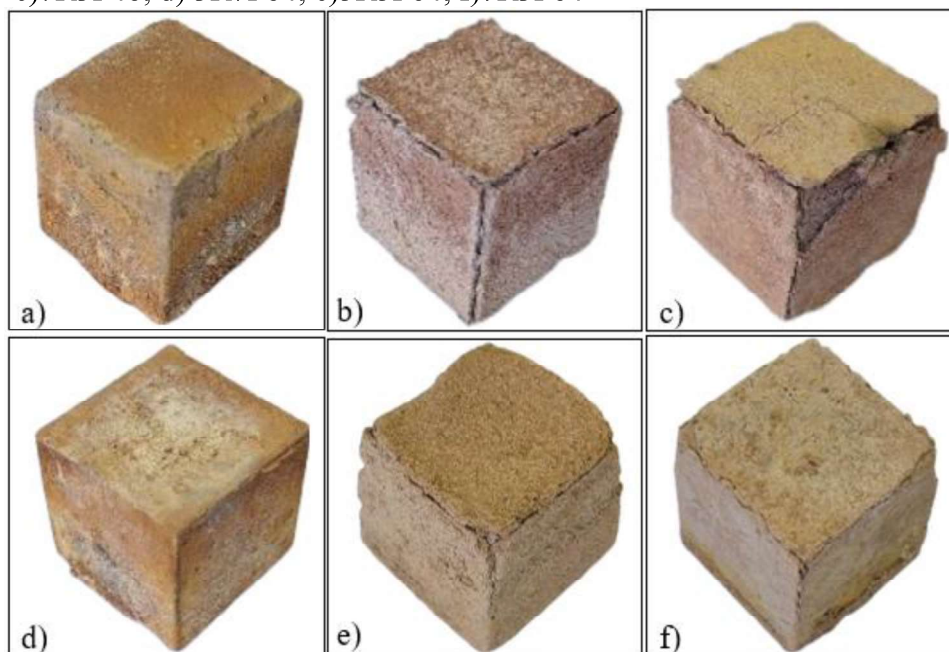
As figuras desta seção apresentam as misturas após a secagem em ambiente natural referente ao 4º ciclo de imersão (28 dias de cura ambiente + 28 ciclos de imersão, sendo cada ciclo composto por 6 dias de imersão completa da amostra e 1 dia de secagem ao ar). O relatório completo, contendo as imagens das misturas após cada ciclo de imersão e secagem, encontra-se disposto no Anexo A.

A Figura 26 apresenta o registro fotográfico das misturas após a exposição à solução de H₂SO₄. Após quatro ciclos de imersão em solução de ácido sulfúrico, um cristal amarelo-claro foi encontrado na superfície de todas as amostras. Com o aumento do tempo de exposição para 56 dias (8 ciclos de imersão), os cristais amarelo-claros se intensificaram e tornaram-se severas, com evidências visíveis de degradação nas amostras 5R5P46, 7R3P46, 5R5P64 e 7R3P64, apresentando uma rugosidade superficial mais grosseira nas suas superfícies. O aparecimento dos cristais amarelo-claros e da rugosidade superficial pode ser atribuído à reação entre os géis e o ácido sulfúrico (Adediran *et al.* 2022). Formação cristalina semelhante também

foi relatada para o geopolímero à base de cinzas vulcânicas (Djobo *et al.*, 2016) e rugosidade mais grosseira nas superfícies também se tornaram presentes no estudo de Chakkor (2025).

As misturas com maior teor de escória PAN demonstraram maior resistência ao ácido sulfúrico, tanto na formulação ativada com maior concentração de hidróxido de sódio quanto naquela com maior proporção de silicato de sódio. No estudo de Algaifi *et al.* (2021), observaram-se resultados distintos, em que a degradação visual do compósito contendo escória de alto-forno e pó de resíduo cerâmico foi mais evidente à medida que se reduziu o teor de escória e se aumentou a fração de pó cerâmico.

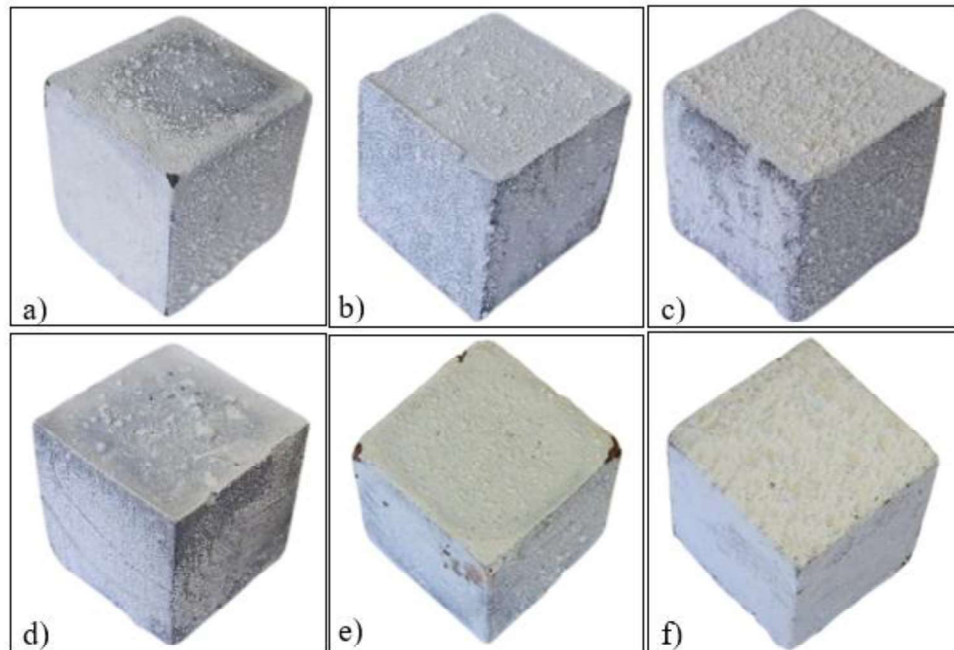
Figura 26 – Misturas após 4 ciclos de imersão em H_2SO_4 . a) 3R7P46; b) 5R5P46; c) 7R3P46; d) 3R7P64; e) 5R5P64; f) 7R3P64



Fonte: Autor, 2026

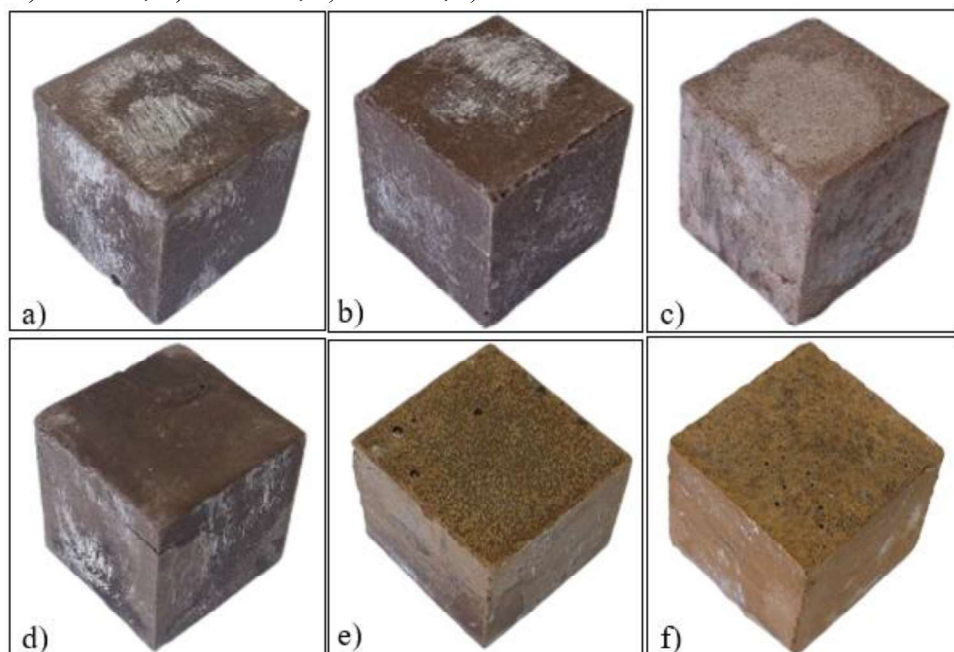
As Figuras 27, 28 e 29 contém o registro fotográfico das misturas após a exposição à solução de $MgSO_4$, $NaCl$ e água do mar (H_2O_{OM}), respectivamente. Após 28 e 56 dias de exposição às soluções, não foram observados danos significativos em todas as amostras, pois elas conservaram sua forma inicial. As amostras expostas a solução de sulfato de magnésio apresentaram principalmente precipitação branca na superfície, provavelmente sulfato de magnésio hidratado (Kwasny *et al.*, 2018). As amostras 3R7P46 e 5R5P64 apresentaram sinais visíveis de degradação nos cantos, também presente nas amostras de Bondar e Nanukuttan (2022).

Figura 27 – Misturas após 4 ciclos de imersão em MgSO_4 . a) 3R7P46; b) 5R5P46; c) 7R3P46; d) 3R7P64; e) 5R5P64; f) 7R3P64



Fonte: Autor, 2026

Figura 28 – Misturas após 4 ciclos de imersão em NaCl . a) 3R7P46; b) 5R5P46; c) 7R3P46; d) 3R7P64; e) 5R5P64; f) 7R3P64

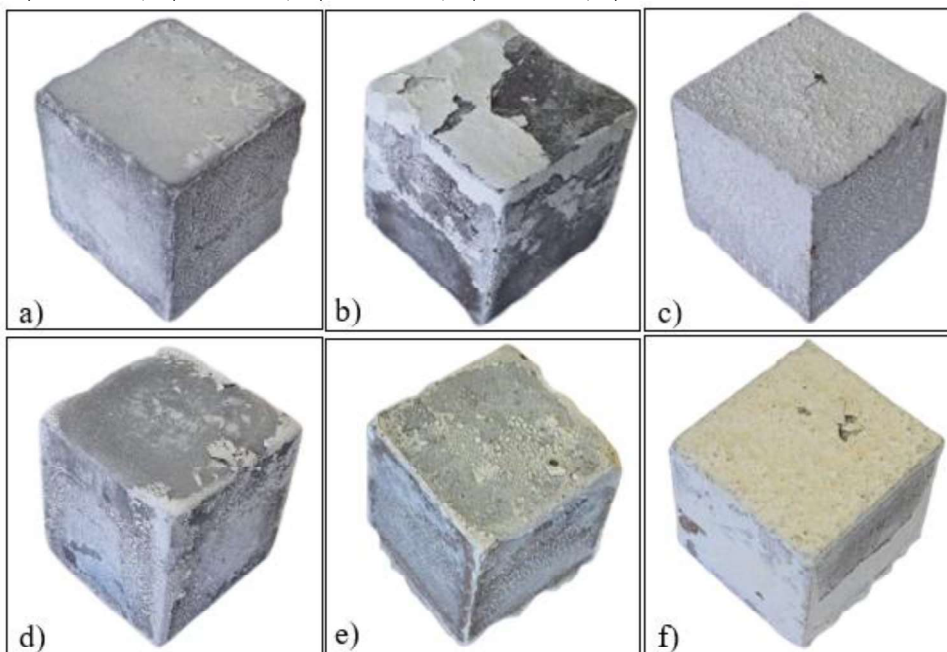


Fonte: Autor, 2026

Após 28 e 56 dias de exposição à solução de cloreto de sódio, não foram observados danos significativos em nenhuma das amostras, que mantiveram sua forma inicial. Resultado semelhante foi relatado por Adediran *et al.* (2022), em três formulações de argamassa álcali-ativada produzidas com escória panela, escória de fayalita e escória de alto-forno, imersas em solução de NaCl a 3% de concentração.

As amostras expostas a soluções de água do mar apresentaram a formação de uma camada de sal sobre a sua superfície, com maior intensidade nas amostras com maior teor de RCV (7R3P46 e 7R3P64). A alteração na coloração observada nas amostras após a imersão está diretamente relacionada à presença de sais dissolvidos na água do mar. Durante o processo de secagem natural em ambiente de laboratório, a umidade residual favoreceu a migração desses sais para a superfície, onde se depositaram de forma visível. Esse acúmulo superficial não apenas modificou o aspecto visual das amostras, mas também sugere a possibilidade de penetração dos sais no interior da matriz. Fenômenos semelhantes também foram observados por Sutter *et al.*, (2006) e Wang *et al.*, (2022), que destacaram a cristalização de sais como um dos principais mecanismos de alteração estética e estrutural em materiais expostos a ambientes marinhos.

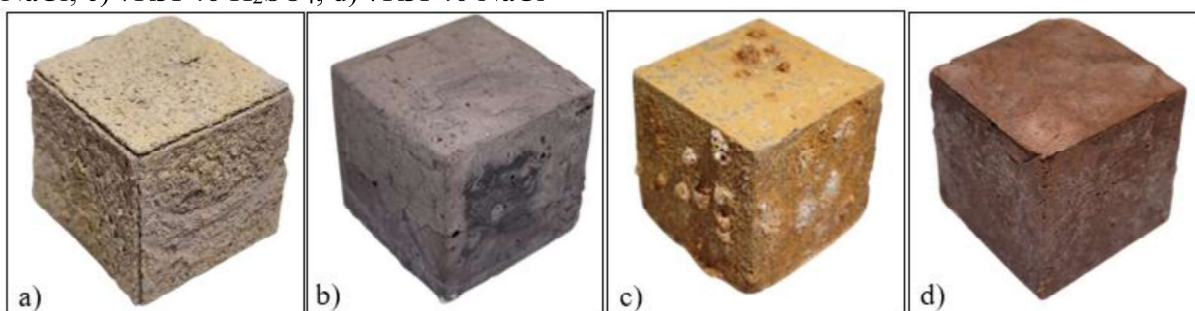
Figura 29 – Misturas após 4 ciclos de imersão em água do mar. a) 3R7P46; b) 5R5P46; c) 7R3P46; d) 3R7P64; e) 5R5P64; f) 7R3P64



Fonte: Autor, 2026

A Figura 30 apresenta a evolução visual da degradação das misturas após carbonatação acelerada e ciclos de imersão em H_2SO_4 e NaCl . A amostra 7R3P46 apresentou uma ligeira alteração de cor e depósitos de sal branco em sua superfície, provavelmente devido à formação de gesso (CaSO_4) resultante da reação entre o ácido sulfúrico e o carbonato de cálcio (Chakkor, 2025). A amostra 3R7P46 se mostrou semelhante as amostras curadas em ambiente, com sinais visíveis de deterioração nas bordas. As amostras após ataque de cloretos também teve resultado conforme as amostras sem carbonatação, sem sinais visíveis de degradação, conservando seu estado inicial. A amostra 3R7P46 exposta ao ácido sulfúrico apresentou uma tonalidade marrom-claro, uma descoloração possivelmente relacionada à precipitação de hidratos férricos fracamente ligados (Gutberlet; Hilbig; Beddoe, 2015).

Figura 30 – Misturas carbonatadas após 3 ciclos de imersão. a) 3R7P46 H_2SO_4 ; b) 3R7P46 NaCl ; c) 7R3P46 H_2SO_4 ; d) 7R3P46 NaCl



Fonte: Autor, 2026

4.3 Microestrutura

4.3.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de absorção por transformada de Fourier no infravermelho (FTIR) das amostras de referência são mostrados na Figura 31.

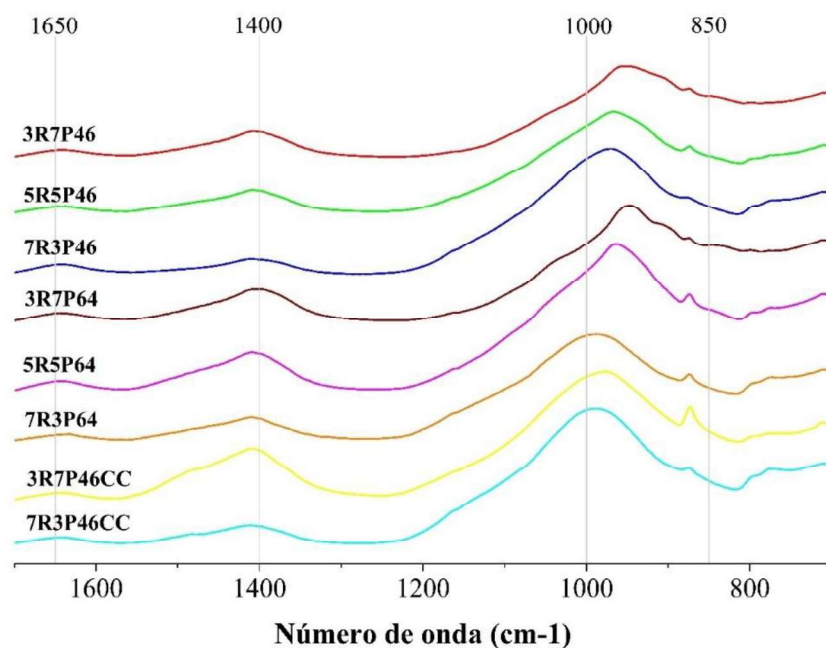
As bandas localizadas na região de $850\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas à presença de espécies de silicatos e aluminossilicatos dissolvidos, indicando que a reação de ativação alcalina está em andamento e que há liberação de Si e Al para a formação dos géis (Rees *et al.*, 2007). Além disso, a absorção próxima a 1000 cm^{-1} corresponde à vibração de estiramento assimétrico da ligação terminal Si–O do SiO_4 (não-ponte), característica dos produtos da reação, sendo considerada a assinatura espectral dos géis C-A-S-H/N-A-S-H formados na matriz (Ajala e Badarulzaman, 2016; Dong *et al.*, 2023; Gaibor *et al.*, 2023). Além disso, esses picos indicam

a formação de uma fase de gel de aluminossilicato amorfo devido à dissolução do RCV em condições altamente alcalinas (Van Jaarsveld, Van Deventer e Lukey, 2002).

Os picos observados em torno de 1400 cm^{-1} para todas as misturas representam a vibração de estiramento assimétrico da ligação O–C–O, associada à presença de íons carbonato (CO_3^{2-}), produzida devido à carbonatação atmosférica. Além do estiramento assimétrico, também ocorrem modos de flexão fora do plano do CO_3 , confirmando que essas bandas refletem a formação de carbonatos na matriz (Panias; Giannopoulou; Perraki, 2007; Huseien *et al.*, 2019).

Com relação à análise espectral FTIR para as misturas álcali-ativadas, a banda fraca em torno de 1650 cm^{-1} reflete o estiramento e a flexão de O–H, denotando a absorção de água associada aos géis hidratados desenvolvidos (Somna *et al.*, 2011).

Figura 31 – FTIR: Misturas de referência (sem imersão)



Fonte: Autor, 2026

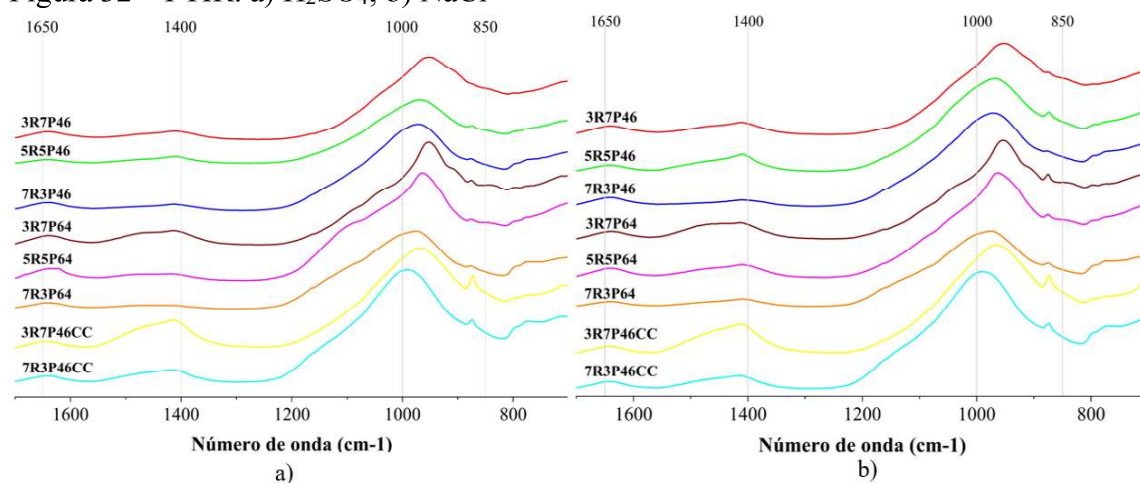
As Figura 32 contém os espectros FTIR das misturas após a exposição às soluções de H_2SO_4 e MgSO_4 e a Figura 33 após a exposição às soluções de NaCl e Água do mar (H_2OM).

Os resultados mostram que os diferentes meios de ataque provocaram alterações distintas na estrutura das misturas álcali-ativadas, com maior destaque para o ácido sulfúrico e o sulfato de magnésio. O H_2SO_4 promoveu degradação dos géis C-A-S-H/N-A-S-H, evidenciada pelo desaparecimento ou enfraquecimento da banda em $850\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ (total em 3R7P46 e parcial em 7R3P64) e deslocamentos expressivos do pico em $\sim 1000\text{ cm}^{-1}$, conforme apresentado na Tabela 12, além de intensificar a formação de carbonatos ($\sim 1400\text{ cm}^{-1}$). O

MgSO₄ também se mostrou bastante agressivo, causando deslocamentos ainda mais acentuados na banda principal ($\sim 977\text{ cm}^{-1}$) e favorecendo a precipitação de carbonatos secundários, que podem comprometer a estabilidade da matriz.

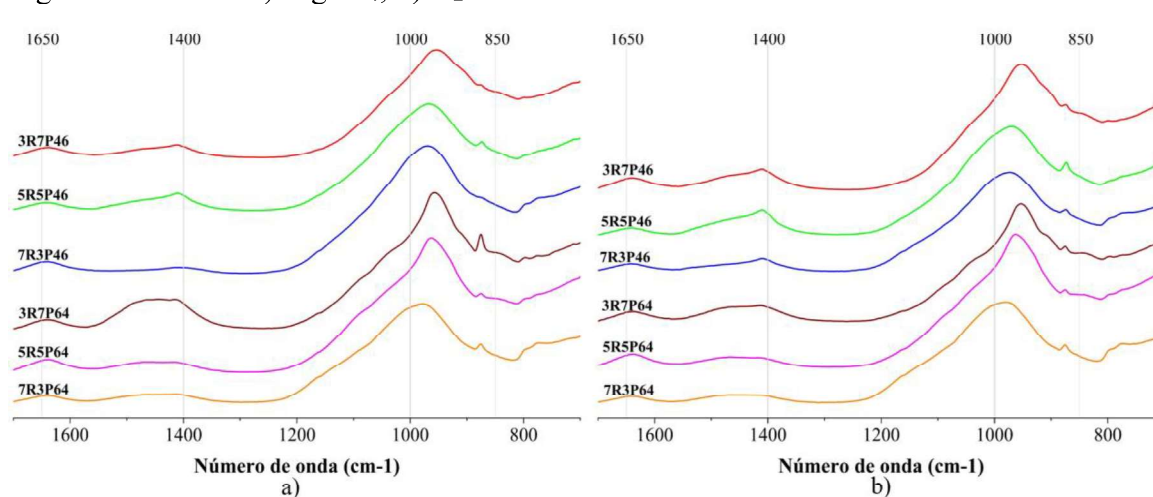
Já o NaCl apresentou efeito mais estável, com apenas pequenas reorganizações estruturais e carbonatação discreta, enquanto a água do mar mostrou comportamento intermediário, combinando deslocamentos relevantes na banda de $\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ com intensificação dos carbonatos ($\sim 1412\text{--}1420\text{ cm}^{-1}$), resultado da ação conjunta de múltiplos íons. Em todas as condições, a banda em $\sim 1650\text{ cm}^{-1}$ permaneceu presente, confirmando a retenção de água estrutural nos géis, embora com pequenas variações. Assim, o ataque ácido e o ataque por sulfato de magnésio foram os mais severos, enquanto NaCl e água do mar causaram alterações moderadas, mas ainda perceptíveis na estrutura das matrizes.

Figura 32 – FTIR. a) H₂SO₄; b) NaCl



Fonte: Autor, 2026

Figura 33 – FTIR. a) MgSO₄; b) H₂OM



Fonte: Autor, 2026

Os cinco gráficos revelam variações significativas na estrutura dos géis álcali-ativados conforme o meio de exposição (NaCl, H₂OM, H₂SO₄, MgSO₄) e a composição das misturas. Os espectros em meio NaCl mostram maior estabilidade, com bandas bem definidas e pouca alteração nas regiões de Si–O–T e CO₃²⁻. Em H₂OM, há maior alargamento das bandas e intensificação da absorção de água, refletida na faixa de O–H. Os ataques por H₂SO₄ e MgSO₄ provocam deslocamentos e redução de intensidade nas bandas principais, indicando degradação estrutural e formação de carbonatos.

A Tabela 13 reúne os valores de número de onda identificados nas principais faixas espectrais das misturas álcali-ativadas, destacando os deslocamentos dos picos nas condições de referência e após as exposições aos diferentes meios agressivos. As bandas foram organizadas de acordo com as regiões associadas aos silicatos e aluminossilicatos dissolvidos, a formação dos géis N-A-S-H e C-A-S-H, presença de carbonatos e água/gel hidratado, permitindo comparar a resposta espectral de cada formulação frente às diferentes condições de ataque químico.

Tabela 13 – Bandas espectrais FTIR das misturas álcali-ativadas após exposição aos diferentes meios

Mistura	Faixa espectral (cm ⁻¹)			
	850–1000	~1000	~1400	~1650
	Silicatos e aluminossilicatos dissolvidos	N-A-S-H / C-A-S-H	Carbonatos (CaCO ₃)	Água/géis hidratados
3R7P46 REF	874	952	1408	1640
3R7P46 H ₂ SO ₄	-	951	1411	1639
3R7P46 MgSO ₄	-	953	1411	1639
3R7P46 NaCl	874	951	1411	1641
3R7P46 H ₂ OM	874	952	1411	1641
5R5P46 REF	873	967	1408	1643
5R5P46 H ₂ SO ₄	874	968	1409	1637
5R5P46 MgSO ₄	873	968	1410	1637
5R5P46 NaCl	874	968	1410	1640
5R5P46 H ₂ OM	873	972	1410	1639
7R3P46 REF	876	970	1410	1639
7R3P46 H ₂ SO ₄	876	972	1412	1642
7R3P46 MgSO ₄	-	969	1407	1640
7R3P46 NaCl	876	971	1412	1639
7R3P46 H ₂ OM	874	972	1410	1642
3R7P64 REF	875	947	1404	1645
3R7P64 H ₂ SO ₄	875	953	1412	1640
3R7P64 MgSO ₄	875	957	1418	1641

3R7P64 NaCl	875	954	1413	1638
3R7P64 H ₂ OM	875	953	1413	1635
5R5P64 REF	874	965	1409	1647
5R5P64 H ₂ SO ₄	875	964	1419	1635
5R5P64 MgSO ₄	875	963	1417	1637
5R5P64 NaCl	875	963	1411	1642
5R5P64 H ₂ OM	875	963	1419	1635
7R3P64 REF	874	995	1410	1634
7R3P64 H ₂ SO ₄	876	975	-	1637
7R3P64 MgSO ₄	875	977	1413	1639
7R3P64 NaCl	875	975	1411	1640
7R3P64 H ₂ OM	875	979	1420	1641
3R7P46CC REF	873	981	1410	1644
3R7P46CC H ₂ SO ₄	873	968	1415	1646
3R7P46CC NaCl	873	966	1413	1647
7R3P46CC REF	876	997	1411	1646
7R3P46CC H ₂ SO ₄	874	991	1417	1642
7R3P46CC NaCl	874	990	1414	1642

Fonte: Autor, 2026

Observa-se que os espectros de FTIR da amostra 7R3P64 revelaram uma redução na intensidade da banda em torno de 990 cm⁻¹, caindo de 995 cm⁻¹ para 975 cm⁻¹, mas sem as bandas de absorção de sulfato pronunciadas tipicamente observadas em amostras ricas em cálcio, próximas a 1120 cm⁻¹, indicando degradação estrutural sem incorporação substancial de sulfato. Resultado semelhante ocorreu com as amostras de argamassas álcali-ativadas de Chakkor (2025). As outras amostras se mostraram mais estáveis em relação a esse intervalo. Esse resultado confirma a pior resistência mecânica da mistura após os ataques, em relação as demais.

4.3.2 Análise termogravimétrica (TG)

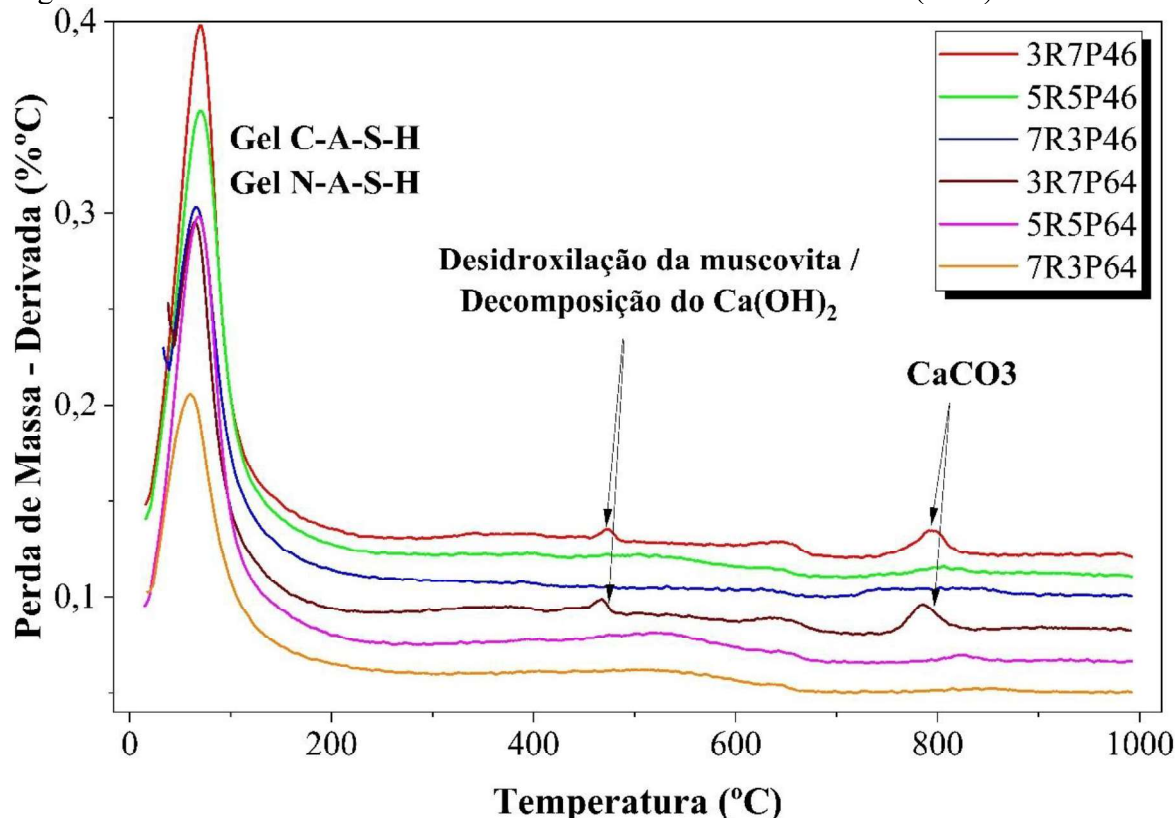
Nas Figuras 34 e 35 são apresentadas a perda de massa derivada e a perda de massa percentual das amostras de referência obtidas da análise termogravimétrica. As misturas 3R7P46 e 3R7P64 apresentaram curvas DTG quase idênticas e uma perda de massa total de 22,47% e 19,67%, respectivamente. As curvas das amostras 5R5P46, 7R3P46, 5R5P64 e 7R3P64 também foram similares entre si, apresentando perdas de massa de 21,86%, 16,88%, 21,36% e 16,53%, respectivamente.

Como pode ser observado nas figuras, todas as amostras exibem perda de massa significativa antes de 110 °C devido à perda de água livre e fracamente ligada no produto. A

lenta perda de massa entre 105 °C e 300 °C deve-se à decomposição por desidratação dos géis C-A-S-H e N-A-S-H (Duxson *et al.*, 2007; Pyatina; Sugama, 2017). A perda de massa observada na faixa de 450–550 °C pode ser atribuída à desidroxilação da muscovita residual, comum em matrizes contendo resíduo cerâmico, conforme descrito por Guggenheim, Chang e Koster (1987), indicando que parte do precursor não reagiu completamente durante o processo de ativação alcalina. Nessa faixa de temperatura também ocorre a decomposição da fase Ca(OH)_2 (Canfield *et al.*, 2014; Sun e Chen., 2019). A perda de massa entre 600 e 800 °C é associada à decomposição do carbonato de cálcio (Dong *et al.*, 2023).

Na faixa de temperatura de 450–550 °C, a perda de massa aumentou com o equilíbrio de cálcio no sistema. As amostras 5R5P46 e 5R5P64 tiveram uma perda de massa de 1,37% e 1,52%, respectivamente. Com o aumento do teor de cálcio (3R7P46 e 3R7P64) as amostras perderam 0,97% e 1,22%, respectivamente. Com a diminuição do teor de cálcio, as amostras 7R3P46 e 7R3P64 perderam 0,46% e 1,13% respectivamente.

Figura 34 – DTG: Perda de massa derivada das misturas de referência (REF)

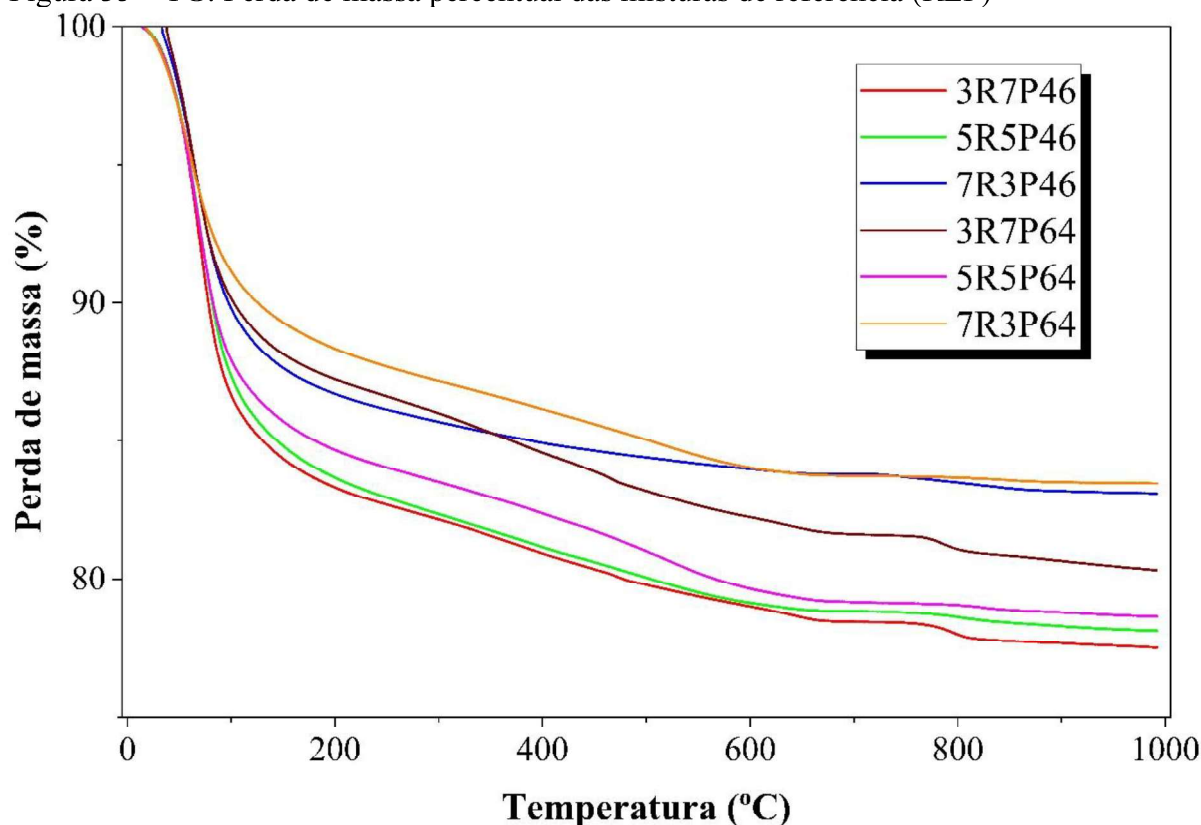


Fonte: Autor, 2026

As misturas com maior teor de PAN (3R7P46 e 3R7P64) apresentaram picos de decomposição mais intensos em faixas superiores a 600 °C, o que sugere maior presença de

fases associadas ao cálcio e à formação de carbonatos. Isso ocorre porque a composição rica em óxidos de cálcio favorece a liberação de íons e a formação de carbonatos estáveis (Li; Wu, 2022). Essas mesmas amostras também exibiram sinais de desidroxilação da muscovita na faixa de 450 °C a 550 °C, indicando que ainda havia partículas do precursor a reagir. A intensidade dos picos no intervalo correspondente à decomposição por desidratação dos géis C-A-S-H e N-A-S-H reflete diretamente os resultados de resistência à compressão: o maior pico foi observado na amostra 3R7P46, que apresentou a maior resistência aos 56 dias (29,03 MPa); o menor pico ocorreu na amostra 7R3P64, com a menor resistência registrada no mesmo período (19,80 MPa); já os picos intermediários corresponderam às demais misturas, com resistências intermediárias.

Figura 35 – TG: Perda de massa percentual das misturas de referência (REF)



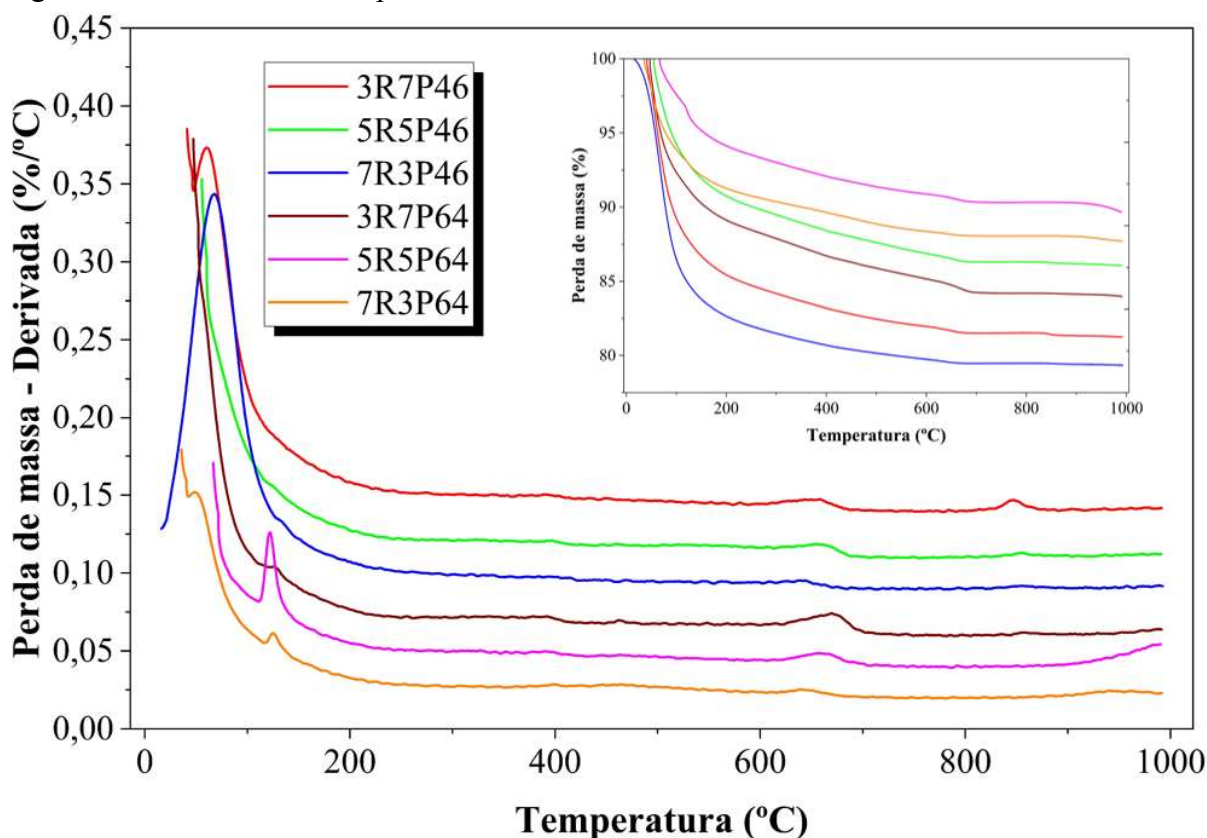
Fonte: Autor, 2026

Os resultados da análise termogravimétrica das misturas imersas em H_2SO_4 , $MgSO_4$, $NaCl$ e água o mar são apresentados nas Figuras 36, 37, 38 e 39, respectivamente. Após 28 dias de exposição às soluções, observou-se o desaparecimento dos picos das amostras 3R7P46 e 7R3P64 no intervalo de 450 °C a 550 °C, indicando que todos os ataques promoveram a dissolução da muscovita não reagida.

No intervalo de 600 °C a 800 °C, o pico da amostra 3R7P46 apresentou redução de intensidade, mas houve deslocamento para uma temperatura mais elevada (850 °C), evidenciando maior estabilidade térmica em todas as soluções analisadas. Esse comportamento reflete diretamente os resultados de resistência à compressão, já que todas as amostras apresentaram valores superiores ao da referência.

Em contrapartida, na amostra 3R7P64, o carbonato foi decomposto a uma temperatura inferior (630 °C) nas soluções de H_2SO_4 e MgSO_4 , evidenciando menor estabilidade térmica e, conseqüentemente, redução da resistência frente ao ataque de sulfatos. Já nas soluções de NaCl e água do mar, a decomposição ocorreu na mesma faixa de temperatura, porém com maior intensidade do pico, apresentando resistência em níveis próximos à referência. Segundo Galan, Glasser e Andrade (2013), o carbonato de cálcio se decompõe em condições bem definidas, e a temperatura em que ocorre essa decomposição está diretamente relacionada à estabilidade da fase. Assim, carbonatos mais estáveis tendem a se decompor apenas em temperaturas mais elevadas, enquanto formas menos cristalinas ou modificadas se decompõem em faixas mais baixas.

Figura 36 – DTG: Misturas após imersão em H_2SO_4

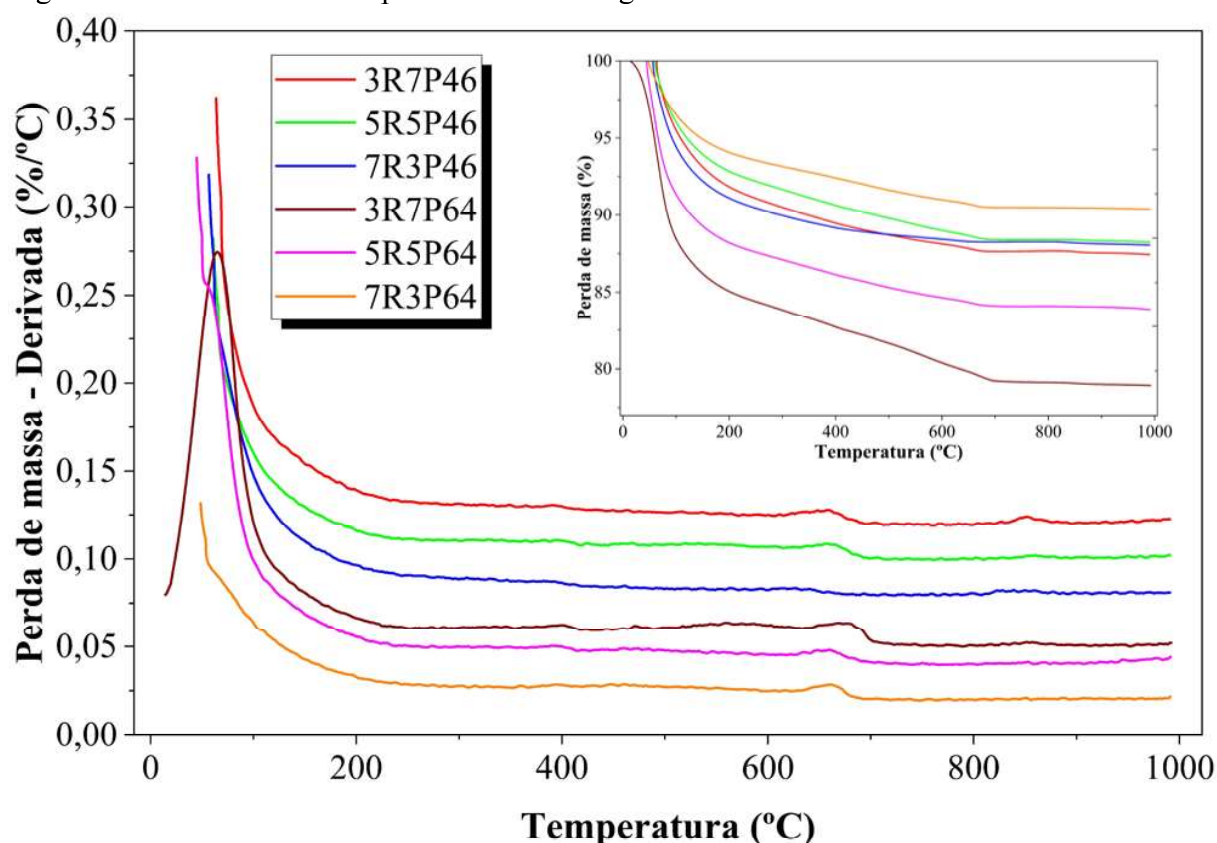


As demais amostras não apresentaram picos na região 450°C a 550°C, indicando que a diminuição do teor de cálcio acelera o processo de reação dos precursores.

No intervalo de 105 °C a 300 °C, a amostra 7R3P64 apresentou perda de massa de 4,05% na condição sem imersão. Após os ataques químicos, os valores foram reduzidos para 3,51% (H₂SO₄), 3,28% (MgSO₄), 3,48% (NaCl) e 2,98% (H₂OM). Esses resultados evidenciam menor decomposição dos géis N-A-S-H nesse intervalo, corroborando os dados de resistência à compressão, nos quais a amostra apresentou redução em todas as condições de ataque.

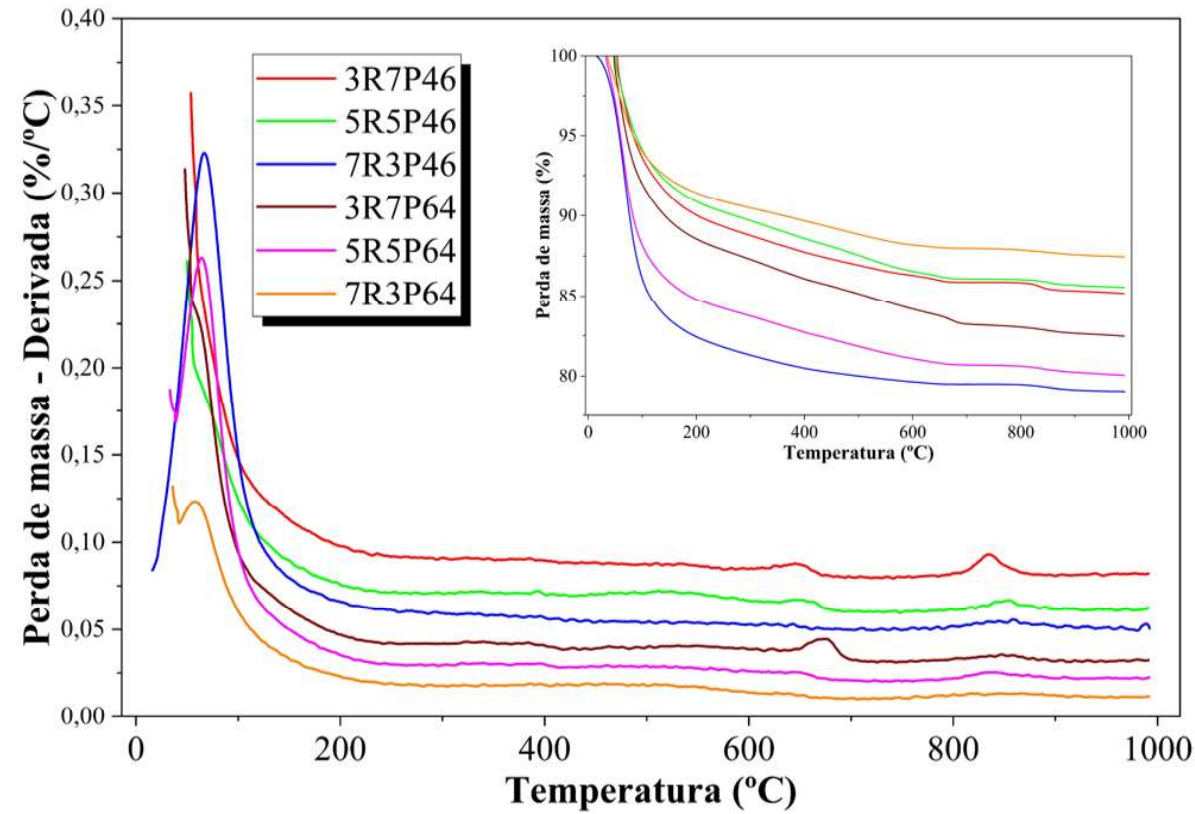
Em contrapartida, no mesmo intervalo, a amostra 3R7P46 apresentou perda de massa de 4,76% na condição sem imersão. Após os ataques, os valores foram aumentados para 5,29% (H₂SO₄), 4,94% (MgSO₄), 4,85% (NaCl) e 5,37% (H₂OM), evidenciando maior decomposição dos géis C-A-S-H no intervalo, refletindo o aumento da resistência à compressão.

Figura 37 – DTG: Misturas após imersão em MgSO₄



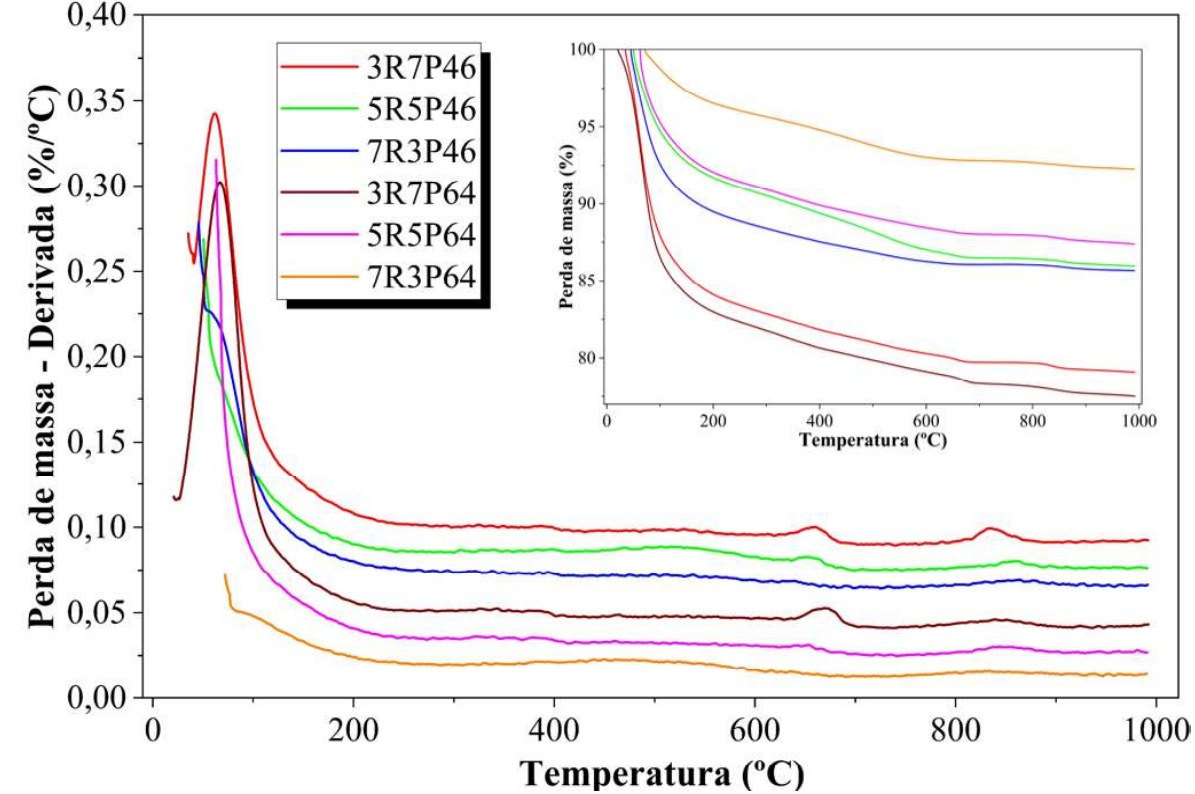
Fonte: Autor, 2026

Figura 38 – DTG: Misturas após imersão em NaCl



Fonte: Autor, 2026

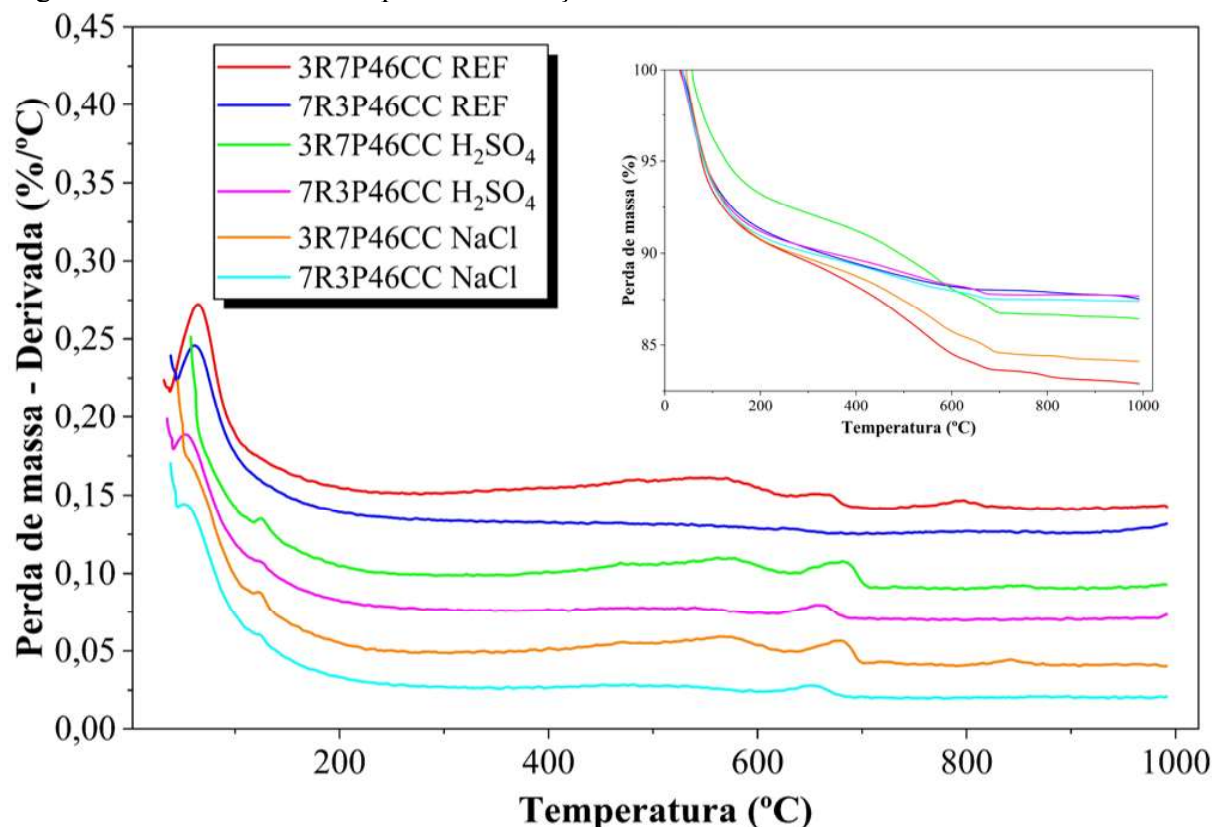
Figura 39 – DTG: Misturas após imersão em H₂OM



Fonte: Autor, 2026

Na Figura 40 são apresentados os resultados da análise termogravimétrica das misturas submetidas previamente à carbonatação acelerada e, em seguida, expostas a soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e cloreto de sódio (NaCl).

Figura 40 – DTG: Misturas após carbonatação acelerada



Fonte: Autor, 2026

Observa-se que a amostra 7R3P46CCREF apresentou o mesmo comportamento da sua mistura sem carbonatação, principalmente no intervalo 600°C-800°C, indicando que não houve reação com o CO_2 durante a cura na câmara, reflexo do baixo teor de cálcio na mistura. No intervalo de 105°C-300°C, houve uma perda de massa de 3,75%. Após imersão na solução de H_2SO_4 , houve um sinal de decomposição de CaCO_3 , indicando que houve reação durante a imersão, porém, no intervalo 105°C-300°C sua perda de massa foi apenas de 3,53%, havendo um enfraquecimento do gel N-A-S-H, refletindo a redução da resistência após o ataque. Já após a imersão na solução de NaCl , também houve a formação de CaCO_3 , e no intervalo 105°C-300°C, essa perda de massa foi semelhante a referência, com 3,70%, refletindo a resistência equivalente.

Em contrapartida, a amostra 3R7P46CCREF apresentou absorção de CO_2 durante a cura, e durante os ataques esses picos se intensificaram. No intervalo 105°C-300°C houve uma

perda de massa de 3,88%, enquanto após a imersão em NaCl essa perda de massa aumentou para 4,23%, refletindo o ganho de resistência após o ataque.

4.3.3 Porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP)

Nos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) foram analisadas duas misturas representativas: 3R7P46, de maior resistência à compressão, e 7R3P64, de menor resistência, sem imersão e após exposição às diferentes soluções agressivas (H_2SO_4 , MgSO_4 , NaCl e água do mar), além das versões submetidas à cura por carbonatação, com destaque para os resultados em meio de ácido sulfúrico. Os resultados da caracterização dos poros encontram-se resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros de porosimetria por intrusão de mercúrio

Mistura	Porosidade (%)	Diâmetro médio dos poros (nm)	Distribuição do tamanho dos poros (%)					Total (%)
			<20 nm	20–50 nm	50–200 nm	200–800 nm	>800 nm	
7R3P64 REF	29,63	23,90	11,93	18,76	28,26	28,32	12,73	100,00
7R3P64 H_2SO_4	32,12	22,70	15,50	21,50	28,00	24,00	11,00	100,00
7R3P64 MgSO_4	35,14	25,00	17,40	24,50	28,70	21,70	7,70	100,00
7R3P64 NaCl	36,01	30,50	18,60	25,40	29,00	19,50	7,50	100,00
7R3P64 H_2OM	32,90	50,90	16,20	23,90	29,60	22,40	7,90	100,00
3R7P46 REF	27,16	29,00	19,60	28,70	30,10	16,10	5,50	100,00
3R7P46 H_2SO_4	18,69	35,60	23,20	29,80	27,60	14,40	5,00	100,00
3R7P46 MgSO_4	20,15	49,10	18,90	29,20	30,20	16,00	5,70	100,00
3R7P46 NaCl	21,64	52,50	18,90	29,30	31,00	15,50	5,30	100,00
3R7P46 H_2OM	19,96	44,60	19,00	28,40	30,30	16,10	6,20	100,00
7R3P46CC REF	26,18	26,90	18,00	29,30	31,60	15,80	5,30	100,00
7R3P46CC H_2SO_4	23,55	20,10	18,50	29,00	31,40	16,10	5,00	100,00
3R7P46CC REF	28,65	19,60	18,80	29,60	31,10	15,90	4,60	100,00
3R7P46CC H_2SO_4	16,51	27,50	19,00	28,50	32,10	15,50	4,90	100,00

Fonte: Autor, 2026

A análise dos resultados revela que a amostra 7R3P64 apresentou aumento de porosidade após a imersão em todos os ambientes agressivos. Comparando com sua referência, que possui porosidade de 29,63%, observa-se acréscimos significativos: 32,12% após H_2SO_4 (+2,49 pontos percentuais), 35,14% com MgSO_4 (+5,51 pp), 36,01% com NaCl (+6,38 pp) e 32,90% após imersão em água do mar (+3,27 pp). Esses aumentos indicam que os ataques químicos promoveram abertura ou formação de novos poros na matriz da amostra, possivelmente por lixiviação ou degradação superficial, tornando-a mais porosa.

Em contraste, as demais misturas, tanto a 3R7P46 quanto as formulações carbonatadas, apresentaram comportamento oposto. Após as imersões, todas registraram redução de porosidade em relação às respectivas referências. A mistura 3R7P46, por exemplo, caiu de 27,16% para 18,69% após H_2SO_4 , e manteve valores inferiores também com MgSO_4 (20,15%), NaCl (21,64%) e H_2O Mar (19,96%). O mesmo padrão é observado nas misturas carbonatadas, como 3R7P46CC, cuja porosidade passou de 28,65% na referência para 16,51% após ataque ácido. Essa redução sugere que os ambientes agressivos provocaram fechamento de poros ou formação de produtos secundários que obstruem os poros existentes, tornando a matriz menos permeável.

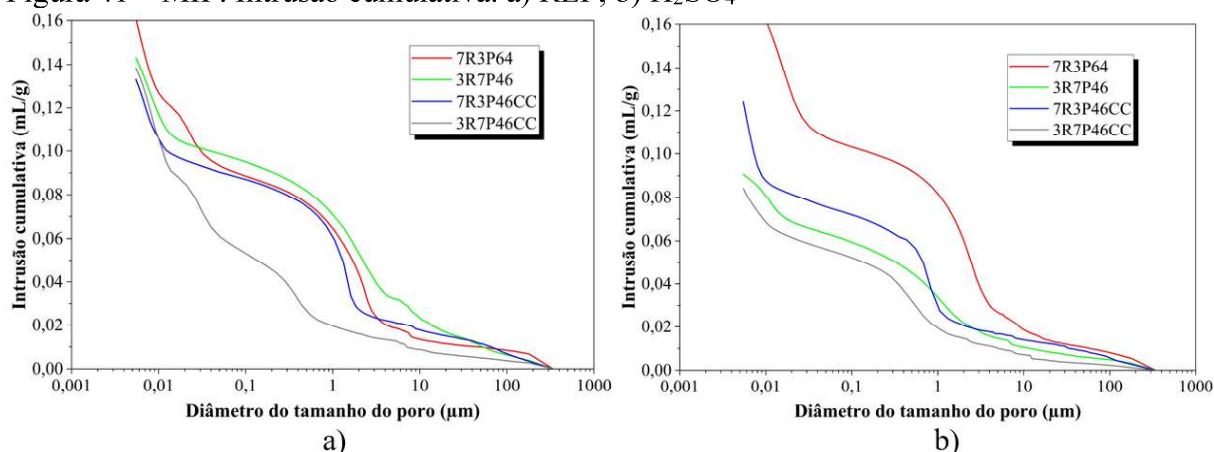
As misturas 3R7P46, por apresentarem a menor porosidade, exibiram maior resistência à compressão. Esta observação é consistente com um estudo anterior onde foi relatada menor porosidade e maior resistência à compressão (Singh; Singh, 2019).

Curvas de *Intrusão cumulativa de mercúrio versus Diâmetro do tamanho dos poros* foram obtidas por meio do ensaio MIP. Na Figura 41 estão dispostos os resultados das misturas de referência (REF) 7R3P64, 3R7P46, 7R3P46CC e 3R7P46CC, e após imersão em ácido sulfúrico (H_2SO_4). Na Figura 42 são apresentados os resultados do logaritmo da intrusão diferencial das mesmas amostras.

Observa-se que a mistura 7R3P64, caracterizada por menor resistência mecânica, apresentou aumento da intrusão cumulativa após exposição ao H_2SO_4 , indicando maior abertura da rede porosa e formação de novos caminhos de penetração. Esse comportamento está em consonância com os dados da Tabela 12, que mostram acréscimo de porosidade de 29,63% (REF) para 32,12% (H_2SO_4). A curva desloca-se para maiores volumes intrudidos, sugerindo que o ataque ácido promoveu lixiviação e degradação superficial, tornando a matriz mais permeável.

Em contraste, a mistura 3R7P46, que apresentou maior resistência à compressão, registrou redução significativa da intrusão cumulativa após imersão em H_2SO_4 . A porosidade caiu de 27,16% (REF) para 18,69% (H_2SO_4), evidenciando que o ataque ácido levou ao fechamento de poros ou à formação de produtos secundários que obstruíram a rede porosa. Esse comportamento indica maior estabilidade química e menor suscetibilidade à lixiviação, reforçando a superioridade dessa formulação frente a ambientes agressivos.

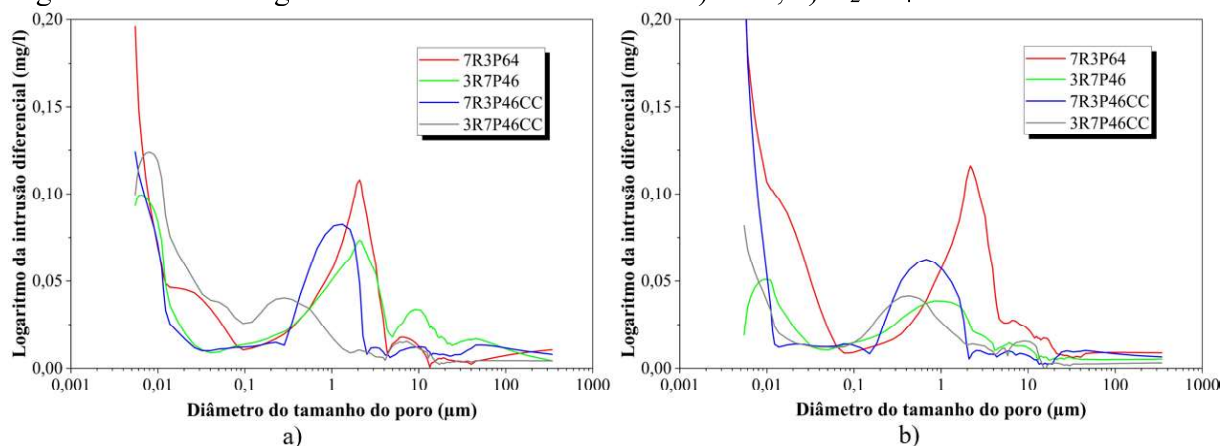
Figura 41 – MIP: Intrusão cumulativa. a) REF; b) H₂SO₄



Fonte: Autor, 2026

Os resultados de logaritmo da intrusão diferencial mostraram intensidades de pico significativamente maiores para as misturas carbonatadas em diâmetro de poros de aproximadamente 0,1-1 μm, indicando que a cura por carbonatação reduz a intrusão do mercúrio. Resultado semelhante ocorreu nas pastas cimentícias de Das *et al.* (2025).

Figura 42 – MIP: Logaritmo da intrusão diferencial. a) REF; b) H₂SO₄



Fonte: Autor, 2026

Na Figura 43 estão dispostos os resultados das misturas 7R3P64 e 3R7P46 após imersão em sulfato de magnésio (MgSO₄), cloreto de sódio (NaCl) e água do mar (H₂OM). Na Figura 36 contém o resultado de logaritmo da intrusão diferencial das mesmas amostras.

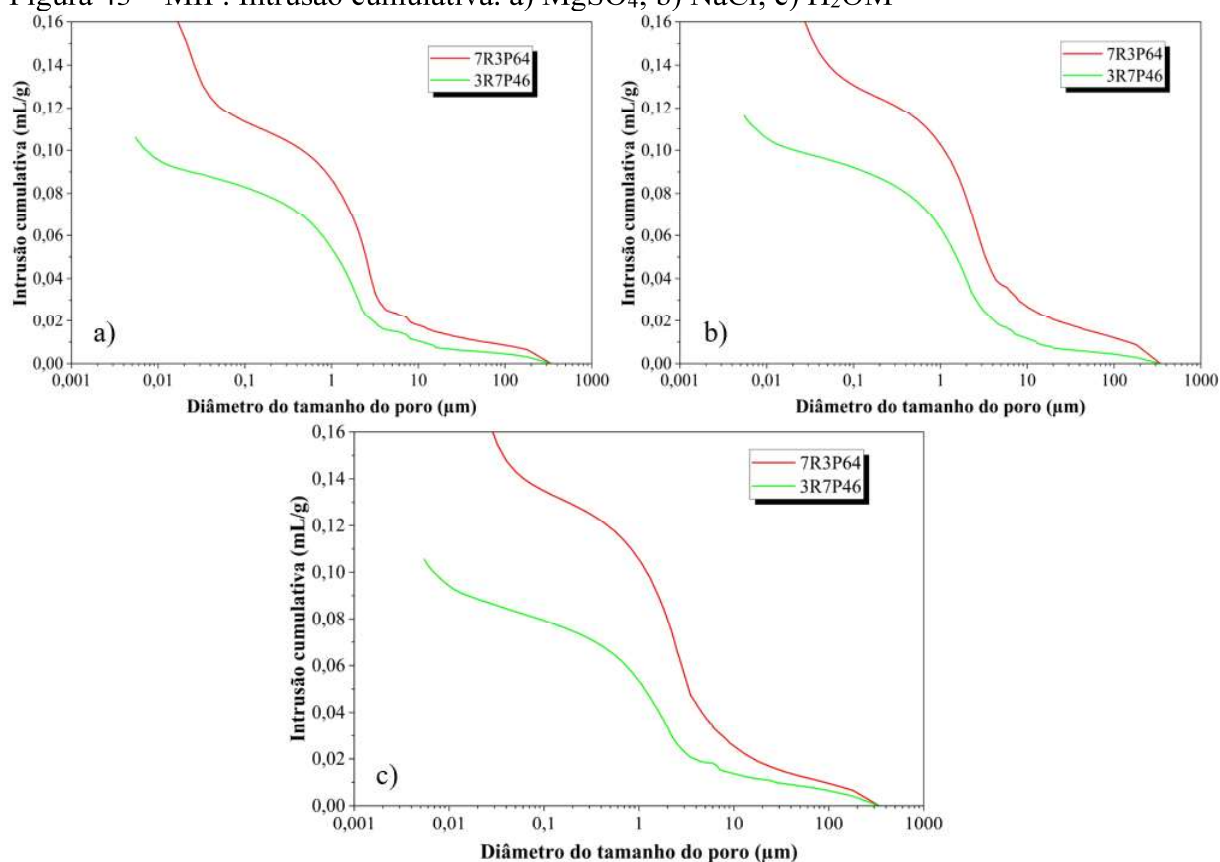
Observa-se que a mistura 7R3P64, caracterizada por menor resistência mecânica, apresentou aumento da intrusão cumulativa em todas as soluções agressivas (MgSO₄, NaCl e H₂OM). Esse comportamento confirma os resultados da Tabela 12, em que a porosidade cresceu de 29,63% (REF) para 35,14% com MgSO₄, 36,01% com NaCl e 32,90% com água do mar. O

deslocamento das curvas para maiores volumes intrudidos indica que os ataques químicos promoveram abertura de poros e maior conectividade da rede porosa, tornando a matriz mais permeável e suscetível à degradação.

Em contraste, a mistura 3R7P46, registrou redução da intrusão cumulativa após imersão nas mesmas soluções. A porosidade caiu de 27,16% (REF) para 20,15% com MgSO_4 , 21,64% com NaCl e 19,96% com água do mar. As curvas mostram menor volume intrudido, sugerindo que houve obstrução de poros ou formação de produtos secundários que reduziram a permeabilidade

Comparando os diferentes meios, nota-se que o NaCl promoveu o maior aumento de porosidade na 7R3P64 (36,01%), enquanto o MgSO_4 e a água do mar tiveram efeitos mais moderados. Já na 3R7P46, todas as soluções mantiveram a tendência de redução da porosidade, com destaque para o H_2O , que levou a uma queda para 19,96%, indicando maior refinamento da estrutura porosa.

Figura 43 – MIP: Intrusão cumulativa. a) MgSO_4 ; b) NaCl ; c) H_2O



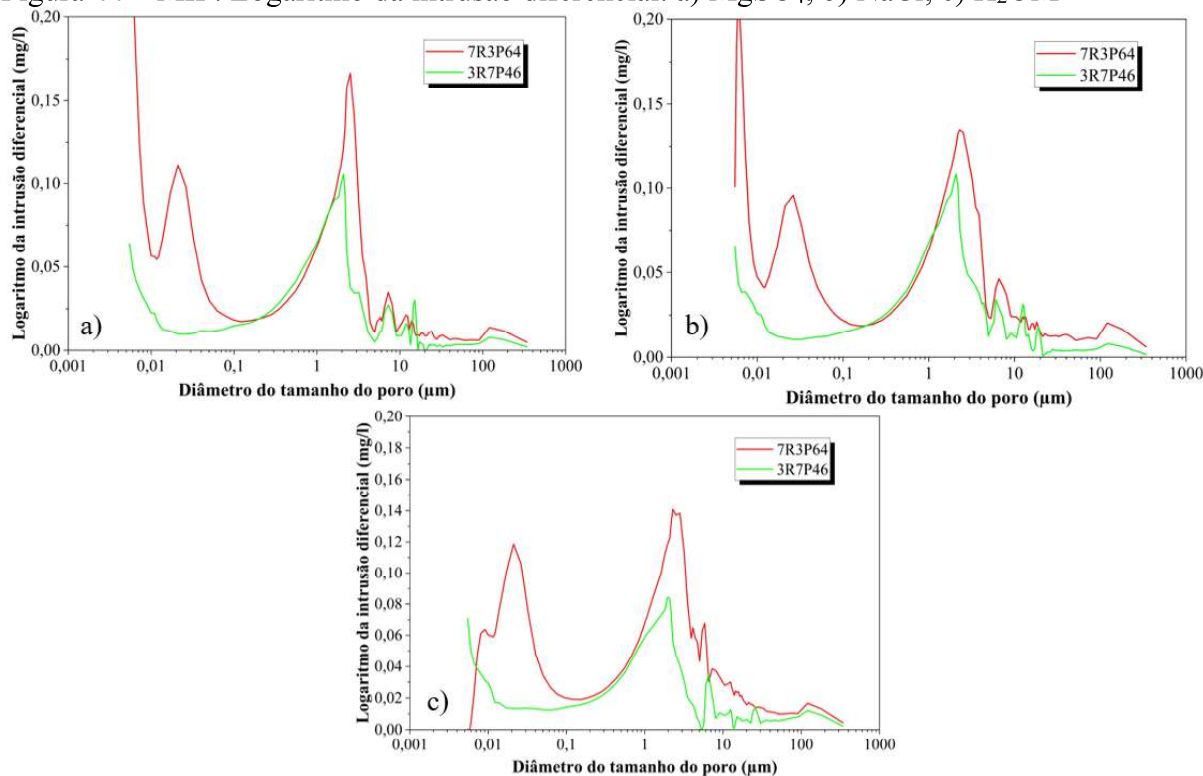
Fonte: Autor, 2026

Os resultados de logaritmo da intrusão diferencial (Figura 44) mostram que a mistura 3R7P46 imersa em MgSO_4 manteve distribuição de poros mais estável, enquanto a

7R3P64 evidenciou maior intensidade de picos, indicando microestrutura mais vulnerável ao ataque. Na solução de NaCl, ambas as misturas mostraram variações discretas, mas novamente a 7R3P64 apresentou maior abertura de poros, sugerindo maior suscetibilidade à penetração de mercúrio. Já em água do mar, os resultados foram mais equilibrados, com menor alteração na distribuição de poros, embora a 3R7P46 tenha mantido perfil mais uniforme, confirmando seu desempenho superior em ambientes agressivos. Comparando o resultado de logaritmo da intrusão diferencial da mistura 7R3P64 sem imersão (Figura 42), nota-se uma abertura no tamanho do diâmetro dos poros na região 0,01-0,1 μm , confirmando os dados da Tabela 10 com o aumento da porosidade.

A amostra 7R3P46CC apresentou maior porosidade e maior diâmetro médio dos poros em relação a mistura 3R7P46CC, porém não houve a reação com o CO_2 durante a cura, como visto na Figura 40, devido ao baixo teor de cálcio, corroborando o estudo de Huijgen, Witkamp e Comans (2005). A amostra 3R7P46CC após imersão de H_2SO_4 teve um aumento de 40,30% no tamanho do diâmetro médio dos poros, explicando a redução na resistência após o ataque.

Figura 44 – MIP: Logaritmo da intrusão diferencial. a) MgSO_4 ; b) NaCl; c) H_2O



Fonte: Autor, 2026

Comparando os resultados com sistemas cimentícios convencionais, observa-se que, no estudo de El Inaty *et al.* (2025), os compósitos produzidos com os cimentos CEM I (alto teor de clínquer) e CEM III (médio teor de clínquer) apresentaram porosidades iniciais de 31,7% e 27,3%, respectivamente. Em contraste, as misturas com maior teor de escória de panela avaliadas neste trabalho exibiram porosidades significativamente menores, tanto no estado sem imersão quanto após exposição às soluções agressivas, além de manterem reduções consistentes nas formulações submetidas à carbonatação acelerada. Esses resultados evidenciam que as matrizes álcali-ativadas aqui estudadas apresentaram desempenho superior não apenas em relação aos cimentos convencionais, mas também quando comparadas às formulações álcali-ativadas de metacaulim e cinza volante analisadas por El Inaty *et al.* (2025).

Os géis ligantes formados na composição RCV e PAN contribuíram para o refinamento da estrutura dos poros e desenvolvimento da resistência, consistentes com os relatos da literatura, onde uma mistura apropriada de géis C-A-S-H e N-A-S-H favorece o desenvolvimento da estrutura dos poros e o desempenho mecânico dos compósitos álcali-ativados (Provis; Bernal, 2014).

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação avaliou a durabilidade de pastas álcali-ativadas produzidas a partir de misturas binárias de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória de forno panela (PAN), submetidas a condições de exposição química agressiva e regimes de cura variados, incluindo carbonatação acelerada. Os resultados confirmam o potencial desses materiais como alternativas sustentáveis ao cimento Portland, promovendo o reaproveitamento de resíduos locais e alinhando-se aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis). Essa contribuição evidencia a valorização de subprodutos e a redução do descarte em aterros, além de uma redução significativa nas emissões de CO₂ associadas à produção cimentícia convencional.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios no estado fresco, endurecido, análises químicas e microestruturais, é possível sintetizar as seguintes conclusões:

- Estado fresco:

A fluidez das pastas variou conforme a proporção dos ativadores. Misturas com maior teor de NaOH apresentaram melhor espalhamento e menor tensão de escoamento, enquanto aquelas com mais Na₂SiO₃ mostraram comportamento mais viscoso. O tempo de pega foi diretamente influenciado pela proporção entre RCV e PAN, misturas com maior teor de escória panela e silicato de sódio tiveram tempos de pega mais curtos, enquanto composições com maior teor de RCV apresentaram tempos mais longos.

- Resistência à compressão:

Todas as formulações apresentaram evolução significativa ao longo do tempo de cura. A resistência à compressão observada em todas as misturas, exceto na formulação 7R3P64, enquadra-se nas classes estabelecidas pela ABNT NBR 8953:2015 para concretos estruturais. Em particular, os resultados atingiram valores compatíveis com a classe C20/25, que exige 20 MPa em corpos de prova cilíndricos e 25 MPa em corpos cúbicos aos 28 dias de cura. Misturas com maior proporção de escória panela (ex.: 3R7P46) atingiram os melhores resultados, chegando a 36,95 MPa aos 90 dias, enquanto aquelas com maior teor de RCV (ex.: 7R3P64)

apresentaram valores inferiores, como 29,34 MPa. O tipo de ativador foi determinante: composições com maior teor de silicato de sódio mostraram desempenho superior em todas as idades de cura.

- Ataques químicos:

Ácido sulfúrico (H_2SO_4): misturas ricas em PAN e silicato de sódio mantiveram ou aumentaram a resistência após ciclos de imersão, enquanto composições com maior teor de RCV sofreram perdas significativas.

Sulfato de magnésio (MgSO_4): misturas com maior teor de PAN apresentaram maior resistência inicial e mantiveram desempenho elevado mesmo após 56 dias.

Cloreto de sódio (NaCl): algumas formulações tiveram ganhos de resistência, como a 3R7P46 que atingiu 40,93 MPa após 8 ciclos, superando sua referência.

Água do mar (H_2OM): ambiente mais agressivo, com perdas acentuadas nas misturas ricas em RCV, enquanto composições com maior teor de PAN mantiveram desempenho mais estável, chegando a 46,56 MPa na 3R7P46.

A perda de massa e análise visual corroboraram os fatos, em que misturas ricas em RCV apresentaram maiores perdas de massa e sinais visíveis de degradação, como formação de lâminas e desprendimento superficial. Misturas ricas em PAN mostraram perdas menores e maior estabilidade estrutural. Em NaCl , as variações foram mínimas, confirmando maior estabilidade das composições carbonatadas.

- Carbonatação acelerada:

A mistura 3R7P46CC apresentou ganhos expressivos de resistência, chegando a 45,7 MPa em NaCl , superando inclusive sua referência sem imersão. Já a 7R3P46CC mostrou vulnerabilidade, sobretudo ao ataque de H_2SO_4 , com queda para 18,7 MPa.

- Microestrutura (FTIR, TG/DTG e MIP):

FTIR confirmou degradação dos géis C-A-S-H/N-A-S-H em ambientes ácidos e sulfatados, com intensificação da formação de carbonatos. TG/DTG mostrou que misturas ricas em PAN apresentaram maior estabilidade térmica, com deslocamento dos picos para temperaturas mais altas, refletindo maior resistência mecânica. MIP evidenciou que misturas

ricas em RCV aumentaram a porosidade após os ataques, enquanto as ricas em PAN tiveram redução, indicando fechamento de poros e maior durabilidade.

Os resultados confirmam que as misturas binárias de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória panela (PAN) álcali-ativadas apresentam desempenho diferenciado conforme a proporção dos precursores e ativadores. Misturas com maior teor de PAN e silicato de sódio demonstraram maior resistência mecânica, menor porosidade e maior estabilidade frente a ambientes agressivos, enquanto aquelas com maior teor de RCV mostraram maior vulnerabilidade química e física. A carbonatação acelerada se revelou uma estratégia eficaz para aumentar a durabilidade em ambientes ricos em cloretos, reforçando o potencial dessas composições como alternativa sustentável ao cimento Portland.

A grande contribuição deste estudo demonstra o elevado potencial das misturas binárias de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e escória de forno panela (PAN) álcali-ativadas como alternativas sustentáveis ao cimento Portland, com excelente durabilidade em ambientes agressivos, promovendo a valorização de resíduos industriais locais, alinhando-se aos princípios da economia circular e reduzindo significativamente as emissões de CO₂ associadas à produção cimentícia convencional.

Com base nos resultados da dissertação, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de argamassas álcali-ativadas: Incorporar agregados finos (como areia) às formulações otimizadas da dissertação (ex.: misturas com 70% PAN e maior proporção de silicato de sódio) para produzir argamassas. Avaliar propriedades como trabalhabilidade, adesão, resistência à tração e durabilidade em condições reais de aplicação, visando uso em revestimentos ou assentamentos em construções industriais.
- Produção de concretos: Estender as pastas para concretos estruturais adicionando agregados graúdos e miúdos. Realizar ensaios de resistência mecânica, módulo de elasticidade e durabilidade em ambientes agressivos (como sulfatos e cloretos), com foco em protótipos de elementos estruturais (vigas ou lajes) para validar o desempenho em aplicações de grande porte.
- Análise econômica e de ciclo de vida: Realizar estudos de viabilidade econômica para produção em larga escala, incluindo custos de processamento de resíduos locais (RCV e PAN), ativadores e logística. Incluir avaliação do impacto ambiental (redução de CO₂) por meio de análise de ciclo de vida (ACV), comparando com concretos convencionais baseados em cimento Portland.

6 REFERÊNCIAS

- ADEDIRAN, Adeolu; YLINIEMI, Juho; CARVELLI, Valter; ADESANYA, Elijah; ILLIKAINEN, Mirja. Durability of alkali activated Fe rich fayalite slag based mortars subjected to different environmental conditions. *Cement and Concrete Research*, v. 162, p. 106984, 2022.
- AJALA, Amkpa Job; BADARULZAMAN, Nur Azam. Thermal Conductivity of Aloji Fireclay as Refractory Material. *International Journal of Integrated Engineering*, v. 8, n. 2, 2016. Disponível em: <https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/1343>. Acesso em: 14/01/2026.
- ALBIDAH, A.; ALGHANNAM, M.; ABBAS, H.; ALMUSALLAM, T.; AL-SALLOUM, Y. Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 10, p. 84–98, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.104>. Acesso em: 20/01/2026.
- ALEXANDER, Mark; BERTRON, Alexandra; DE BELIE, Nele (Ed.). *Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments*. Dordrecht: Springer, 2013. (RILEM, v. 10). 462 p. DOI: 10.1007/978-94-007-5413-3. Acesso em: 29/12/2025.
- ALLAHVEDI, A.; HASHEMI, H. Investigating the resistance of alkali-activated slag mortar exposed to magnesium sulfate attack. *International Journal of Civil Engineering*, v. 13, n. 4, p. 379-387, 2015
- AL TAM, Saeed M.; RIAD, Amr; MOHAMMED, Nader; AL OTAIBI, Ali; YOUSSEf, Osama. Advancement of eco-friendly slag-based high-strength geopolymer concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 34, p. 1636–1653, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.146>. Acesso em: 26/01/2026.
- ARAOS, P.; APONTE, D.; BARRA, M. *Ladle furnace slag as a new source of supplementary cementitious material: Evaluating long-term performance and environmental impact in Portland cement systems*. *Journal of Building Engineering*, v. 95, p. 109995, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109995>. Acesso em: 04/05/2025.
- APONTE, Diego; MARTÍN, Oriol Soto; VALLS DEL BARRIO, Susana; BIZINOTTO, Marilda Barra. Ladle Steel Slag in Activated Systems for Construction Use. *Minerals*, v. 10, n. 8, p. 687, 2020. DOI: 10.3390/min10080687. Acesso em: 14/01/2026.
- ARAÚJO, Lucas BR et al. Microstructural, Mechanical and Fresh-State Performance of BOF Steel Slag in Alkali-Activated Binders: Experimental Characterization and Parametric Mix Design Method. *Buildings*, v. 15, n. 12, p. 2056, 2025
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16372:2020 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16605:2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16607 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)*. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5849:2015 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de peneiramento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8953:2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AZAR, Patrick et al. Durability of sodium carbonate alkali-activated slag concrete assessed by a performance-based approach. *Construction and Building Materials*, v. 423, p. 135873, 2024

AZDEJKOVIC, L. D.; TRIANTAFILLOU, T. C.; PAPANICOLAOU, C. G.; MIRANDA DE LIMA, L. Application of alkali-activated materials (AAM) in seismic and combined energy and seismic retrofitting of beam-type masonry walls: In- and out-of-plane behavior. *Engineering Structures*, v. 334, p. 120207, 2025. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120207. Acesso em 14/06/2025.

A.R.G. Azevedo, C.M.F. Vieira, W.M. Ferreira, K.C.P. Faria, L.G. Pedroti, B.C. Mendes, Potential use of ceramic waste as precursor in the geopolymerization reaction for the production of ceramic roof tiles, *Journal of Building Engineering*. 29 (2020) 101156. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101156>. Acesso em 23/09/2025.

AZIZ, Y. H.; EL MALKY, A. Effect of Silicate Fume-Based Activating Solution on Mechanical Properties of Fly Ash/Silica Fume Geopolymer Concrete. *Journal of Engineering Sciences Assiut University*, v. 53, n. 2, p. 1–12, 2025. DOI: 10.21608/jesaun.2025.383265.1506. Acesso em 20/08/2025.

BAKHAREV, T. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 4, p. 658-670, Apr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>. Acesso em 03/08/2025.

BAPTISTA, Diogo Martins. Aproveitamento de resíduos resultantes do processo de fabrico de peças de alta qualidade da indústria cerâmica. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2024. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/178023>. Acesso em 22/11/2025.

BASTOS, Cleverson Leite; KELLER, Vicente. *Aprendendo a aprender: introdução à metodologia científica*. 19. ed. Petrópolis: Vozes, 2006.

BEDDOE, Robin E.; DORNER, Horst W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 12, p. 2333-2339, Dec. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.002>. Acesso em 17/01/2026.

BERNAL, S. A. et al. Binder chemistry – High-calcium alkali-activated materials. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (Ed.). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*. Dordrecht: Springer, 2014. p. 59–91. DOI: 10.1007/978-94-007-7672-2_3. Acesso em 19/11/2025.

BERNAL, Susan A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; PROVIS, John L.; ROSE, Volker. Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 6, p. 898–907, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.003>. Acesso em: 14/01/2026.

BIGNOZZI, M. C.; MANZI, S.; LANCELOTTI, I.; KAMSEU, E.; BARBIERI, L.; LEONELLI, C. Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag. *Applied Clay Science*, v. 73, n. 1, p. 78–85, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.015>. Acesso em: 23/10/2025.

BIJELJIĆ, J.; RISTIĆ, N.; GRDIĆ, Z.; TOPLIČIĆ ĆURČIĆ, G.; ĐORĐEVIĆ, D. Durability properties of ladle slag geopolymer mortar based on fly ash. *Science of Sintering*, v. 52, p. 231–243, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2298/SOS2002231B>. Acesso em: 17/10/2025.

BITTAR, Eduardo Carlos Bianca. *Linguagem jurídica*. São Paulo: Saraiva, 2001.

BONDAR, Dali; NANUKUTTAN, Sreejith. External sulphate attack on alkali-activated slag and slag/fly ash concrete. *Buildings*, Basel, v. 12, n. 2, p. 94, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12020094>. Acesso em: 16/10/2025.

BUYONDO, K. A.; OLUPOT, P. W.; KIRABIRA, J. B.; YUSUF, A. A. Optimization of production parameters for rice husk ash-based geopolymer cement using response surface methodology. *Case Studies in Construction Materials*, v. 13, p. e00461, 2020. DOI: [10.1016/j.cscm.2020.e00461](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00461). Acesso em: 21/06/2025.

CAMPOS, Ana Mara da Rocha. *Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CANFIELD, G. M.; EICHLER, J.; GRIFFITH, K.; HEARN, J. D. The role of calcium in blended fly ash geopolymers. *Journal of Materials Science*, v. 49, n. 17, p. 5922–5933, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8307>. Acesso em: 02/09/2025.

CARREIRA, C. M.; BARBOSA, N. P.; BEZERRA, U. T.; SIMAS, T. B. Red ceramic industry residues: used to produce Portland cement. *Case Studies in Construction Materials*, v. 13, p. e00449, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00449>. Acesso em: 12/10/2025.

CARRILLO BELTRÁN, M.; GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, Á.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Geopolymers manufactured by the alkali activation of mining and ceramic wastes using a potential sustainable activator from olive stone bottom ashes. *Materials*, v. 18, n. 3, p. 688, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030688>. Acesso em: 02/10/2025.

CARRILLO BELTRÁN, Raul; PICAZO CAMILO, Elena; PEREA TOLEDO, Griselda; CORPAS IGLESIAS, Francisco Antonio. Geopolymers manufactured by the alkali activation of mining and ceramic wastes using a potential sustainable activator from olive stone bottom ashes. *Materials*, v. 18, n. 3, p. 688, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030688>. Acesso em: 15/10/2025.

CARVALHO, Ivo de Castro; OLIVEIRA, Gabrielli Tápia de; KIRCHHEIM, Ana Paula; COSTA, Heloína Nogueira da; CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. Utilization of red ceramic

waste in the production of binary eco-friendly alkali-activated binder: fresh and hardened state investigation. *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, p. e03681, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03681>. Acesso em: 14/10/2025.

CATAURO, M.; D'ANGELO, A.; GENUA, F.; GIOVINI, M.; FERRAZ, J. M. S.; VECCHIO CIPRIOTI, S. The behavior of industrial wastes as a replacement for metakaolin before geopolymerization: a comparative study. *Materials*, v. 18, n. 17, p. 4035, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18174035>. Acesso em: 27/08/2025.

CHIRA, M.; LĂZĂRESCU, A.-V.; HEGYI, A.; VERMESAN, H.; CSAPAI, A.; IONESCU, B. A.; TOADER, T. P.; FLOREAN, C. Influence of alkaline activator properties on corrosion mechanisms and durability of steel reinforcement in geopolymer binders. *Coatings*, v. 15, n. 6, p. 734, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15060734>. Acesso em: 15/11/2025.

CIMENTO APODI. *Relatório de Sustentabilidade 2021*. Fortaleza: Cimento Apodi, 2021. Disponível em: <https://www.cimentoapodi.com.br/>. Acesso em: 13/01/2026.

CONSTANTINO, Joaquim; CASTRO-GOMES, J.; VICENTE, Maria Inês Alves. Viabilidade de produção de blocos de construção com escória e outros resíduos, endurecidos com carbonatação acelerada. In: CONFERÊNCIA LUSÓFONA DE MATERIAIS E ESTRUTURAS – CLME, 10., 2025, Maputo. *Anais [...]*. Maputo: CLME, 2025. p. 563–576.

COSTA, F. P. da; BEZERRA, I. M. T.; FERNANDES, J. V.; RODRIGUES, A. M.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A. Durability of sustainable ceramics produced by alkaline activation of clay brick residue. *Sustainability*, v. 13, n. 19, p. 10931, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910931>. Acesso em: 20/09/2025.

COSTA, H. N.; CABRAL, A. E. B.; NOGUEIRA, R. E. F. Cimento álcali-ativado. In: CABRAL, A. E. B.; COSTA, H. N.; NOGUEIRA, R. E. F. (Org.). *Ciência e Engenharia de Materiais: Princípios e Fundamentos em Pesquisa – Volume 2*. Ponta Grossa: Atena Editora, 2022. DOI: 10.37885/221110900. Acesso em: 23/07/2025.

COSTA, Heloína Nogueira da; CABRAL, Eduardo Bezerra; NOGUEIRA, Ricardo Emílio Ferreira Quevedo. Potencial uso de subprodutos industriais da Região Metropolitana de Fortaleza na produção de cimentos álcali-ativados. *Conexões – Ciência e Tecnologia*, v. 17, 2023

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and applications*. 4. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2015. ISBN: 9782954453118

DAS, Kunal Krishna; WU, Xuanru; NOH, Geon; LEE, Jong-Han; JANG, Jeong Gook. Effect of acid attack coupled with elevated temperatures on carbonation-cured calcium sulfoaluminate and ordinary Portland cement paste. *Case Studies in Construction Materials*, v. 23, e05150, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05150>. Acesso em: 02/07/2025.

DENSITY, compressive strength and morphology of fly ash/ladle furnace slag blended one-part geopolymer. *Archives of Metallurgy and Materials*, v. 69, n. 4, p. 1381–1384, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2024.151403>. Acesso em: 12/09/2025.

DJobo, Jean Noël Yankwa; ELIMBI, Antoine; TCHAKOUTÉ, Hervé Kouamo; KUMAR, Sanjay. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, v. 124, p. 606–614, 15 Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141>. Acesso em: 14/10/2025.

DONG, T.; SUN, T.; XU, F.; OUYANG, G.; WANG, H.; YANG, F.; WANG, Z. Effect of solid sodium silicate on workability, hydration and strength of alkali-activated GGBS/fly ash paste. *Coatings*, v. 13, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13040696>. Acesso em: 02/01/2026.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, v. 42, p. 2917–2933, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>. Acesso em: 24/10/2025.

EL INATY, François; NASREDDINE, Hussein; DJERBI, Assia; GAUTRON, Laurent; MARCHETTI, Mario; QUIERTANT, Marc; METALSSI, Othman Omikrine. Mechanical and durability performance of metakaolin and fly ash-based geopolymers compared to cement systems. *Results in Engineering*, v. 27, p. 105788, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105788>. Acesso em: 15/10/2025.

GALAN, Isabel; GLASSER, Fredrik P.; ANDRADE, Carmen. Calcium carbonate decomposition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 111, p. 1197–1202, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2290-x>. Acesso em: 11/07/2025.

GAIBOR, N.; COELHO, J.; LEITÃO, D.; MIRANDA, T.; TAVARES, P.; CRISTELO, N. Alkali activation of recycled ceramic aggregates from construction and demolition wastes. *Materiales de Construcción*, v. 70, n. 339, e222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2020.13619>. Acesso em: 02/07/2025.

GAIBOR, N.; LEITÃO, D.; BRIGA-SÁ, A.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N.; PEREIRA, E. N. B.; CUNHA, V. M. C. F. Development of half sandwich panels with alkali activated ceramic and slag wastes: mechanical and thermal characterization. *Buildings*, v. 15, n. 9, p. 1–27, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15091469>. Acesso em: 25/11/2025.

GAIBOR, N.; LEITÃO, D.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N.; FERNANDES, L.; PEREIRA, E. N. B.; CUNHA, V. M. C. F. Fiber reinforced alkali activated cements from ceramic waste and ladle furnace slag without thermal curing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 7, p. 1–12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14776>. Acesso em: 22/06/2025.

GAIBOR, N.; LEITÃO, D.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N.; PEREIRA, E. N. B.; CUNHA, V. M. C. F. Effect of polyacrylonitrile fiber on the properties of alkali activated ceramic/slag based mortar. *Journal of Building Engineering*, v. 44, p. 1–12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103367>. Acesso em: 03/09/2025.

GANJIAN, Eshmaiel; POUYA, Homayoon Sadeghi. Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 7, p. 1332–1343, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.028>. Acesso em: 15/10/2025.

GARCÍA-DÍAZ, A.; DELGADO-PLANA, P.; BUENO-RODRÍGUEZ, S.; ELICHE-QUESADA, D. Investigation of waste clay brick (chamotte) addition and activator modulus in the properties of alkaline activation cements based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, v. 84, art. 108568, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108568>. Acesso em: 06/10/2025.

GIROUDON, Marie; LAVIGNE, Matthieu Peyre; PATAPY, Cédric; BERTRON, Alexandra. Laboratory assessment of the contribution of aggressive chemical compounds to the degradation of Portland cement-based materials during anaerobic digestion. *Materials and Structures*, v. 54, n. 6, p. 1–17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01810-x>. Acesso em: 08/09/2025.

GUGGENHEIM, S.; CHANG, Y. H.; KOSTER VAN GROOS, A. F. Muscovite dehydroxylation: high temperature studies. *American Mineralogist*, v. 72, p. 537–550, 1987. DOI: <https://doi.org/10.2138/am-1987-5-610>. Acesso em: 15/01/2026

GUTBERLET, T.; HILBIG, H.; BEDDOE, R. E. Acid attack on hydrated cement — Effect of mineral acids on the degradation process. *Cement and Concrete Research*, v. 74, p. 35–43, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.011>. Acesso em: 03/12/2025.

GAO, X.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends. *Construction and Building Materials*, v. 80, p. 105–115, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065>. Acesso em: 02/12/2025.

HAMDAN, A.; SONG, H.; YAO, Z.; ALNAHHAL, M. F.; KIM, T.; HAJIMOHAMMADI, A. Modifications to reaction mechanisms, phase assemblages and mechanical properties of alkali-activated slags induced by gypsum addition. *Cement and Concrete Research*, v. 174, p. 107311, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107311>. Acesso em: 16/07/2025.

HORIZONTE. Secretaria Municipal de Educação. *Censo escolar*. Horizonte: Secretaria Municipal de Educação, 2009

HUIJGEN, W. J. J.; WITKAMP, G.-J.; COMANS, R. N. J. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. *Environmental Science & Technology*, v. 39, n. 24, p. 9676–9682, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1021/es050795f>. Acesso em: 06/08/2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo 2003*. Rio de Janeiro: IBGE, 2003

JAGADISHA, H. M.; PRASHANT, Shreelaxmi; PANDIT, Poornachandra; SANDEEP, G. S.; KAMAT, Raghavendra. Sulfate resistance of alkali-activated flyash-slag-lime concrete: comparative study of drying-wetting cycles and conventional exposure. *Materials Research Express*, v. 11, n. 10, p. 105301, 2024. DOI: 10.1088/2053-1591/ad7fb9. DOI: 10.1088/2053-1591/ad7fb9. Acesso em: 09/09/2025.

JIANG, Y.; LING, T. C.; SHI, C.; PAN, S. Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete – A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 136, p. 187–197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>. Acesso em: 08/08/2025.

KANAAN, Dima; SOLIMAN, Ahmed M.; SAFHI, Amine el Mahdi. External sulfate attack ambient-cured one-part alkali-activated self-consolidating concrete. *Sustainability*, v. 15, n. 5, p. 4127, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054127>. Acesso em: 10/11/2025.

KHAN, Md Ikramullah; RAM, V. Vinayaka; PATEL, Vipulkumar Ishvarbhai. Durability performance of alkali-activated concrete with pre-treated coarse recycled aggregates for pavements. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 13776, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-13776>. Acesso em: 02/01/2026.

KWASNY, J.; AIKEN, T. A.; SOUTSOS, M. N.; CLELAND, D. J.; MCINTOSH, J. A. Comparison of lithomarge and cement-based mortars performance in aggressive aqueous environments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES, 6., 2018, Leeds. *Proceedings [...]*. Leeds: University of Leeds, 2018. p. 160–169.

KURTAY-YILDIZ, M.; EMIROĞLU, M. Synergistic effect of steel and PVA fibers on the mechanical and microstructural performance of ceramic waste-GGBS-based green composites. *Construction and Building Materials*, v. 491, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142653>. Acesso em: 23/10/2025.

LARA, Marilda Lopes Ginez de; SMIT, Johanna Wilhelmina. *Temas de pesquisa em Ciência da Informação no Brasil*. São Paulo: Escola de Comunicações e Artes da Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.repositoriobib.ufc.br/000005/00000588.pdf>. Acesso em: 21/01/2026.

LEÃO, Pablo Bruno Paiva. [Entrevista concedida ao Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas]. Fortaleza: ArcelorMittal, 2025.

LEMOUGNA, Patrick N.; MACKENZIE, Kenneth J. D.; MELO, U. F. Chinje. Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, v. 37, n. 8, p. 3011–3018, dez. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>. Acesso em: 01/02/2026.

LEI, Z.; QI, W.; ZHANG, L.; YANG, J.; ZHUORUI, Z. Preparation and comprehensive performance optimization of green insulation building materials based on blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, v. 106, art. 112591, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112591>. Acesso em: 29/11/2025.

L. Raphael Rodrigues, J.A. Junkes, A. Savazzini-Reis, D.M. Louzada, V.P.D. Sagrillo, Potential use of Kraft pulp mill and flat glass cutting wastes in red ceramic products, *Ceramics International*. 47 (2021) 17971–17979. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.111>. Acesso em: 27/12/2025.

LI, L.; WU, M. An overview of utilizing CO₂ for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 60, p. 102000, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102000>. Acesso em: 19/08/2025.

LI, Z.; DONG, H.; ZHAO, X.; WANG, K.; GAO, X. Utilisation of Bayer red mud for high-performance geopolymer: competitive roles of different activators. *Case Studies in*

Construction Materials, v. 23, e05047, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05047>. Acesso em: 05/07/2025.

LIMA, R. A. F. et al. Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees. *Science*, v. 383, n. 6670, p. 120–125, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abq5099>. Acesso em: 02/10/2025.

LIU, X.; ZUO, Y.; YANG, F.; ZUO, J.; LIU, A.; HUANGFU, H.; LYU, K.; XIE, X.; SHAH, S. P. Evaluation of fresh property, compressive strength and environmental impact of low-carbon geopolymer based on ladle furnace slag and soda residue. *Materials*, v. 18, n. 7, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18071552>. Acesso em: 21/08/2025.

LUO, Y.; KLIMA, K. M.; BROUWERS, H. J. H.; YU, Q. Effects of ladle slag on Class F fly ash geopolymer: reaction mechanism and high temperature behavior. *Cement and Concrete Composites*, v. 129, p. 104468, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104468>. Acesso em: 12/10/2025.

LUNA-GALIANO, Y.; FERNÁNDEZ-PEREIRA, C.; IZQUIERDO, M. Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers: relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength. *Materiales de Construcción*, v. 66, n. 324, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2016.10215>. Acesso em: 07/07/2025.

MAMMADOV, Orkhan; MAHMOUD, Ahmed Abdulhamid; AL-YASERI, Ahmed; RAMADAN, Mustafa Al. A comprehensive review of cement degradation analysis under downhole conditions: CCS/CCUS/CO₂-EOR applications. *ACS Omega*, v. 9, n. 9, p. 9473–9492, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11295>. Acesso em: 02/06/2025.

MAWIRE, Godfrey; McDONALD, Robbie; ESTEBAN, Lionel; AUSTIN, Peter; MUKHERJEE, Abhijit; DHAMI, Navdeep. Understanding the deterioration mechanism of geopolymers for application in acidic systems used for in situ recovery (ISR). *Cleaner Engineering and Technology*, v. 30, p. 101116, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101116>. Acesso em: 06/01/2026.

McLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 9–10, p. 1082–1090, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>. Acesso em: 09/12/2025.

MENDES, B. C.; PEDROTI, L. G.; VIEIRA, C. M. F.; CARVALHO, J. M. F.; RIBEIRO, J. C. L.; ALBUINI-OLIVEIRA, N. M.; ANDRADE, I. K. R. Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, e00847, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00847>. Acesso em: 15/10/2025.

MENGASINI, Laura; MAVROULIDOU, Maria; GUNN, Michael J. Alkali-activated concrete mixes with ground granulated blast furnace slag and paper sludge ash in seawater environments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 20, 100380, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100380>. Acesso em: 05/10/2025.

MOHAMMED, Marwah H.; MOHAMMED, Mahmoud Khashaa. Sulfate resistance and microstructure changes of sustainable self-compacting concrete containing micro to nano waste materials. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 15, n. 5, p. 27908–27914, 2025. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.13109>. Acesso em: 02/10/2025.

MOODI, F.; HANAFI, M. R.; SHARIATINIA, Z. Toward high sustainability using fully recycled geopolymers concrete: mechanical, rheological, and microstructural properties. *RSC Advances*, Issue 28, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5RA02249E>. Acesso em: 14/09/2025.

MUELLER, Suzana Pinheiro Machado; PERUCCHI, Valmira. Universidades e a produção de patentes: tópicos de interesse para o estudioso da informação tecnológica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, Belo Horizonte, v. 19, n. 2, p. 15–36, 2014

NANTHINI, S.; SIVAKUMAR, M.; SIVAKUMAR, P. Studies on alkaline activator, manufacturing methods and mechanical properties of geopolymers concrete – A review. *Journal of Environmental Nanotechnology*, v. 9, n. 2, p. 242–253, 2024. DOI: <https://doi.org/10.13074/jent.2024.09.242753>. Acesso em: 08/11/2025.

NASIR, M.; JOHARI, M. A. M.; MASLEHUDDIN, M.; YUSUF, M. O.; AL-HARTHI, M. A. Influence of heat curing period and temperature on the strength of silico-manganese fume-blast furnace slag-based alkali-activated mortar. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118961, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118961>. Acesso em: 02/10/2025.

NASROLLAHZADEH, Kourosh; ROSTAMI, Majid. Experimental investigation on durability of One-Part and Two-Part Alkali-Activated slag concretes in sulfuric acid environment: Development of a durability index and CO₂ emission assessment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 51, n. 4, p. 4171–4198, 2026

NEDUNURI, Aparna Sai Surya Sree; MUHAMMAD, Salman. Fundamental understanding of the setting behaviour of the alkali activated binders based on ground granulated blast furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 291, p. 123243, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123243>. Acesso em: 12/11/2025.

NG, H.-T.; HEAH, C. Y.; KONG, E. H.; AL BAKRI ABDULLAH, M. M.; LIEW, Y. M.; MD RAZI, H.; NG, Y.-S. Formulation, mechanical properties and phase analysis of fly ash geopolymers with ladle furnace slag replacement. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 14, p. 1111–1123, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.065>. Acesso em: 02/01/2026.

NGUYEN, TING; TANG, SI; DONG, YAO-RONG; LUO, JIANG-HUA. A review of the thermal and mechanical characteristics of alkali-activated composites at elevated temperatures. *Buildings*, v. 15, n. 5, art. 738, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15050738>. Acesso em: 04/02/2026.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: a review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 7, p. 1305–1314, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>. Acesso em: 01/11/2025.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIT, P. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Sawston; Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.

PANIAS, Dimitrios; GIANNOPOULOU, Ioanna P.; PERRAKI, Theodora. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 301, n. 1–3, p. 246–254, 2007. DOI:

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, Luiz A.; CASTRO-GOMES, João P.; SANTOS, Pedro M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 197–203, jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>. Acesso em: 02/10/2025.

PIATAK, N. M.; PARSONS, M. B.; SEAL, R. R. Environmental geochemistry of slags and other residual materials from metallurgical processes. *Applied Geochemistry*, v. 57, p. 236–266, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>. Acesso em: 09/12/2025.

PINHEIRO, C.; RIOS, S.; FONSECA, A. V.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; CRISTELO, N. Application of the response surface method to optimize alkali activated cements based on low-reactivity ladle furnace slag. *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120271, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120271>. Acesso em: 13/09/2025.

PRESERVAÇÃO do meio ambiente: manifesto do chefe de Seattle ao presidente dos EUA. São Paulo: Babel Cultural, 1987

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>. Acesso em: 23/18/2025.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. *Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report*. RILEM TC 224-AAM. Dordrecht: Springer, 2014

PULIGILLA, Sravanthi; MONDAL, Paramita. Co-existence of aluminosilicate and calcium silicate gel characterized through selective dissolution and FTIR spectral subtraction. *Cement and Concrete Research*, v. 70, p. 39–49, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.006>. Acesso em: 13/07/2025.

PwC. *Capacitação da indústria da Cerâmica Portuguesa – Um cluster, uma estratégia, mercados prioritários*. Portugal. 2016.

PYATINA, T.; SUGAMA, T. Role of tartaric acid in chemical, mechanical and self-healing behaviors of a calcium-aluminate cement blend with fly ash F under steam and alkali carbonate environments at 270 °C. *Materials*, v. 10, n. 4, art. 342, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10040342>. Acesso em: 02/10/2025.

QURESHI, Yasmeen; PAL, Biswajit; SINGH, Sanjeev Kumar. Influence of novel activation techniques on mechanical and microstructural characteristics of alkali activated one-part binder. *Construction and Building Materials*, v. 475, p. 141273, 2025

RAFEET, A.; VINAI, R.; SOUTSOS, M.; SHA, W. Guidelines for mix proportioning of fly ash/GGBS based alkali activated concretes. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 130–142, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.036>. Acesso em: 26/10/2025.

RASHAD, Alaa M.; OUDA, Ahmed S. Effect of tidal zone and seawater attack on high-volume fly ash pastes enhanced with metakaolin and quartz powder in the marine environment. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 324, 111261, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111261>. Acesso em: 25/10/2025.

REES, C. A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Attenuated total reflectance Fourier transform infrared analysis of fly ash geopolymer gel aging. *Langmuir*, v. 23, n. 15, p. 8170–8179, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1021/la700713g>. Acesso em: 05/09/2025.

REES, C. A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. In situ ATR-FTIR study of the early stages of fly ash geopolymer gel formation. *Langmuir*, v. 23, n. 17, p. 9076–9082, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1021/la701185g>. Acesso em: 06/17/2025.

REZENDE, G. M. C.; ELÓI, F. P. F.; DEFÁVERI, K. C. S.; PEIXOTO, R. A. F.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J. Estudo da atividade pozolânica da escória de forno panela. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 2018. Disponível em: <https://metallum.com.br/23cbecimat/anais/PDF/IIIn13-013.pdf>. Acesso em: 01/09/2025.

RETAMAL-ROJAS, M.; APONTE, D.; VALENCIA-SAAVEDRA, W.; ROBAYO-SALAZAR, R.; BARRA-BIZINOTTO, M. Hybrid binders through alkaline activation of fine construction and demolition waste. *Materials*, v. 18, n. 14, p. 3227, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18143227>. Acesso em: 16/09/2025.

ROSAS, Anny Jacqueline Cysne. *Sustentabilidade da atividade produtora de água envasada em Fortaleza, CE*. 2008. 186 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008

RUSLAN, Ibragimov; SHAKIRZYANOV, Farid; KAYUMOV, Rashit; KOROLEV, Evgeny. The influence of the aggressive medium upon the degradation of concrete structures: numerical model of research. *Buildings*, v. 14, n. 6, p. 1762, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14061762>. Acesso em: 25/06/2025.

SAHOO, Soumyaprakash; SINGH, Suresh Prasad. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers. *Construction and Building Materials*, v. 323, p. 127078, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127078>. Acesso em: 02/10/2025.

SILVA, Carina. *Educação corporativa: um estudo sobre práticas de aprendizagem organizacional*. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em: https://reciclos.ufop.br/sites/default/files/reciclos/files/tcc_carina.pdf?m=1567474525. Acesso em: 02/10/2025.

SARFRAZ, S.; SHERIF, Z.; DREWNIOK, M.; BOLSON, N.; CULLEN, J.; PURNELL, P.; JOLLY, M.; SALONITIS, K. Potentials for energy savings and carbon dioxide emissions reduction in cement industry. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer, 2025. p. 765–773. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-77429-4_85. Trabalho apresentado no GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANUFACTURING (GCSM), 2023.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>. Acesso em: 05/12/2025.

SEDIRA, Naim; CASTRO-GOMES, João; MAGRINHO, Manuel. Red clay brick and tungsten mining waste-based alkali-activated binder: microstructural and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, v. 190, p. 1034–1048, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.054>. Acesso em: 02/11/2025.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: the geopolymer revolution. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>. Acesso em: 02/10/2025.

SILVA, Antonio Vanutti Galvão da. *Utilização de cimento álcali-ativado para produção de cobogó*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/69939>. Acesso em: 16/06/2025.

SILVA, M. et al. Single immunizations of self-amplifying or non-replicating mRNA-LNP vaccines control HPV-associated tumors in mice. *Science Translational Medicine*, v. 15, n. 686, p. eabn3464, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.abn3464>

SILVA, T.; SOUZA, E.; MARIANO, E.; FERREIRA, G.; OSÓRIO, W. R. Long-term performance of mortars with combined incorporation of ladle furnace slag and metakaolin. *Buildings*, v. 14, n. 9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14092762>. Acesso em: 02/08/2025.

SINGH, Jagmeet; SINGH, S. P. Development of alkali-activated cementitious material using copper slag. *Construction and Building Materials*, v. 211, p. 73–79, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.233>. Acesso em: 02/10/2025.

SISS, Ahyas. Afro-brasileiros e educação superior: notas para debates. In: COSTA, Hilton; PINHEL, André; SILVEIRA, Marcos Silva da (org.). *Uma década de políticas afirmativas: panorama, argumentos e resultados*. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012. p. 18–26

SKVÁRA, S.; KOPECKÝ, L.; SMILAUER, V.; BITTNAR, Z. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, v. 168, n. 2–3, p. 711–720, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.089>. Acesso em: 15/02/2025.

SOMNA, K.; JATURAPITAKKUL, C.; KAJITVICHYANUKUL, P.; CHINDAPRASIRT, P. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, v. 90, n. 6, p. 2118–2124, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.018>. Acesso em: 05/01/2026.

SUN, J.; CHEN, Z. Effect of silicate modulus of water glass on the hydration of alkali-activated converter steel slag. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 138, p. 47–56, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08146-3>. Acesso em: 02/10/2025.

SUTCU, M. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, v. 41, n. 2, pt. B, p. 2819–2827, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.102>. Acesso em: 05/01/2026.

TARAPANOFF, K. Educação corporativa. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE GESTÃO DO CONHECIMENTO E INTELIGÊNCIA COMPETITIVA, 1., 2006, Curitiba. *Anais [...]*. Curitiba: CIETEP, 2006. p. 59–70. Disponível em: <<http://www.gecic.com.br>>. Acesso em: 22 out. 2025.

TAVARES, M. L.; TARGINO, D. L. L.; CABRAL, A. E. B.; COSTA, H. N. da. Evaluation of the effect of curing conditions on compressive strength and microstructure of alkali-activated binders. *Labor E Engenharia*, v. 18, e024006, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20396/labore.v18i00.8676085>. Acesso em: 05/01/2026.

TING, Matthew Zhi Yeon; YI, Yaolin. Durability of cementitious materials in seawater environment: a review on chemical interactions, hardened-state properties and environmental factors. *Construction and Building Materials*, v. 284, 122837, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122837>. Acesso em: 05/01/2026.

TRISTÃO, Ana Maria Delazari; FACHIN, Gleisy Regina Bóries; ALARCON, Orestes Estevam. Sistema de classificação facetada e tesouros: instrumentos para organização do conhecimento. *Ciência da Informação*, Brasília, DF, v. 33, n. 2, p. 172–178, 2004. Disponível em: <http://revista.ibict.br/ciinf/index.php/ciinf/article/view/265/233>. Acesso em: 13/01/2026.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymers and OPC concrete. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 125–130, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>. Acesso em: 09/01/2026.

UDHAYA KUMAR, T. et al. Evaluation of non-destructive testing and long-term durability of geopolymer aggregate concrete. *Frontiers in Built Environment*, v. 10, p. 1454687, 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. *Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ufc.br/wp-content/uploads/2019/10/guia-de-citacao-06.10.2019.pdf>. Acesso em: 08/01/2026.

VALÁŠKOVÁ, M.; MARTYNKOVÁ, G. S.; SMETANA, B.; ŠTUDENTOVÁ, S. Influence of vermiculite on the formation of porous cordierites. *Applied Clay Science*, v. 46, n. 2, p. 196–201, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.003>. Acesso em: 20/01/2026.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LUKEY, G. C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, v. 89, n. 1–3, p. 63–73, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6). Acesso em: 13/01/2026.

VOTORANTIM CIMENTOS. *Relatório Anual 2021*. São Paulo: Votorantim Cimentos, 2021. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/>. Acesso em: 05/01/2026.

WARDHONO, Arie; RISDIANTO, Yogie; SABARIMAN, Bambang; HIDAJATI, Ninik Wahju; ANDAJANI, Nur. The effect of sodium silicate to NaOH ratio on strength development of fly ash geopolymer mortar in marine environment. *E3S Web of Conferences*, v. 445, p. 01005, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202344501005. Trabalho apresentado no GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANUFACTURING, 2023. Disponível em: 10.1051/e3sconf/202344501005. Acesso em: 17/06/2025.

WANG, Wenrui; XU, Shilang; LI, Qinghua; DONG, Shilin. Long-term performance of fiber reinforced cementitious composites with high ductility under seawater attack with different salinities. *Construction and Building Materials*, v. 317, 126164, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126164>. Acesso em: 06/01/2026.

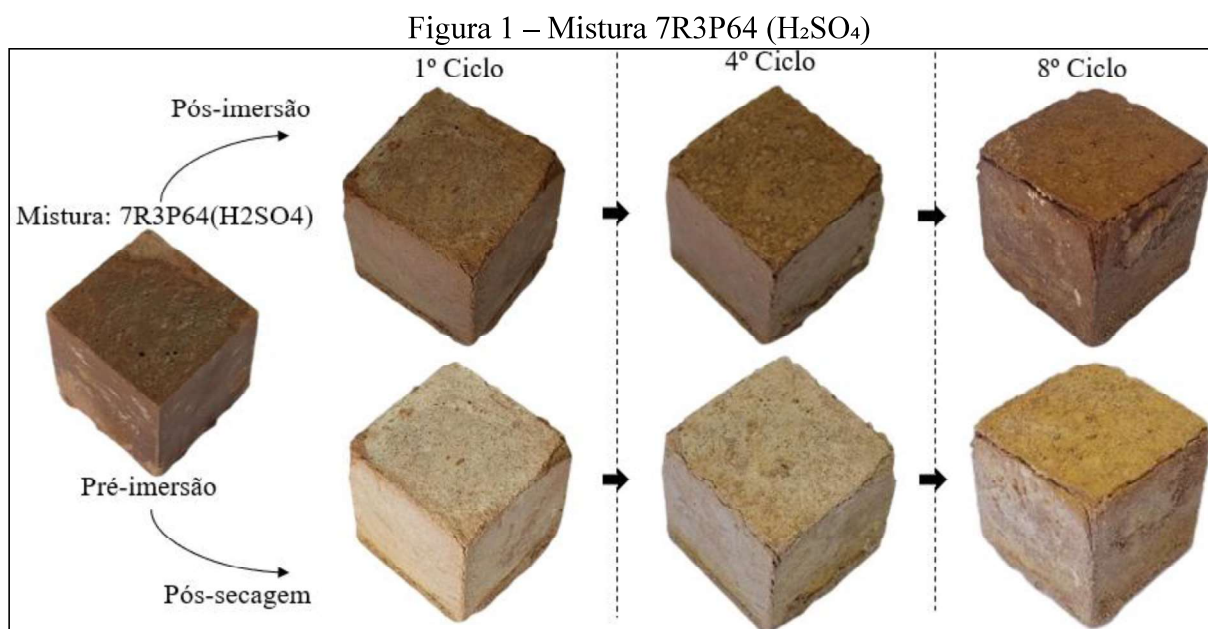
YONG-SING, N.; YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; ABDULLAH, M. M. A. B.; CHAN, L. W. L.; HUI-TENG, N.; SHEE-WEEN, O.; WAN-EN, O.; YONG-JIE, H. Evaluation of flexural properties and characterisation of 10-mm thin geopolymer based on fly ash and ladle furnace slag. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 163–176, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.016>. Acesso em: 04/01/2026.

YOUSSEF, O.; ABBASS, A. M.; AHMED, A. K.; TAWHIA, A. M. Sustainable high performance geopolymer concrete: the role of recycled industrial wastes in strength, durability, and microstructure enhancement. *Infrastructures*, v. 10, n. 9, p. 1–23, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10090241>. Acesso em: 22/09/2025.

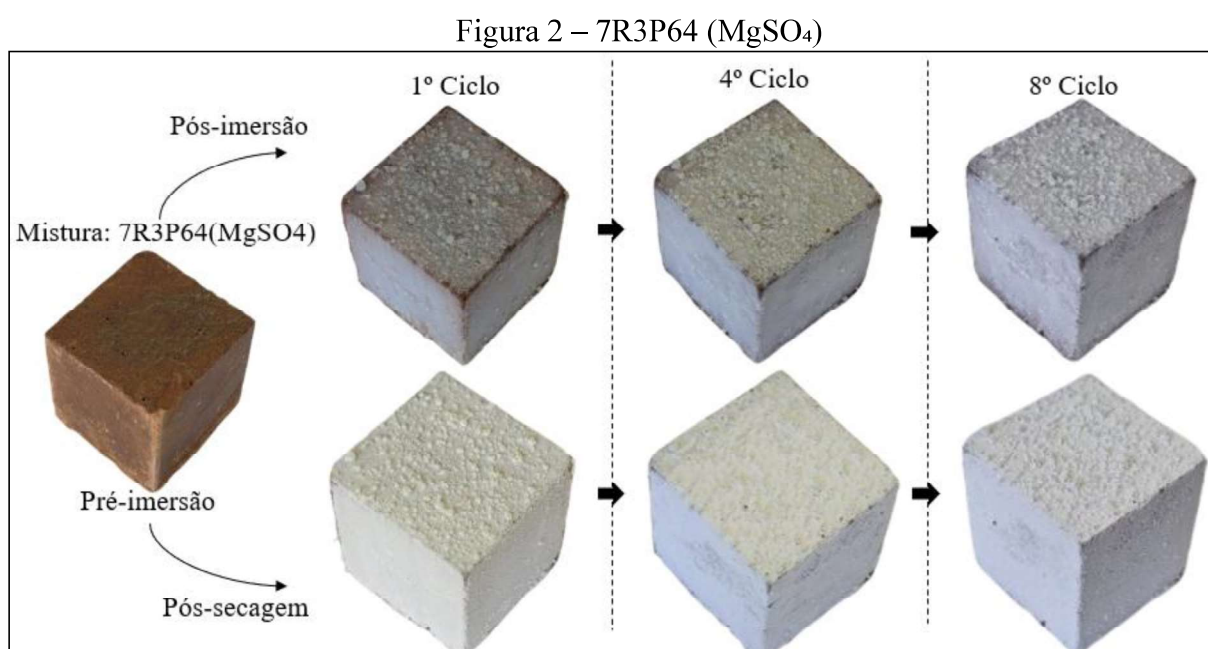
ZHANG, Nan; HEDAYAT, Ahmadreza; FIGUEROA, Linda; STEIRER, Kenneth X.; LI, Haoyuan; SOSA, Héctor Gelber Bolaños; BERNAL, Roberto Pedro Huamani; TUPA, Néstor; MORALES, Isaac Yanqui; LOZA, Reynaldo Sabino Canahua. Experimental studies on the durability and leaching properties of alkali-activated tailings subjected to different environmental conditions. *Cement and Concrete Composites*, v. 130, 104531, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104531>. Acesso em: 01/02/2026.

ZHANG, Zhipeng; JIA, Yanmin; LIU, Jinliang. Influence of different parameters on the performance of alkali-activated slag/fly ash composite system. *Materials*, v. 15, n. 8, p. 2714, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15082714>. Acesso em: 26/01/2026.

ANEXO A – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DAS MISTURAS AO LONGO DOS CICLOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÕES SIMULANDO AMBIENTES AGRESSIVOS

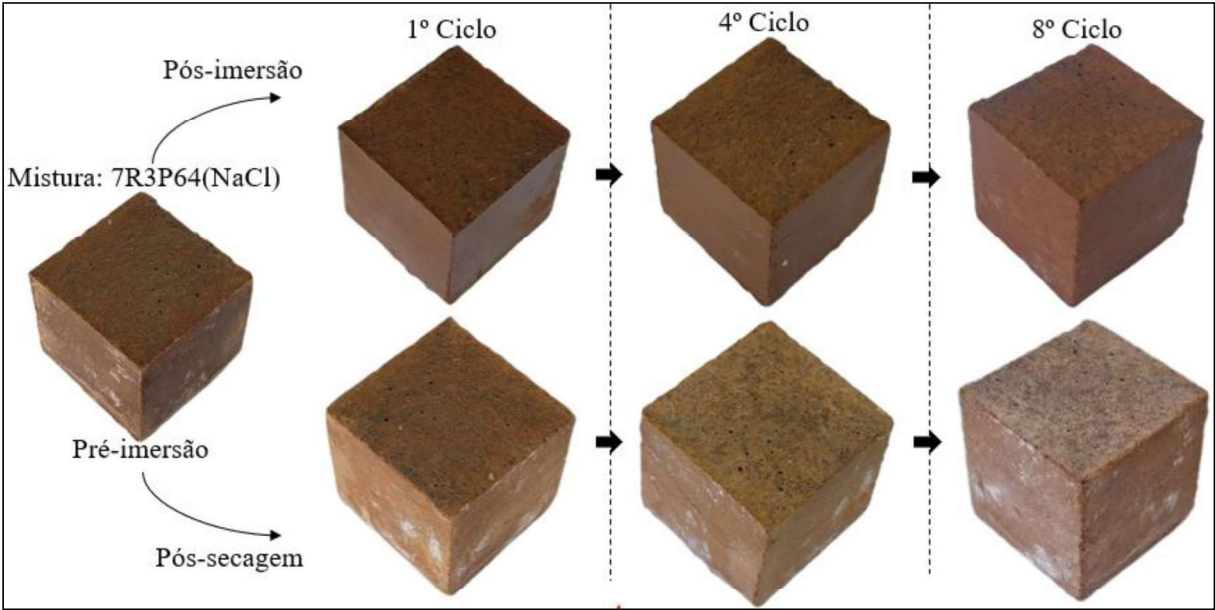


Fonte: Autor, 2026



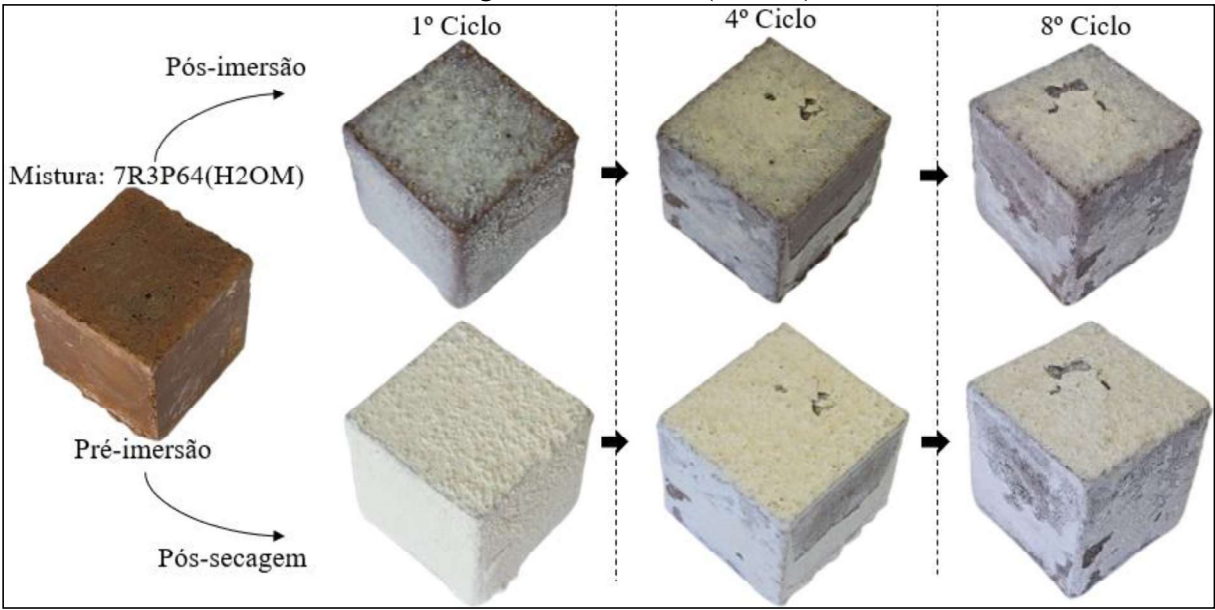
Fonte: Autor, 2026

Figura 3 – 7R3P64 (NaCl)

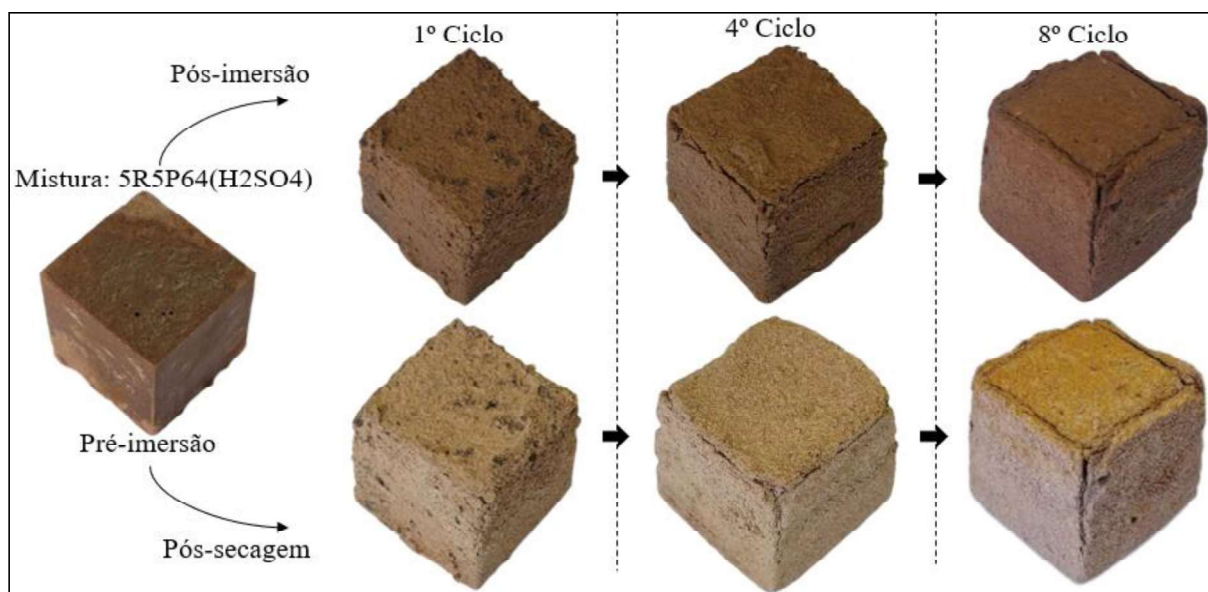


Fonte: Autor, 2026

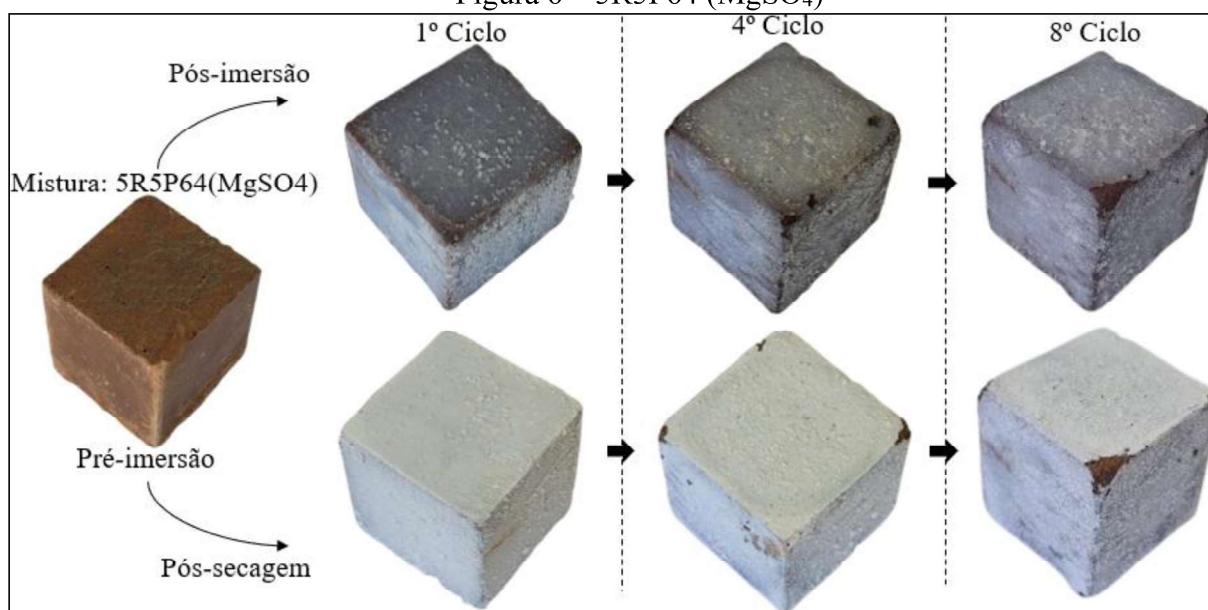
Figura 4 – 7R3P64 (H2OM)



Fonte: Autor, 2026

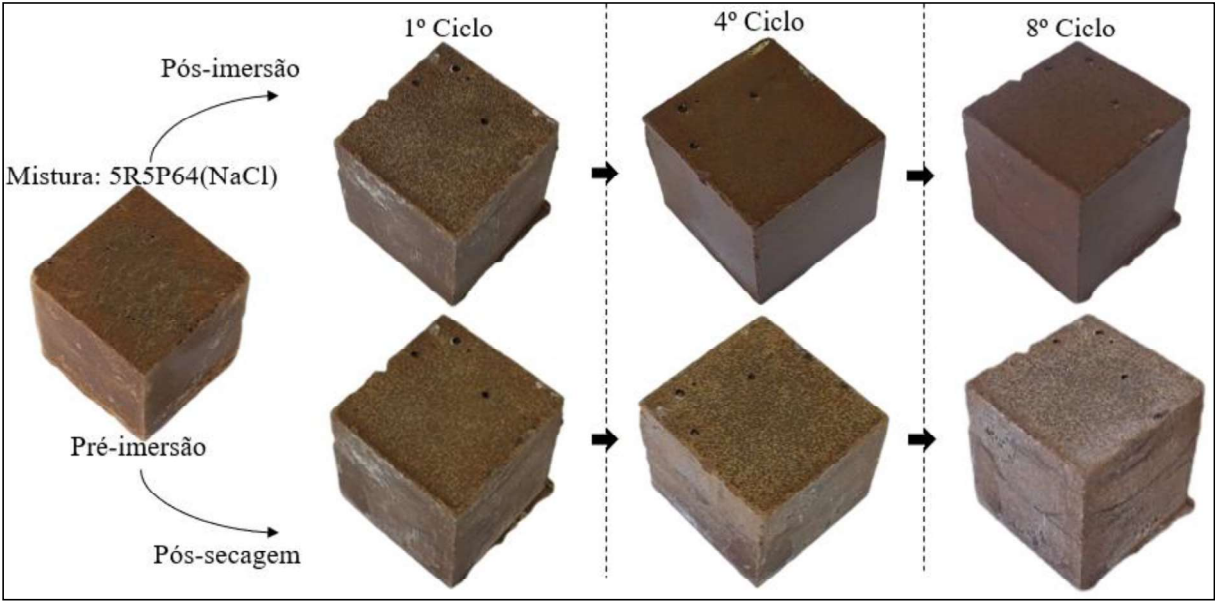
Figura 5 – 5R5P64 (H_2SO_4)

Fonte: Autor, 2026

Figura 6 – 5R5P64 (MgSO_4)

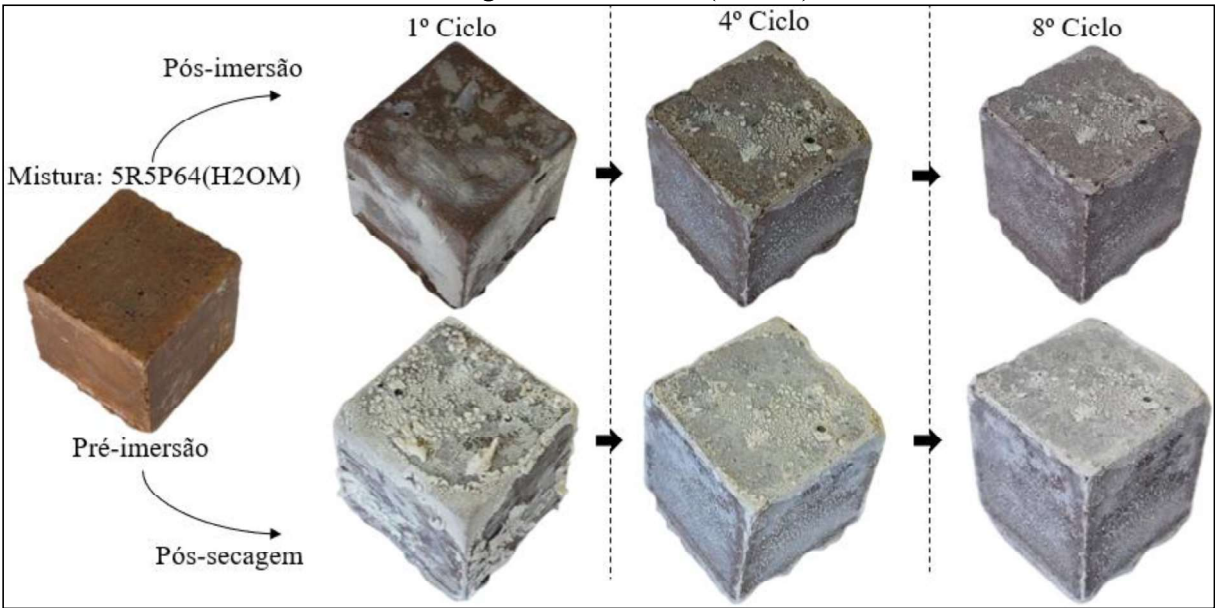
Fonte: Autor, 2026

Figura 7 – 5R5P64 (NaCl)



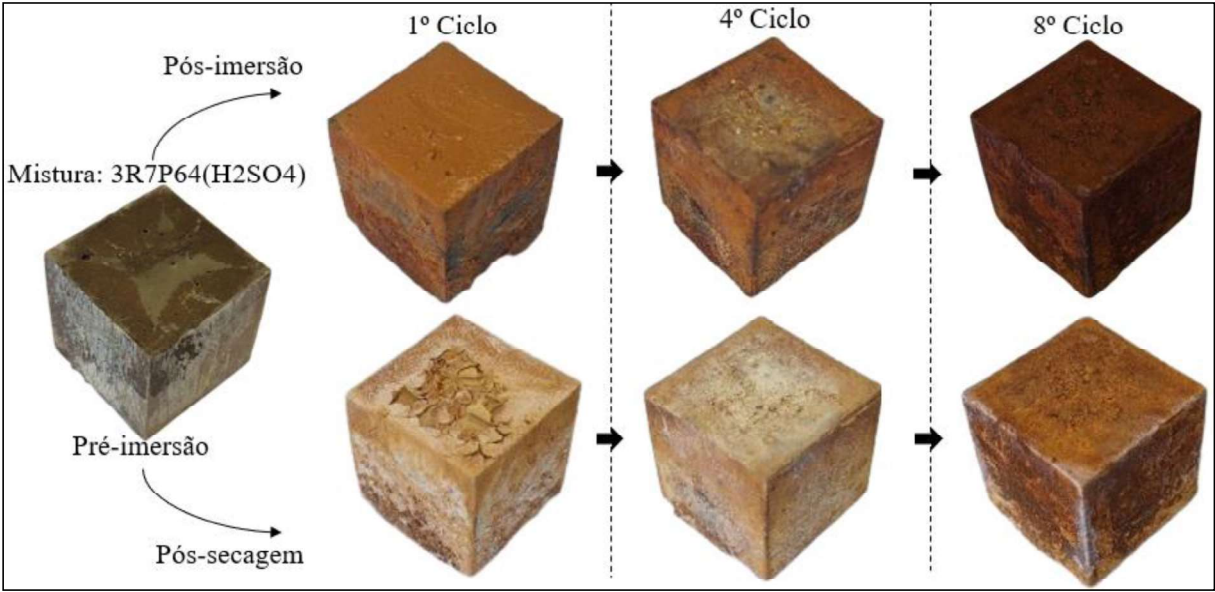
Fonte: Autor, 2026

Figura 8 – 5R5P64 (H₂OM)



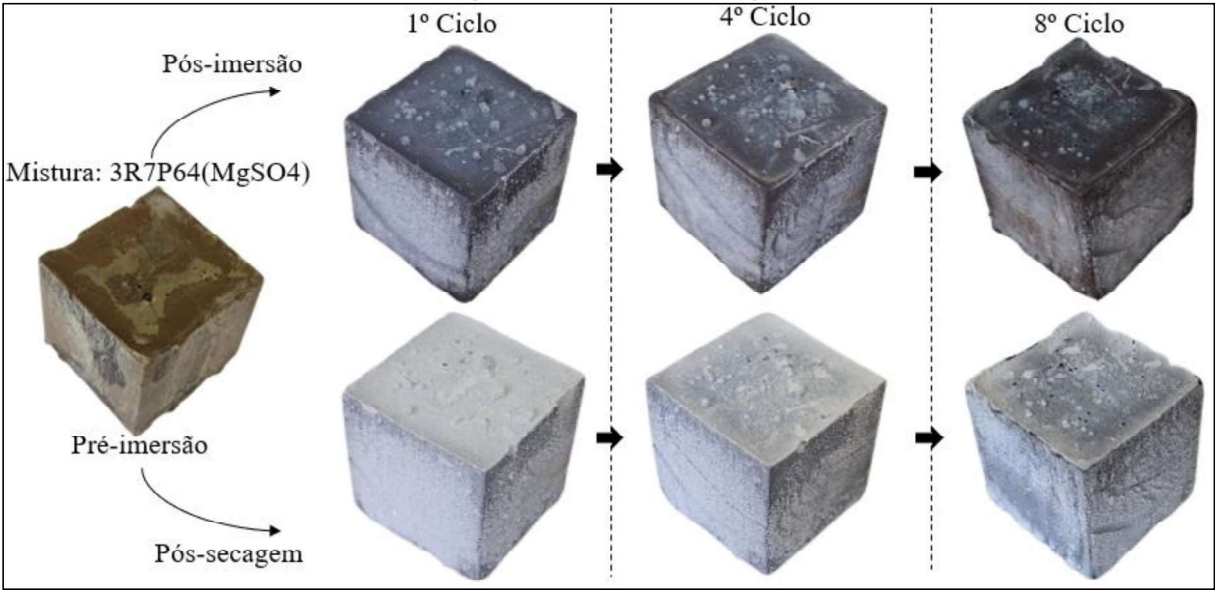
Fonte: Autor, 2026

Figura 9 – 3R7P64 (H₂SO₄)



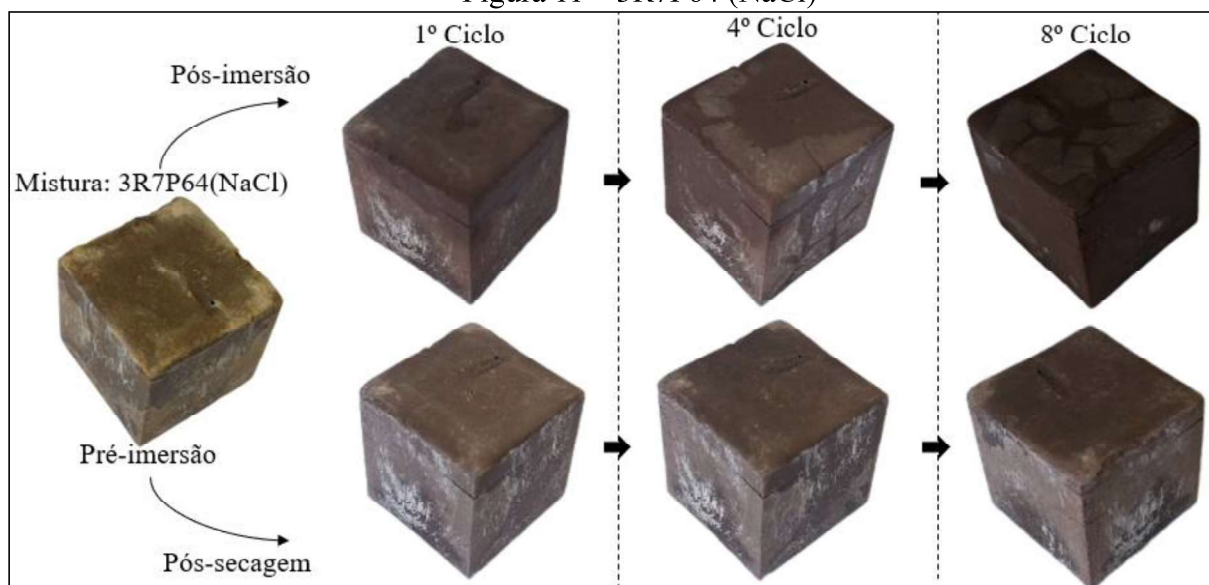
Fonte: Autor, 2026

Figura 10 – 3R7P64 (MgSO₄)

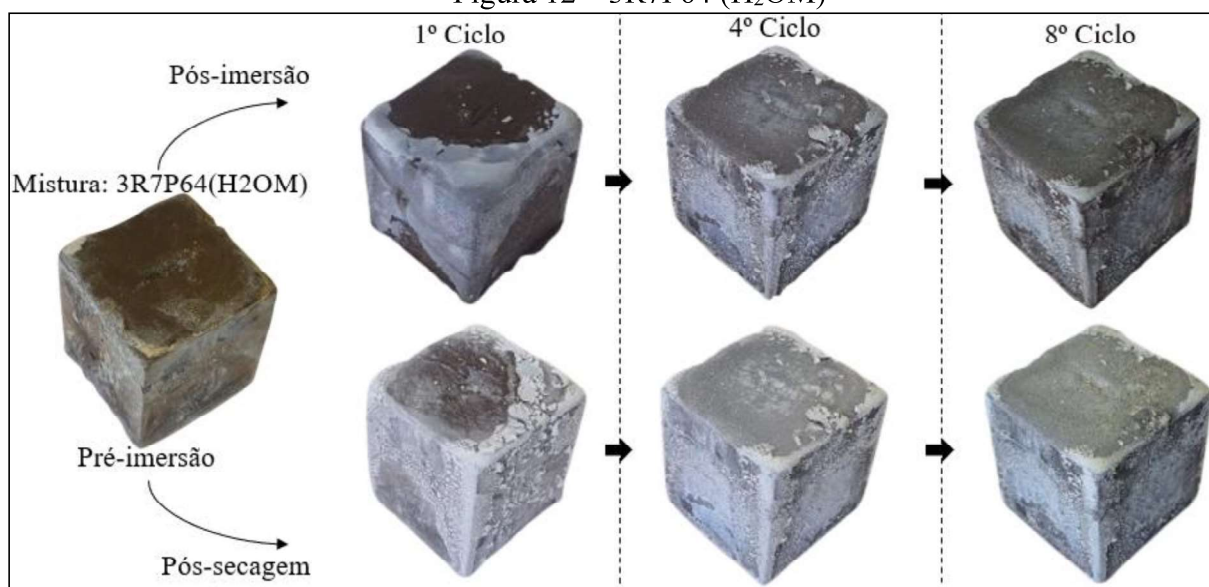


Fonte: Autor, 2026

Figura 11 – 3R7P64 (NaCl)

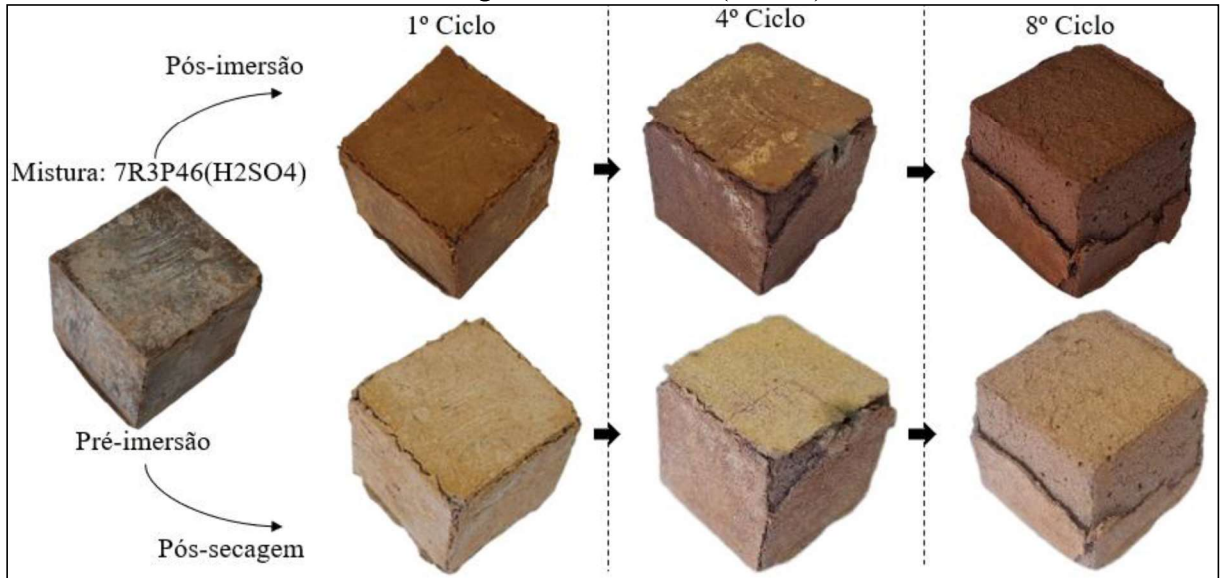


Fonte: Autor, 2026

Figura 12 – 3R7P64 (H₂OM)

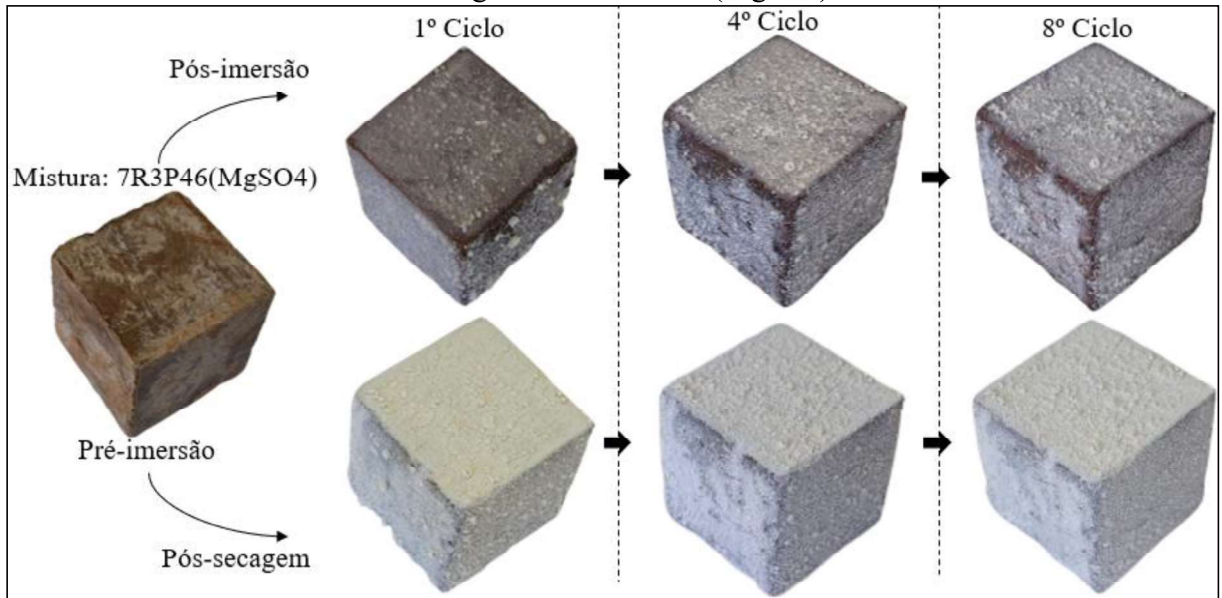
Fonte: Autor, 2026

Figura 13 – 7R3P46 (H_2SO_4)



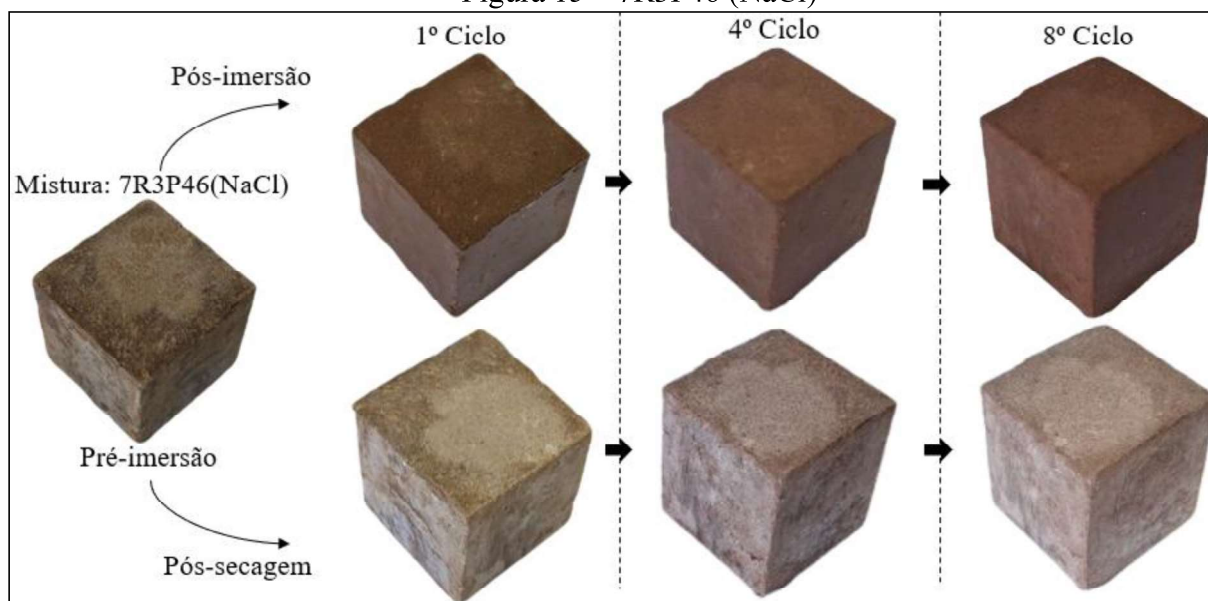
Fonte: Autor, 2026

Figura 14 – 7R3P46 (MgSO_4)

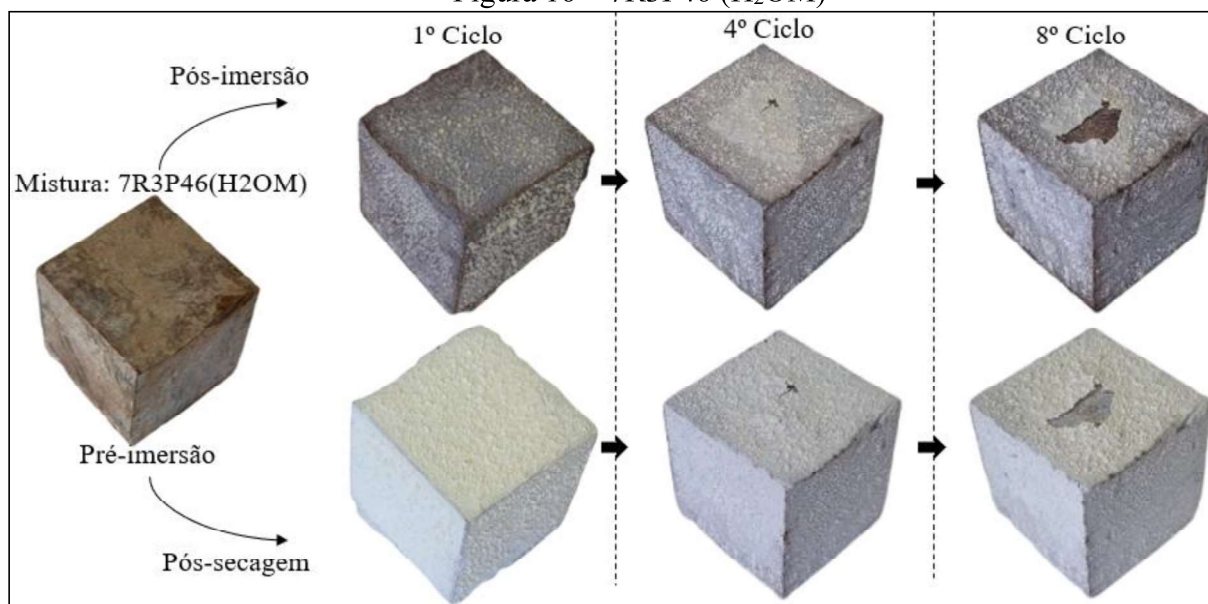


Fonte: Autor, 2026

Figura 15 – 7R3P46 (NaCl)

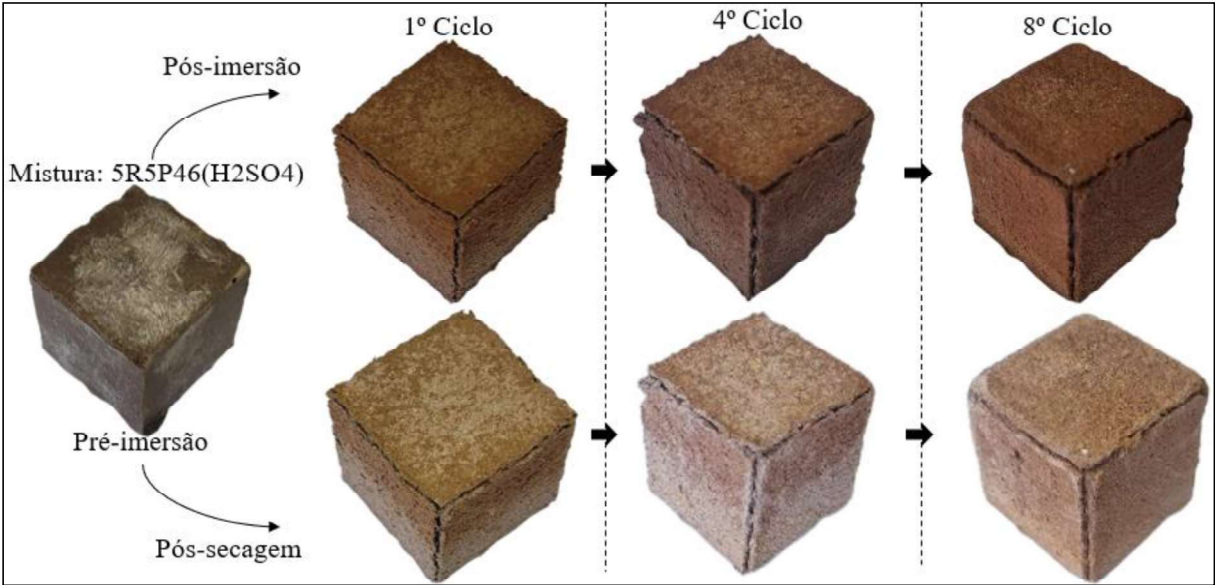


Fonte: Autor, 2026

Figura 16 – 7R3P46 (H₂OM)

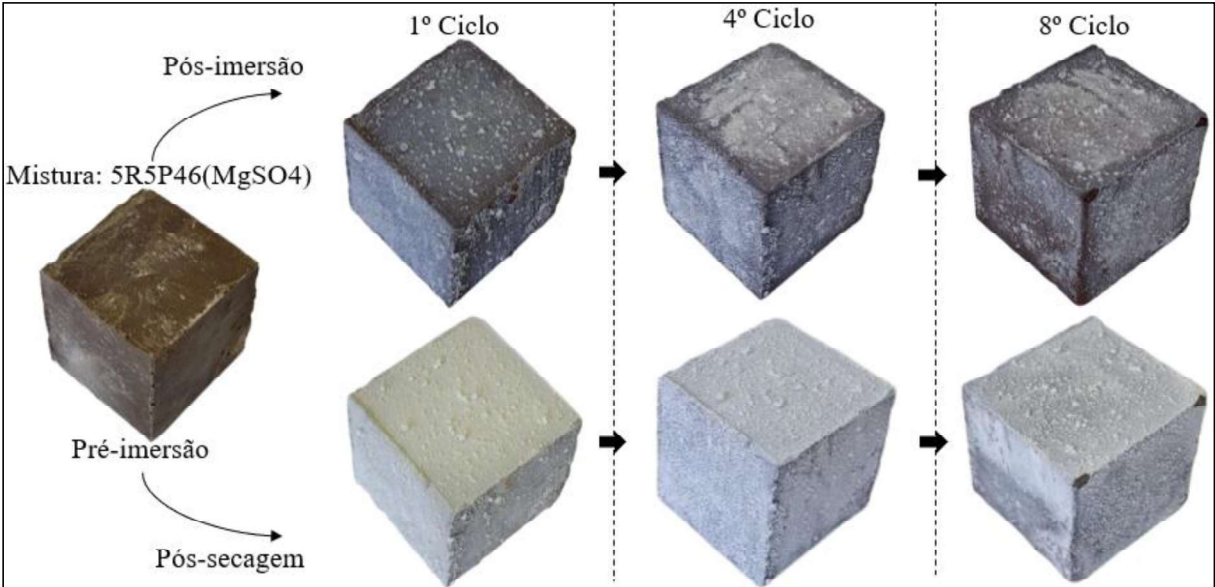
Fonte: Autor, 2026

Figura 9 – 5R5P46 (H₂SO₄)



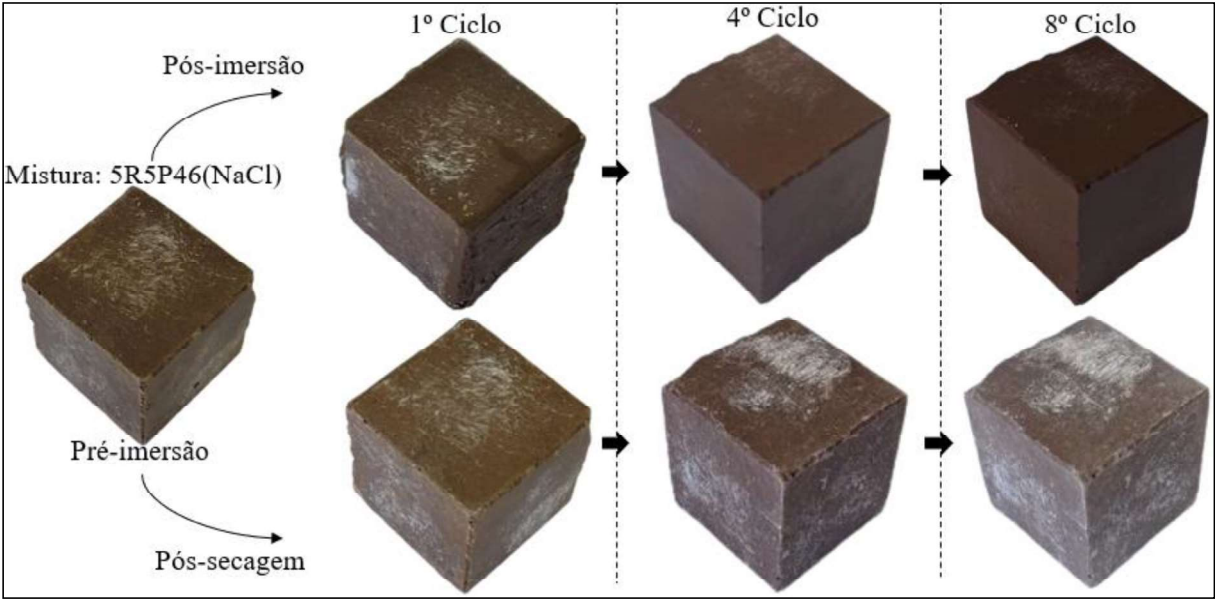
Fonte: Autor, 2026

Figura 18 – 5R5P46 (MgSO₄)



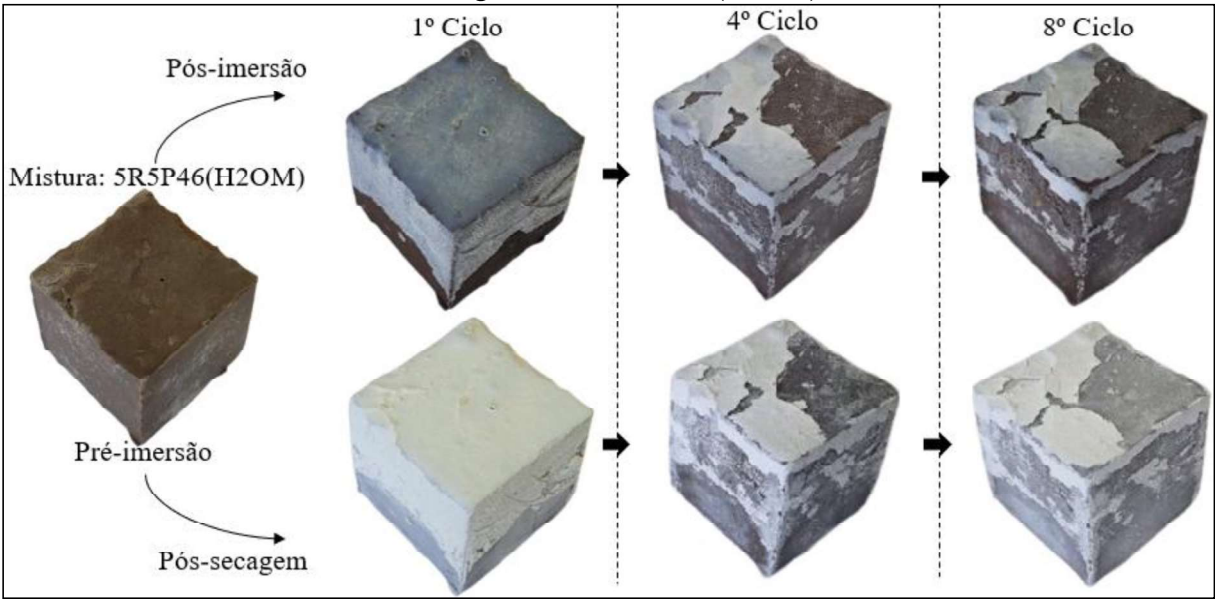
Fonte: Autor, 2026

Figura 19 – 5R5P46 (NaCl)



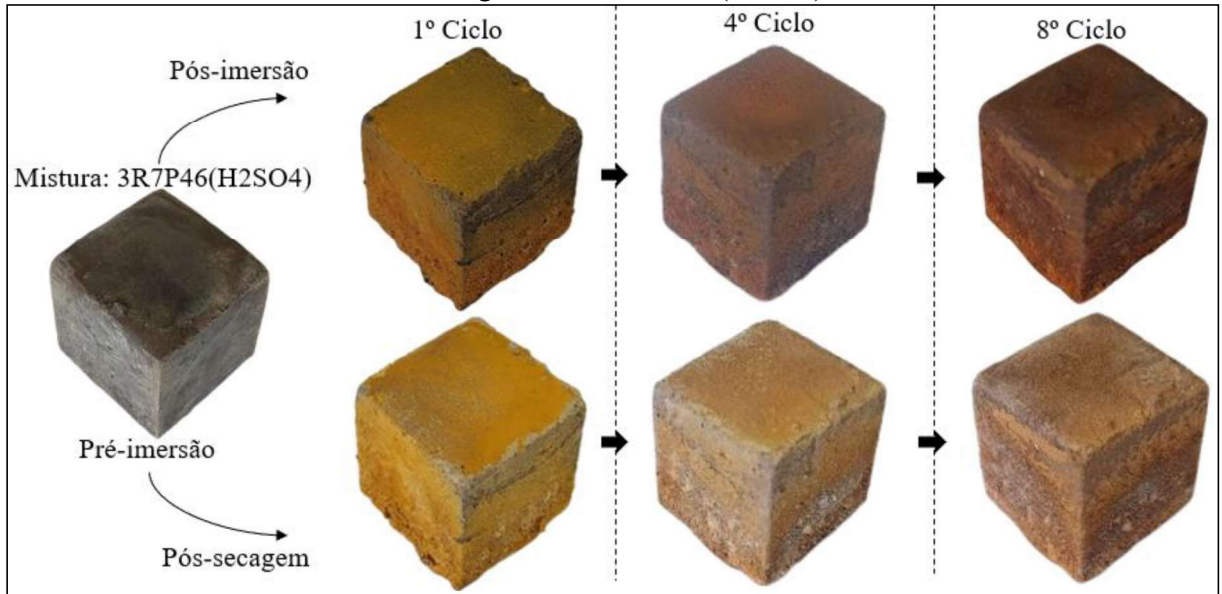
Fonte: Autor, 2026

Figura 20 – 5R5P46 (H₂OM)



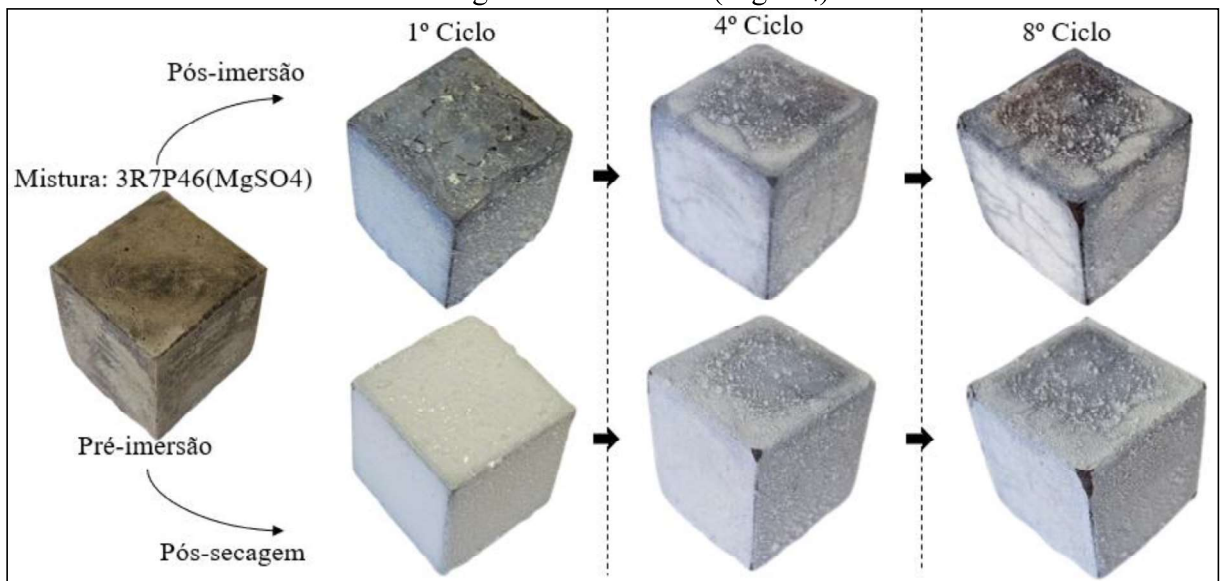
Fonte: Autor, 2026

Figura 21 – 3R7P46 (H_2SO_4)



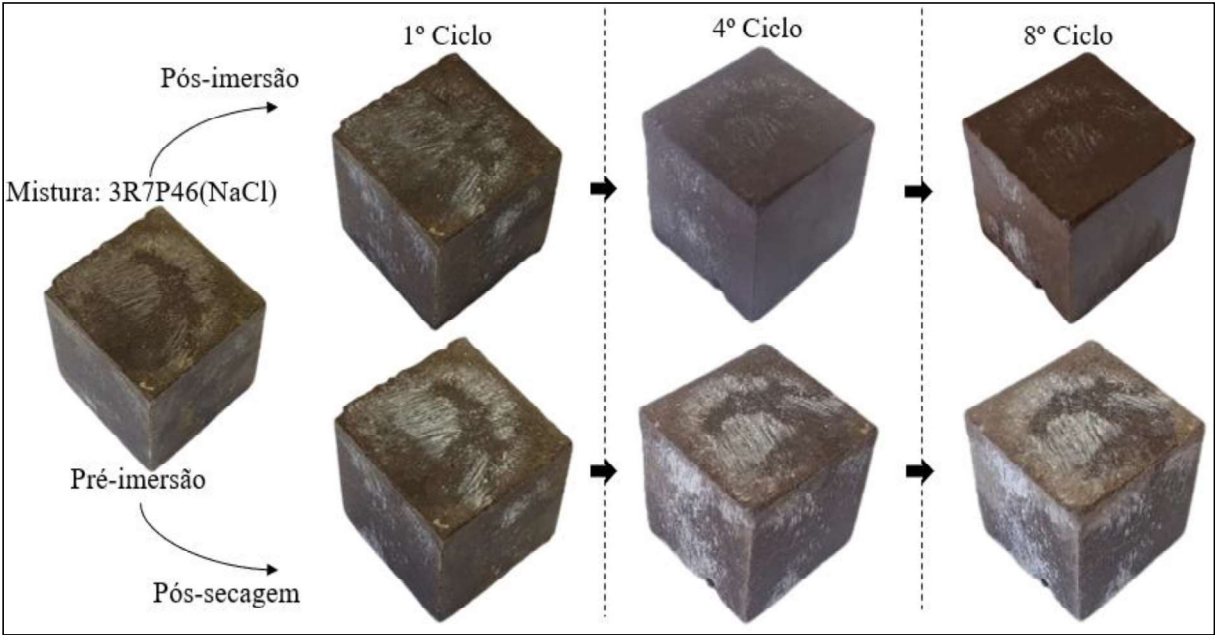
Fonte: Autor, 2026

Figura 22 – 3R7P46 (MgSO_4)



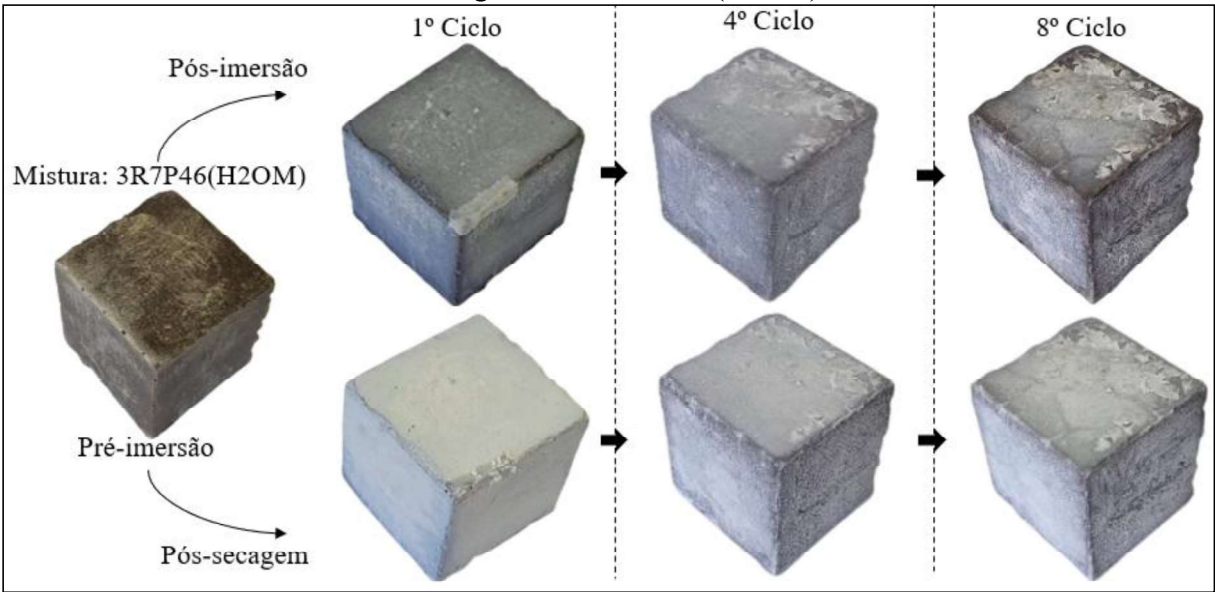
Fonte: Autor, 2026

Figura 23 – 3R7P46 (NaCl)



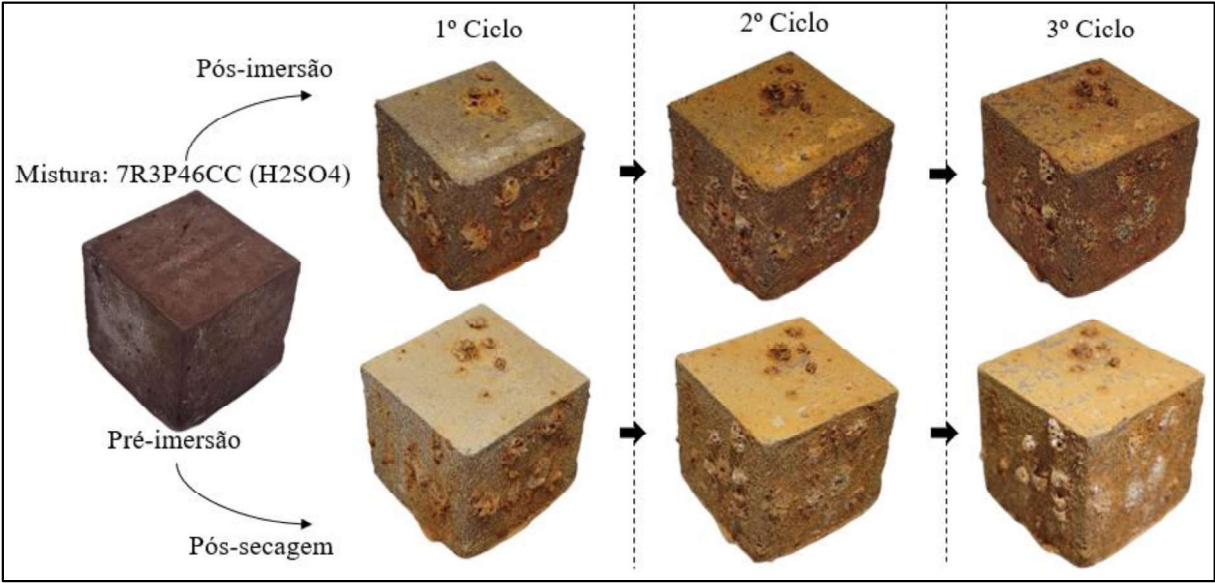
Fonte: Autor, 2026

Figura 24 – 3R7P46 (H₂OM)



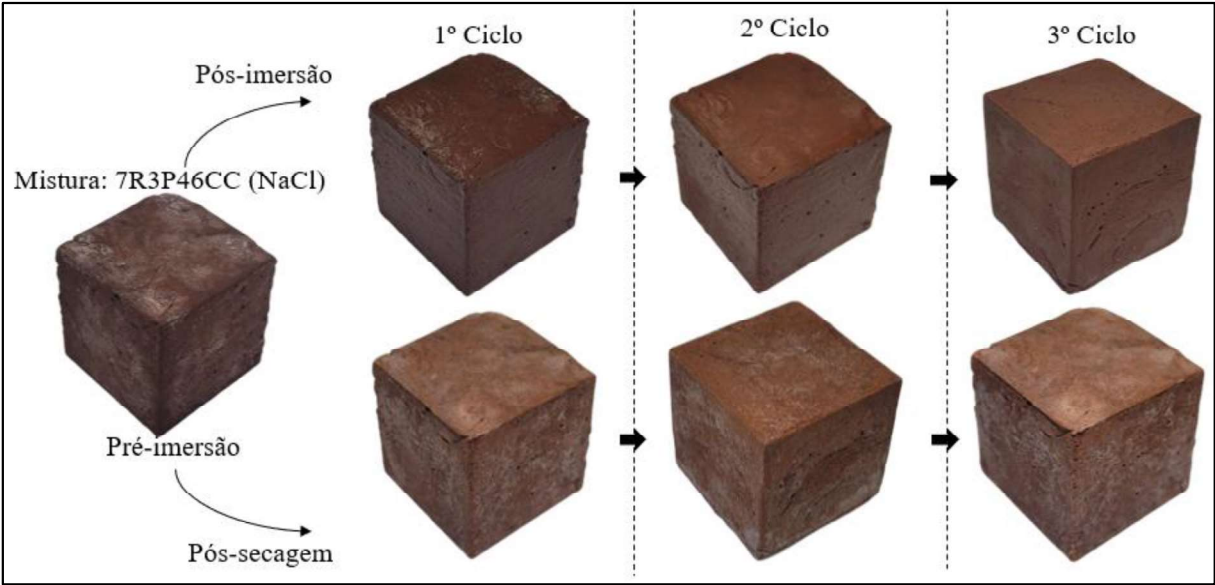
Fonte: Autor, 2026

Figura 25 – 7R3P46CC (H₂SO₄)

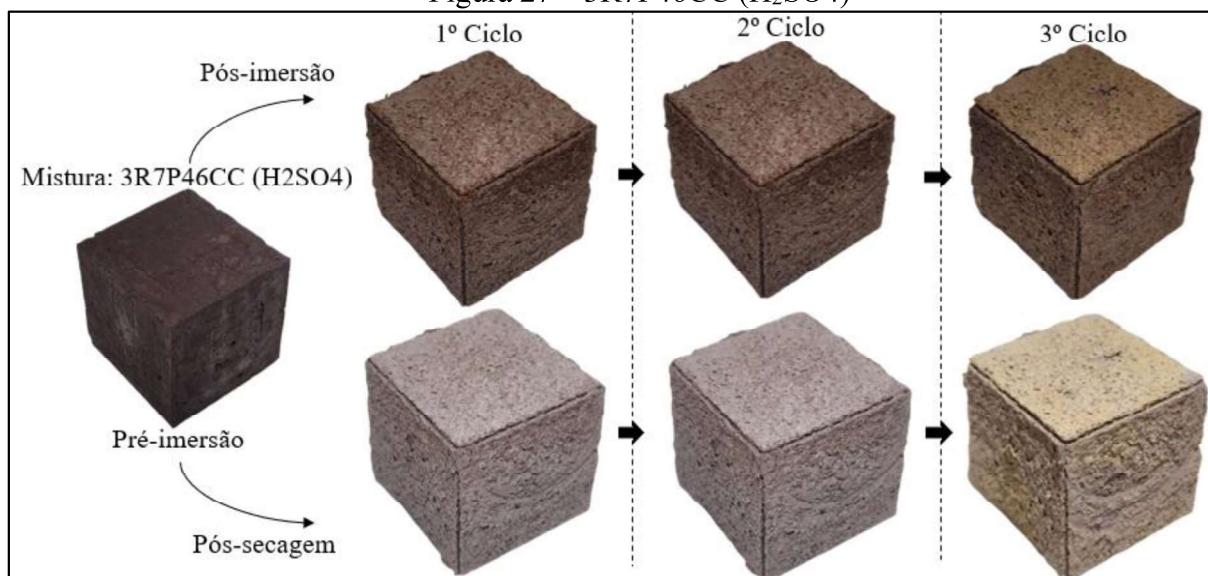


Fonte: Autor, 2026

Figura 26 – 7R3P46CC (NaCl)

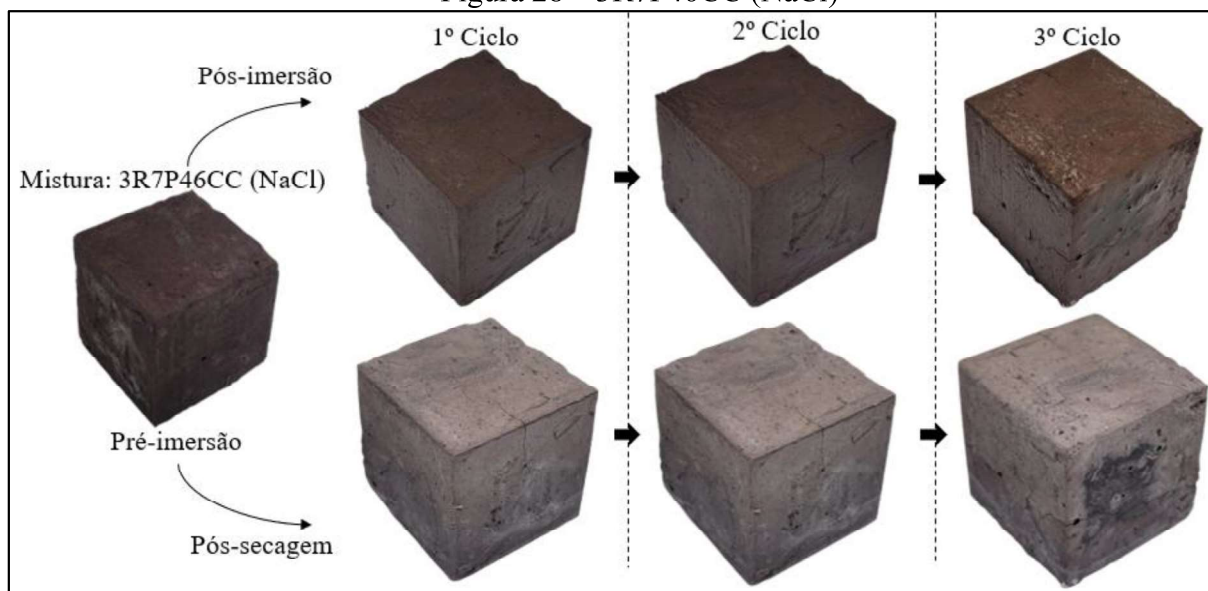


Fonte: Autor, 2026

Figura 27 – 3R7P46CC (H₂SO₄)

Fonte: Autor, 2026

Figura 28 – 3R7P46CC (NaCl)



Fonte: Autor, 2026