



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

DOUGLAS QUEIROZ FRANCISCO

**SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO UTILIZANDO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE
CATALISADORES DE FCC**

**SEROPÉDICA
2026**





DOUGLAS QUEIROZ FRANCISCO

SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO UTILIZANDO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE CATALISADORES DE FCC

Dissertação submetida como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Área de Concentração Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Antônio Renato Bigansolli.

Coorientador: Dr. Rafael Dors Sakata.

SEROPÉDICA
2026

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo autor

F818s Francisco, Douglas Queiroz, 1990-
Síntese de geopolímero utilizando resíduo da
produção de catalisadores de FCC / Douglas Queiroz
Francisco. - Seropédica, 2026.
104 f.: il.

Orientador: Antonio Renato Bigansolli.
Coorientador: Rafael Dors Sakata.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2026.

1. Geopolímero. 2. Resíduo industrial. 3. Economia
circular. 4. Sustentabilidade. 5. Metacaulim. I.
Bigansolli, Antonio Renato, 1974-, orient. II. Sakata,
Rafael Dors, 1987-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

DOUGLAS QUEIROZ FRANCISCO

**SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO UTILIZANDO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE
CATALISADORES DE FCC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, área de concentração em Ciência e Engenharia de Materiais.

Dissertação apresentada em 18 de junho de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO RENATO BIGANSOLLI**
Data: 03/07/2026 15:38:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antônio Renato Bigansolli - Orientador – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL DORS SAKATA**
Data: 03/07/2026 21:54:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rafael Dors Sakata - Coorientador – UTFPR

Documento assinado digitalmente
 **SINARA BORBOREMA**
Data: 03/07/2026 17:34:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Sinara Borborema – FAT/UERJ

DocuSigned by:

596703B45370408...

Dr. Tiago Lima Coelho - FCCSA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e à minha fé católica, que foram meu alicerce espiritual e a fonte de serenidade necessária para perseverar, fortalecendo-me na certeza de que cada etapa desta caminhada seria superada com êxito.

À minha família, pelo apoio incondicional e pela compreensão diante das ausências exigidas por esta pesquisa. Em especial, ao meu filho Arthur Queiroz, que é meu combustível diário e a razão maior do meu esforço; à minha esposa Renata Baratta, pela compreensão e incentivo constante; e aos meus pais, Marise Queiroz e Luiz Antonio, que sempre se doaram e me incentivaram para que eu tivesse as melhores oportunidades de dedicação a este projeto.

Ao prof. Dr. Antônio Renato Bigansolli, pela oportunidade e pela confiança depositada. Expresso minha profunda admiração por sua notável competência acadêmica e agradeço pelo conhecimento compartilhado, pela interlocução sempre enriquecedora e pela dedicação que foram fundamentais para a maturação desta pesquisa.

Ao prof. Dr. Hélio Machado (*in memoriam*), guardo com gratidão o legado e as valiosas conversas que tanto motivaram o início deste trabalho. À Profa. Dra. Antonieta Middea, agradeço pela generosidade e pelo suporte técnico imprescindível na condução de alguns ensaios, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Rafael Sakata, pela precisão nas orientações e pelo direcionamento estratégico que deram corpo a este projeto.

À FCCSA e, em especial, ao Celso Junior, manifesto meu sincero agradecimento pela oportunidade concedida e pelo fornecimento do material de estudo. Agradeço não apenas pela liberação institucional, mas também pelo apoio técnico, elementos cruciais para a viabilidade desta dissertação.

À Aline Oliveira e à Daphne Pacheco, minha gratidão pela presteza, compreensão e os ensaios realizados no laboratório da FCCSA.

Aos meus colegas de turma Yan Ferreira e Téo Silva, mas em especial ao Alisson Passos, pelo companheirismo, pelas trocas de ideias, pela ajuda e por tornarem a jornada acadêmica um caminho compartilhado com leveza e amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo papel desempenhado no fortalecimento da pós-graduação e da pesquisa científica no Brasil.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Declaro que a inteligência artificial generativa Perplexity AI foi utilizada como ferramenta de apoio na comparação e identificação de bibliografias consultivas do trabalho. Além disso, as ferramentas de inteligência artificial generativa ChatGPT (*OpenAI*) e Gemini (IA Google) foram utilizadas para confecção e melhorias de figuras ilustrativas, bem como ajustes textuais pontuais.

Afirmo que todo o conteúdo produzido com o auxílio dessas ferramentas foi criteriosamente revisado, validado e adaptado pelo autor, que assume integral responsabilidade pela originalidade, veracidade e integridade das informações, em conformidade com a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq (Portaria nº 2.664/2026).

RESUMO

A busca por materiais de construção com menor impacto ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de ligantes geopoliméricos como alternativa ao cimento Portland. Este trabalho investigou a viabilidade técnica da produção de um cimento geopolimérico utilizando o metacaulim (MK) como precursor principal e a substituição parcial por resíduo da produção de catalisadores de craqueamento catalítico em leito fluidizado (RPC). Foram desenvolvidas quatro formulações com teores de substituição de 0% (referência), 10%, 25% e 75% de RPC. A caracterização dos precursores revelou que o RPC possui uma granulometria significativamente mais grosseira (D90 de 192,8 μm) e maior cristalinidade em comparação ao MK. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de resistência à compressão axial e dureza Shore D aos 7, 14, 28 e 90 dias de cura. Os resultados indicaram que a incorporação de até 25% de RPC é tecnicamente viável, atingindo resistências superiores a 25 MPa aos 28 dias, patamar compatível com aplicações estruturais e de pavimentação. Observou-se uma contribuição reativa tardia do resíduo, evidenciada pelo ganho de dureza e estabilidade da resistência aos 90 dias na mistura com 25% de RPC. Em contrapartida, a substituição de 75% resultou em colapso das propriedades mecânicas devido à carência de fase amorfa reativa e ao aumento da porosidade. Análises de Difração de Raios X (DRX) e Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) confirmaram a formação da rede aluminossilicata (gel N-A-S-H), embora com menor densificação nas amostras com elevado teor de RPC. Conclui-se que a valorização deste resíduo, que atualmente é destinado a aterros sanitários licenciados, em teores moderados, pode promover a sustentabilidade no setor cimentício, permitindo a redução do consumo de matérias-primas virgens e oferecendo uma destinação nobre para resíduos da indústria química.

Palavras-chave: geopolímero. resíduo industrial; economia circular; sustentabilidade; metacaulim.

ABSTRACT

The search for construction materials with lower environmental impact has driven the development of geopolymeric binders as an alternative to Portland cement. This study investigated the technical feasibility of producing a geopolymeric cement using metakaolin (MK) as the main precursor and the partial replacement with waste generated from the production of fluid catalytic cracking catalysts (FCC waste residue – RPC). Four formulations were developed with replacement levels of 0% (reference), 10%, 25%, and 75% RPC. The characterization of the precursors revealed that the RPC exhibited significantly coarser particle size distribution (D90 of 192.8 μm) and higher crystallinity compared to MK. Mechanical properties were evaluated through axial compressive strength and Shore D hardness tests at curing ages of 7, 14, 28, and 90 days. The results demonstrated that the incorporation of up to 25% RPC is technically feasible, achieving compressive strengths above 25 MPa at 28 days, which is compatible with structural and paving applications. A delayed reactive contribution of the residue was observed, evidenced by the increase in hardness and the stability of compressive strength at 90 days for the formulation containing 25% RPC. In contrast, the 75% replacement level resulted in a collapse of the mechanical properties due to the lack of reactive amorphous phase and increased porosity. X-ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analyses confirmed the formation of the aluminosilicate network (N-A-S-H gel), although with lower densification in samples containing high RPC content. It was concluded that the valorization of this residue, which is currently disposed of in licensed landfills, at moderate replacement levels can contribute to sustainability in the cement sector by reducing the consumption of virgin raw materials and providing a high-value destination for waste generated by the chemical industry.

Keywords: geopolymer; industrial waste; circular economy; sustainability; metakaolin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução anual das publicações científicas sobre geopolímero, resíduo industrial e economia circular.	20
Figura 2 - Arranjo estrutural tridimensional típico do geopolímero.	21
Figura 3 - Tetraedros de SiO_4 e AlO_4 unidos pelo compartilhamento de oxigênio. ...	24
Figura 4 - Difrátogramas com diferentes razões Si/Al.	25
Figura 5 - Estrutura 1:1 do caulim.	27
Figura 6 - Análise termogravimétrica do comportamento da caulinita.	29
Figura 7 - Composição hipotética de um catalisador zeolítico comercial.	31
Figura 8 - Fluxo de processos da geração do resíduo industrial na FCCSA.	32
Figura 9 - Geração do RPC na FCCSA em a) a torta do RPC após saída do filtro prensa, em b) desidratando em galpão coberto e em c) e d) apresenta o RPC nas bacias de decantação de sólidos.	33
Figura 10 - Histórico da geração do RPC.	34
Figura 11 - Modelo conceitual de geopolimerização.	40
Figura 12 - Esquema das reações de policondensação.	40
Figura 13 - Fluxo de etapas do plano experimental.	49
Figura 14 - Esquematização do geopolímero proposto.	54
Figura 15 - Fluxo de produção das pastas com adição do RPC.	57
Figura 16 - Formulações de geopolímeros produzidas em triplicata.	58
Figura 17 - Pontos de medição de dureza Shore D nos CPs.	63
Figura 18 - Síntese dos equipamentos utilizados nas técnicas de caracterização.	64
Figura 19 - Distribuição granulométrica acumulada do MK e do RPC.	66
Figura 20 - Difrátograma do MK e do RPC.	71
Figura 21 - Análise de FTIR do MK e do RPC.	73
Figura 22 - Difrátograma das composições de geopolímeros produzidas.	74
Figura 23 - FTIR das composições de geopolímeros produzidos.	75
Figura 24 - MEV da composição com 100% de MK em a) e EDS em b).	77
Figura 25 - MEV da composição com 10% de RPC e 90% de MK em a) e EDS em b).	77
Figura 26 - MEV da composição com 25% de RPC e 75% de MK em a) e EDS em b).	78
Figura 27 - MEV da composição com 75% de RPC e 25% de MK em a) e EDS em b).	

.....	78
Figura 28 - Resultados quantitativos de massa por EDS em a) 100% de MK, b) 10% de RPC, c) 25% de RPC e d) 75% de RPC.	7
9	
Figura 29 - Evolução da resistência à compressão em função da idade de cura.....	82
Figura 30 - Formulação de 75% de RPC com geopolimerização comprometida.	83
Figura 31 - Evolução da dureza Shore D ao longo do período de cura.....	85
Figura 32 - Média dos resultados de massa aparente das amostras com idades de 7 dias.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações dos geopolímeros de acordo com a relação Si:Al.	24
Tabela 2 - Compostos reagentes da mistura com razões molares ideais.	45
Tabela 3 - Faixas molares encontradas utilizando MK ativado com hidróxido e silicato de sódio.	45
Tabela 4 - Faixas molares ideais conforme Pelisser (2013).	45
Tabela 5 - Análise química por FRX do MK.	50
Tabela 6 - Propriedades químicas do silicato de sódio.	53
Tabela 7 - Propriedades físico-químicas dos ativadores alcalinos.	53
Tabela 8 - Razão SiO ₂ /Al ₂ O ₃ utilizado em outras literaturas.	54
Tabela 9 - Composição das misturas e parâmetros de dosagem das pastas geopoliméricas para diferentes teores de substituição de MK por RPC.	56
Tabela 10 - Percentual em massa dos materiais utilizados para cada formulação geopolimérica.	56
Tabela 11 - Tabela característica de FTIR em cimento geopolimérico.	61
Tabela 12 - Área superficial específica dos materiais estudados.	68
Tabela 13 - Composição química do MK e do RPC por FRX (% em massa).	69
Tabela 14 - Identificação dos principais picos e dos índices de Miller na DRX.	71
Tabela 15 - Classificação das principais bandas de FTIR do MK.	73
Tabela 16 - Classificação das principais bandas de FTIR do RPC.	73
Tabela 17 - Resultados quantitativos de massa por EDS das formulações geopoliméricas.	79
Tabela 18 - Resistência média à compressão (MPa), desvio padrão e coeficiente de variação para todas as formulações e idades.	82
Tabela 19 - Análise de variância para resistência à compressão dos CPs.	84
Tabela 20 - Síntese da análise de variância.	85
Tabela 21 - Média de dureza das composições nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.	85
Tabela 22 - Análise de variância para dureza shore das formulações com exceção de 75% de RPC nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.	86
Tabela 23 - Síntese da significância dos fatores avaliados.	87
Tabela 24 - Resultados de massa específica e densidade das formulações com idade de 7 dias.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
C-A-S-H	Gel cálcio aluminossilicato alcalino hidratado
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral da UFRJ
CP	Cimento Portland
CPs	Corpos de prova
DRX	Difração de raios X
DTA	Análise térmica diferencial
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
ETE	Estação de tratamento de efluentes
FCCSA	Fábrica Carioca de Catalisadores S.A.
FRX	Fluorescência de raios X
FTIR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
HS	Hidróxido de sódio
IS	<i>Indian Standard</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MK	Metacaulim
MPa	Mega Pascal, unidade de pressão que corresponde a taxa de 1 N/mm ²
N-A-S-H	Gel sódio aluminossilicato alcalino hidratado
ODS	Objetivo de desenvolvimento sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
TGA	Análise termogravimétrica
RPC	Resíduo da produção de catalisadores de FCC
SS	Silicato de sódio
UFCC	Unidade de craqueamento catalítico em leito fluído
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo principal	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Definições e características	20
3.1.1 Geopolímeros.....	20
3.1.2 Quanto à proporção de Sílica (Si) e Alumínio (Al).....	23
3.1.3 Sobre o tipo de aluminossilicato	26
3.2 Materiais.....	26
3.2.1 Metacaulim	26
3.2.1.1 Processo de síntese do metacaulim.....	27
3.2.2 Resíduo da fabricação de catalisadores de FCC	29
3.2.2.1 Craqueamento em leito fluidizado	29
3.2.2.2 Catalisador de FCC	29
3.2.2.3 Origem do resíduo na FCC	31
3.2.2.4 Restrições técnicas ao reaproveitamento em catálise	35
3.2.3 Ativadores alcalinos.....	36
3.2.3.1 Soluções ativadores alcalinas	37
3.2.4 Geopolímeros.....	38
3.2.4.1 Processo de geopolimerização	38
3.2.4.2 Mecanismos de formação de geopolímero a base de resíduos	41
3.2.4.3 Parâmetros de síntese	43
3.2.4.4 Condições de cura	43
3.2.4.5 Dosagem	44
3.2.4.6 Efeito da água nas propriedades físico-mecânicas	46
3.2.4.7 Contribuição dos geopolímeros para a sustentabilidade	46
3.3 Resumo da revisão bibliográfica	47
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 Materiais utilizados	50
4.1.1 Metacaulim	50
4.1.2 Resíduo da produção de catalisadores de FCC.....	51

4.1.2.1 Amostragem	51
4.1.2.2 Secagem	52
4.1.2.3 Moagem	52
4.1.3 Ativadores alcalinos.....	53
4.2 Métodos.....	53
4.2.1 Síntese de geopolímero com RPC	53
4.2.1.1 Fração entre as misturas.....	54
4.2.1.2 Variação da composição dos precursores.....	55
4.2.1.3 Preparação das pastas geopoliméricas.....	57
4.2.2 Técnicas de caracterização.....	58
4.2.2.1 Difractometria de raio X (DRX).....	58
4.2.2.2 Fluorescência de raio X (FRX)	59
4.2.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	59
4.2.2.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	60
4.2.2.5 Resistência a compressão	61
4.2.2.6 Dureza Shore	62
4.2.2.7 Massa específica.....	63
4.2.3 Síntese das técnicas de caracterização utilizadas	64
4.2.4 Análise Estatística	65
5 RESULTADOS.....	66
5.1 Caracterização dos precursores	66
5.1.1 Granulometria.....	66
5.1.2 Área superficial.....	68
5.1.3 Composição química por FRX.....	69
5.1.4 Difractometria de raio X (DRX).....	70
5.1.5 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	72
5.2 Caracterização dos geopolímeros produzidos	74
5.2.1 Caracterização microestrutural.....	74
5.2.1.1 Difractometria de raio X.....	74
5.2.1.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	75
5.2.1.3 Microscopia eletrônica de varredura e EDS	77
5.2.1.4 Conclusão relativa às caracterizações microestruturais.....	80
5.2.2 Propriedades mecânicas	81
5.2.2.1 Resistência à compressão	81

5.2.2.1.1 Avaliação estatística da resistência à compressão	84
5.2.2.2 Dureza Shore	85
5.2.2.2.1 Avaliação estatística da dureza Shore	86
5.2.2.3 Conclusões relativas às propriedades mecânicas	87
5.2.3 Outras análises complementares	88
5.2.3.1 Massa específica	88
6 CONCLUSÃO	91
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o planeta tem enfrentado desafios críticos relacionados ao uso intensivo e muitas vezes insustentável dos recursos naturais, resultando em consequências ambientais severas. Essa realidade evidencia a necessidade urgente de transformação nos modelos produtivos e de consumo, para que se alcance um desenvolvimento sustentável capaz de equilibrar as demandas econômicas, sociais e ambientais. O debate sobre sustentabilidade ganhou destaque a partir da década de 1970, especialmente após a 1ª Conferência Internacional sobre o Meio Ambiente, realizada em Estocolmo, Suécia, que marcou um ponto de reflexão na conscientização global sobre os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente (JARDIM *et al.*, 2012).

Desde então, diversas iniciativas têm buscado minimizar as externalidades negativas da produção e consumo, reconhecendo que os modelos econômicos tradicionais operavam sob a falsa premissa de recursos naturais ilimitados, sem considerar as perdas decorrentes dos resíduos industriais. Valle (1995) enfatiza que, na maioria dos casos, esses resíduos representam perdas significativas de matérias-primas, refletindo ineficiências nos processos produtivos. Essa preocupação foi reafirmada pela Assembleia Geral das Nações Unidas na Resolução 44/228, antecedente à Conferência do Rio 92, que destacou a gestão ambiental racional dos resíduos e a reutilização como prioridades para a promoção do desenvolvimento sustentável (JARDIM *et al.*, 2012).

Paralelamente, a busca por materiais inovadores e ambientalmente responsáveis tem impulsionado pesquisas no desenvolvimento de geopolímeros, materiais que apresentam elevada resistência mecânica, estabilidade térmica, baixa permeabilidade e boa durabilidade química em comparação com o concreto tradicional à base de Cimento Portland (CP) (DAVIDOVTS, 2020; KURI, KHAN e SARKER, 2021). Estas propriedades tornam os geopolímeros promissores para diversas aplicações na construção civil, como revestimentos protetores para concreto marinho, proteção contra corrosão e reparos em infraestrutura (AHMAD *et al.*, 2021). Além disso, os geopolímeros têm potencial para tecnologias emergentes, como a impressão 3D de concreto, que busca aliar desempenho técnico à sustentabilidade ambiental.

A indústria da construção civil, uma das principais consumidoras de recursos naturais e responsável por significativa emissão de poluentes, destaca-se nesse

contexto. O CP, insumo fundamental dessa indústria, é notório por sua alta emissão de dióxido de carbono (CO_2) — estimando-se que a produção de uma tonelada de cimento consome cerca de duas toneladas de matérias-primas e libera aproximadamente uma tonelada de CO_2 e gases de óxidos de nitrogênio (NO) (AHMAD *et al.*, 2021). Estima-se que o setor de cimento seja responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO_2 (ANDREW, 2018; CHATHAM HOUSE, 2018).

Nesse contexto, torna-se necessário investigar alternativas mais limpas e eficientes, como os geopolímeros, que têm ganhado destaque pela sua performance técnica e de menor impacto ambiental. Embora haja avanços na área dos geopolímeros, os estudos que incorporam resíduos industriais, especialmente aqueles provenientes da indústria química, ainda são escassos (REN *et al.*, 2021). Esses resíduos, ricos em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) — os principais constituintes para a formação da rede geopolimérica durante a ativação alcalina — representam uma fonte promissora e pouco explorada de precursores geopoliméricos (SUKMAK *et al.*, 2013; RAMOS, 2017).

Apesar da composição favorável do resíduo da produção de catalisadores de FCC (RPC), ainda restam lacunas científicas fundamentais sobre o seu comportamento em sistemas híbridos. Torna-se imperativo compreender qual o limite de substituição do metacaulim (MK) pelo resíduo sem que haja comprometimento das propriedades mecânicas, se o RPC de fato participa de forma ativa do processo de geopolimerização e quais os impactos microestruturais resultantes dessa incorporação.

Diante disso, o presente trabalho visa analisar e testar, em escala laboratorial, a utilização do RPC, como precursor geopolimérico, atuando como solução sustentável e tecnológica para o reaproveitamento desses materiais na indústria da construção civil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento de um resíduo industrial rico em sílica e alumina, proveniente da fabricação de catalisadores de FCC, como um precursor alternativo na síntese de geopolímero.

2.2 Objetivos específicos

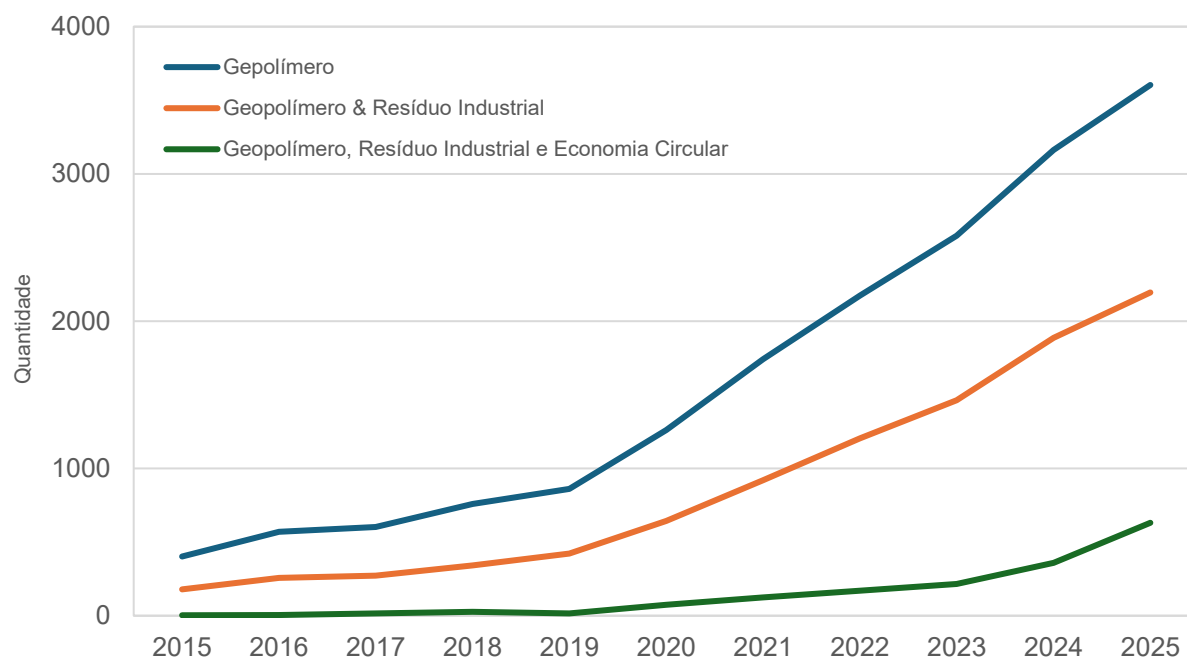
- a) caracterizar física, química e mineralogicamente o RPC e o MK, por meio de Fluorescência de raio X (FRX), Difratometria de raio X (DRX), Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), área superficial (BET) e distribuição granulométrica.
- b) otimizar a dosagem das matrizes geopoliméricas, avaliando a influência da substituição parcial do metacaulim por resíduo.
- c) determinar as propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova consolidados, especificamente a resistência à compressão, dureza Shore e massa específica, correlacionando-as aos parâmetros de processamento.
- d) investigar a microestrutura e os produtos de reação formados, utilizando técnicas de caracterização avançadas para correlacionar a evolução da matriz com o desempenho mecânico final.
- e) avaliar a viabilidade técnica do resíduo como precursor principal na síntese de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, observa-se um crescimento expressivo da produção científica relacionada aos geopolímeros, aos resíduos industriais e à economia circular, refletindo a convergência entre a demanda por soluções sustentáveis e os avanços tecnológicos na ciência dos materiais e na construção civil. Com o objetivo de quantificar essa tendência e contextualizar o presente estudo no cenário internacional, foi realizada uma busca na base de dados *ScienceDirect* utilizando as palavras-chave “*geopolymer*”, “*industrial waste*” e “*circular economy*” (dados extraídos em 09 de março de 2026).

A Figura 1 apresenta a evolução anual das publicações científicas entre 2015 e 2025 para três diferentes conjuntos de palavras-chave: “*geopolymer*”; “*geopolymer*” associado a “*industrial waste*”; e a combinação de “*geopolymer*”, “*industrial waste*” e “*circular economy*”. Observa-se crescimento contínuo em todas as curvas, evidenciando o aumento do interesse da comunidade científica por esses temas. As publicações relacionadas exclusivamente aos geopolímeros apresentaram a maior produção ao longo de todo o período, passando de 402 artigos em 2015 para 3.604 em 2025. Quando associado ao reaproveitamento de resíduos industriais, o número de publicações também apresentou crescimento expressivo, evoluindo de 179 para 2.195 artigos no mesmo intervalo, demonstrando a consolidação do uso de resíduos como precursores na síntese de geopolímeros. Já as pesquisas que integram simultaneamente geopolímeros, resíduos industriais e economia circular, embora apresentem menor volume absoluto, exibem a maior taxa relativa de crescimento, passando de apenas 3 publicações em 2015 para 631 em 2025. Esse comportamento evidencia que a abordagem baseada nos princípios da economia circular constitui uma temática recente, porém em rápida expansão, reforçando a importância do desenvolvimento de materiais sustentáveis e do aproveitamento de resíduos industriais como estratégias para a redução dos impactos ambientais.

Figura 1 - Evolução anual das publicações científicas sobre geopolímero, resíduo industrial e economia circular.



Fonte: *Science Direct*, acesso em 09 de março de 2026.

Apesar do crescimento global da produção científica, a participação brasileira nesse cenário ainda é relativamente limitada, representando uma oportunidade para o fortalecimento de pesquisas nacionais voltadas ao aproveitamento de resíduos industriais em materiais cimentícios alternativos. Nesse contexto, o presente trabalho contribui para o avanço dessa área ao investigar a incorporação de um resíduo industrial rico em sílica na produção de geopolímeros, alinhando inovação tecnológica, sustentabilidade e os princípios da economia circular.

3.1 Definições e características

3.1.1 Geopolímeros

Diversos termos têm sido utilizados na literatura para designar materiais semelhantes aos geopolímeros ou cimentos geopoliméricos, entre os quais se destacam: geocimento, cimento alcalino, polímero inorgânico, cerâmicos ligados por álcali, hidrocerâmico, zéocimentos e cimento álcali-ativado (BAKHAREV, 2005). Entretanto, até o momento, não há consenso explícito que defina as diferenças específicas entre esses termos, refletindo a complexidade intrínseca do tema.

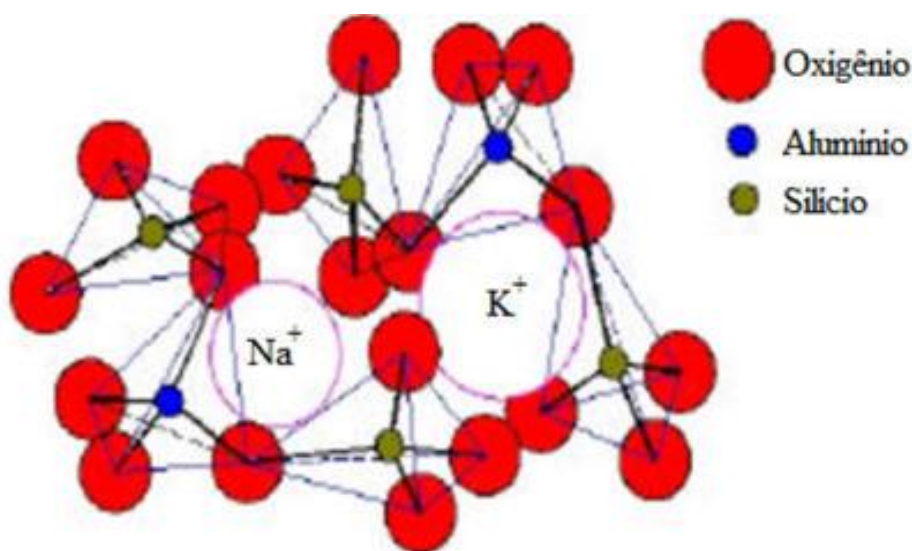
Um geopolímero pode ser conceituado como um polímero inorgânico formado por polissialatos, abreviação de poli-sílico-aluminato (DAVIDOVITS, 1984),

pertencente aos filossilicatos — uma subclasse da família dos minerais silicatados caracterizada pela presença de folhas tetraédricas paralelas, alta dureza e capacidade de troca catiônica (MEIER; OLSON, 1992).

Os geopolímeros são sintetizados predominantemente por meio de um processo de policondensação, uma modalidade específica de polimerização que libera água durante sua ocorrência. Para a formação do cimento geopolimérico, é necessária a presença de aluminossilicatos amorfos ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) em meio fortemente alcalino, geralmente fornecido por soluções aquosas de silicato e/ou hidróxido alcalino (DAVIDOVITS, 1991).

Durante o processo de policondensação, o aluminossilicato reage com a solução ativadora alcalina, formando uma rede polimérica tridimensional constituída por unidades tetraédricas de silício (Si^{4+}) e alumínio (Al^{3+}) interligadas por oxigênios compartilhados em coordenação tetraédrica (número de coordenação IV) (DAVIDOVITS, 2011). Essa estrutura tridimensional é estabilizada por cátions alcalinos, principalmente sódio (Na^+) e potássio (K^+), que desempenham papel fundamental na compensação de cargas e nas propriedades funcionais do material, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Arranjo estrutural tridimensional típico do geopolímero.



Fonte: Pinto (2006).

Segundo Davidovits (1982) e Ramos (2022), os geopolímeros podem ser representados pela Equação 1, que apresenta a sua fórmula genérica:

Equação (1)

$$M_n [- (SiO_2)_z - AlO_2]_n \cdot wH_2O$$

Onde:

M: Metal alcalino ou alcalino-terroso (ex: Na⁺, K⁺);

n: grau de policondensação;

z: valor 1, 2 ou 3 (número de átomos de oxigênio compartilhado);

w: número de moléculas de água.

Assim como os cimentos geopolimérico, as zeólitas também são constituídas por silicatos e aluminossilicatos ligados por átomos de oxigênio em redes tetraédricas tridimensionais (MEIER, 1992; OLSON, 1992). Portanto, a composição química dos geopolímeros é semelhante à dos minerais zeolíticos, sendo o tipo de estrutura atômica uma diferença fundamental entre eles.

Os processos de formação dos cimentos geopoliméricos ocorrem com maior velocidade do que as reações de síntese das zeólitas. Por essa razão, não há tempo suficiente para que o gel do geopolímero se organize em uma estrutura cristalina, ao contrário dos minerais zeolíticos. Dessa forma, os cimentos geopolimérico resultam em uma estrutura amorfa a semicristalina, enquanto as zeólitas apresentam uma estrutura cristalina em forma de gaiola (DAVIDOVITS, 1984).

Embora os geopolímeros sejam considerados materiais inovadores e modernos, existem evidências de que concretos e argamassas usadas em antigas construções faraônicas, como as pirâmides do Egito — datadas de cerca de 4500 aC — compartilham princípios equivalentes aos materiais geopoliméricos atuais (DAVIDOVITS, 1991). Todavia, os aspectos sobre a natureza das reações e de seus produtos, com foco nas propriedades químicas e físicas, começaram a ser investigados, principalmente, na década de 1950, por uma equipe de pesquisadores soviéticos liderados pelo cientista ucraniano Victor Dmytrovych Glukhovsky (*so-called soil silicates and soil cements research*) — como documentado por Van Jaarsveld, Van Deventer e Lorenzen (1997) em estudos posteriores.

Entretanto, conforme referência nos estudos de Purdon (1940) citados por Torgal *et al.* (2008), existem relatos detalhados sobre materiais produzidos por meio da ativação alcalina. Purdon investigou as propriedades das escórias industriais

submetidas a um meio alcalino, empregando soluções aquosas de hidróxido de sódio (NaOH) como agente ativador. Seus resultados indicaram que os hidróxidos de metais alcalinos atuam como agentes ativadores no processo reacional, promovendo a dissolução da escória e o subsequente endurecimento do material.

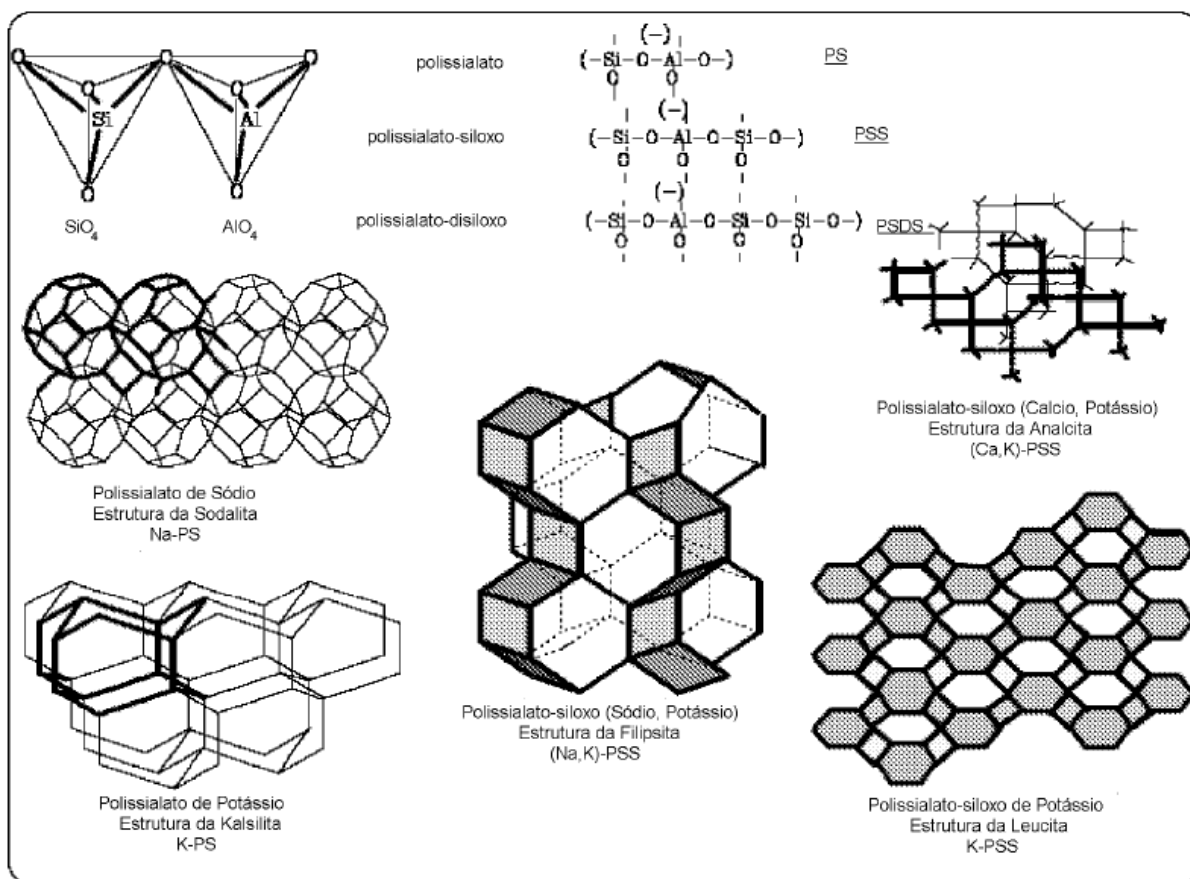
Já na década de 1970, motivado por diversos casos de incêndios na França, o pesquisador Joseph Davidovits iniciou estudos voltados para o desenvolvimento de materiais com maior resistência ao fogo. Durante sua análise, constatou que edificações antigas sofreram danos mínimos respeitantes às construções modernas após esses eventos. Esses estudos culminaram, após anos de pesquisa, na criação de um tipo de cimento intitulado por Davidovits em 1979 de “geopolímero” (DAVIDOVITS, 2008).

Em termos gerais, os geopolímeros apresentam uma série de propriedades que os tornam úteis para diversas aplicações. Entre seus principais atributos destacam-se o rápido endurecimento, alta resistência ao fogo, elevada resistência mecânica (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007), estabilidade térmica, além de boa capacidade de moldagem e acabamento superficial de qualidade (DUXSON *et al.*, 2007). Além disso, esses materiais apresentam excelente resistência contra agentes químicos agressivos, como ácidos e sulfatos, tornando-os adequados para ambientes severos (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012). Essa elevada durabilidade está associada à sua estrutura tridimensional reticulada, que confere baixa permeabilidade e elevada estabilidade química, favorecendo a proteção da armadura e a integridade estrutural ao longo do tempo (PROVIS; BERNAL, 2014).

3.1.2 Quanto à proporção de Sílica (Si) e Alumínio (Al)

Conforme descrito na patente registrada por Davidovits (1982), os geopolímeros são constituídos por uma estrutura tridimensional formada por unidades tetraédricas silício (SiO_4) e alumínio (AlO_4), interligadas por oxigênios compartilhados. Essa unidade estrutural, denominada sialato (sílico-oxo-aluminato), foi posteriormente detalhada por Davidovits (1991). A Figura 3 evidencia a repetição dessas unidades de polissialatos, que compõem a rede dos geopolímeros.

Figura 3 - Tetraedros de SiO₄ e AlO₄ unidos pelo compartilhamento de oxigênio.



Fonte: Extraída de Santos (2017 p. 18) com base em Davidovits (1991).

Dessa forma, a estrutura tridimensional é predominantemente constituída por ligações Al–O–Si (BARBOSA; MACKENZIE; THAUMATURGO, 1999).

Tabela 1 - Aplicações dos geopolímeros de acordo com a relação Si:Al.

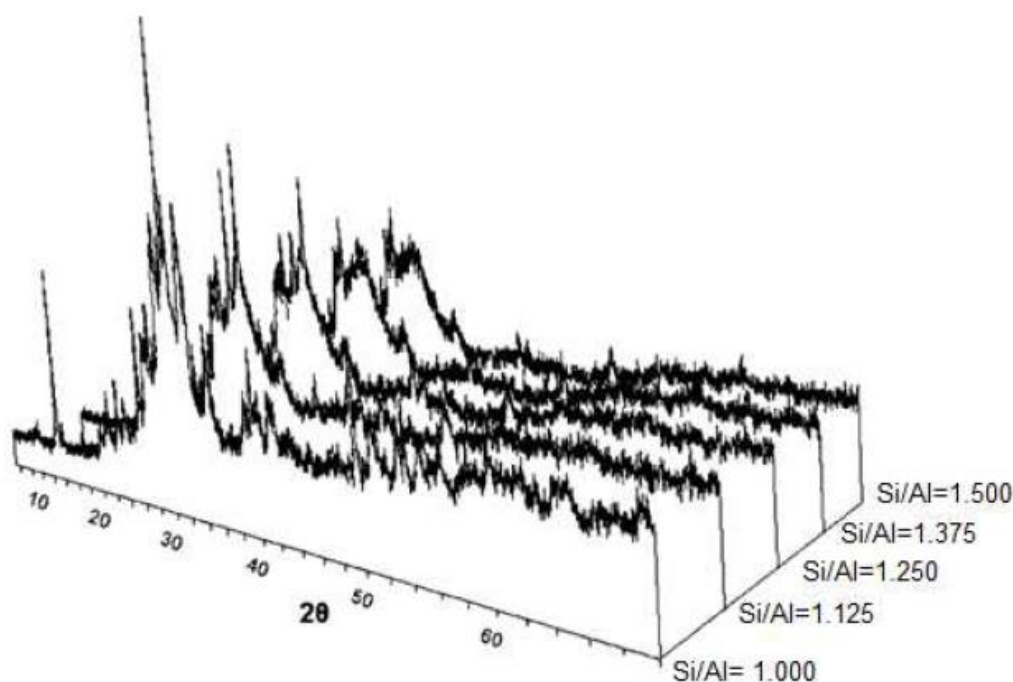
Relação Si:Al	Possíveis Aplicações
20:1 < Si:Al < 35:1	Resistência anti-fogo
Si:Al > 3	Ferramentas para aeronáutica e selantes para indústria
Si:Al = 3	Proteção anti-fogo e compósitos resistentes ao fogo
Si:Al = 1	Tijolos, cerâmicas e refratários

Fonte: Adaptado de Davidovits (2008).

A estabilidade estrutural dos sistemas geopoliméricos é favorecida pelo incremento de silício solúvel na solução ativadora. A adição de silicato solúvel ao precursor intensifica as etapas de dissolução, gelificação e policondensação, promovendo maior conectividade da rede aluminosilicática. Esse processo contribui para a imobilização de íons metálicos por meio da incorporação estrutural ou formação de fases de baixa solubilidade (KHALE; CHAUDHARY, 2007). Complementarmente,

DUXSON *et al.* (2007) investigaram a influência de diferentes teores de silício solúvel em geopolímeros à base de metacaulinita. Os padrões de difração de raios X apresentados pelos autores (Figura 4), obtidos após cura a 180 °C por 24 h, evidenciam modificações na estrutura amorfa do material em função da variação da razão Si/Al.

Figura 4 - Difratomogramas com diferentes razões Si/Al.



Fonte: Duxson *et al.* (2007).

A interpretação dos difratogramas indica que as amostras sintetizadas com maiores teores de silício solúvel apresentam maior predominância da fase amorfa em comparação àquelas com menores concentrações. O incremento de silício nas soluções ativadoras favorece a formação do gel aluminossilicático e reduz a contribuição de fases cristalinas remanescentes, sem alterar a natureza fundamental do mecanismo de geopolimerização (PROVIS *et al.*, 2005; DUXSON *et al.*, 2005).

Sob a ótica do desempenho físico, Steveson e Sagoe-Crentsil (2005) destacam que a presença de silicato solúvel pode favorecer o aumento da resistência mecânica. Contudo, Duxson *et al.* (2007) ressaltam que as propriedades do gel formado dependem não apenas da concentração de sílica disponível, mas também do seu grau de polimerização, o qual é fortemente influenciado pela alcalinidade do meio ativador.

3.1.3 Sobre o tipo de aluminossilicato

A produção de materiais ativados alcalinamente envolve ampla variedade de precursores minerais, incluindo matérias-primas naturais, subprodutos industriais e resíduos. Entre os mais utilizados destacam-se a cinza volante, metacaulim, vidro vulcânico, zeólitas, sílica ativa e escórias granuladas de alto-forno e de outras indústrias metalúrgicas (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006; SHI *et al.*, 2011).

Com base na natureza do precursor e no mecanismo predominante de reação, Shi *et al.* (2011) propuseram uma classificação em cinco categorias principais de materiais ativados alcalinamente, abrangendo sistemas à base de escória, sistemas pozolânicos e sistemas híbridos contendo CP.:

- a) cimento alcali-ativado à base de escória de alto-forno;
- b) cimento geopolimérico pozolânico;
- c) cimento geopolimérico baseado em cal-pozolana/escória;
- d) cimento geopolimérico contendo aluminato de cálcio;
- e) cimento geopolimérico híbrido contendo cimento Portland.

As características específicas de cada categoria são detalhadas por Shi *et al.* (2011), constituindo referência importante para a compreensão das propriedades e aplicações desses materiais.

3.2 Materiais

3.2.1 Metacaulim

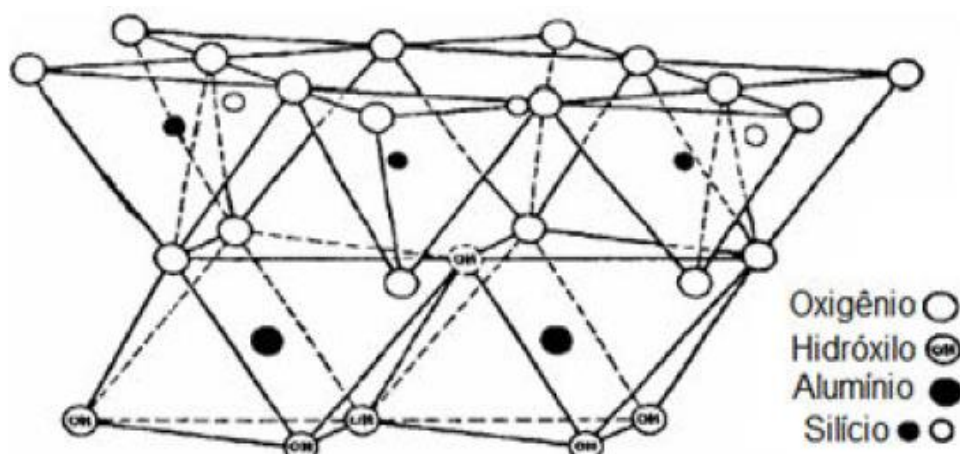
A obtenção do metacaulim ocorre por meio da calcinação do caulim, um silicato aluminoso hidratado cuja composição química se aproxima da fórmula $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

Teoricamente, a caulinita apresenta aproximadamente 46,5% de SiO_2 , 39,5% de Al_2O_3 e 14,0% de H_2O em massa, podendo ocorrer variações em função de impurezas naturais, como óxidos de ferro, titânio, manganês, magnésio, potássio e sódio (MONTE *et al.*, 2003).

O caulim pertence ao grupo dos argilominerais do tipo 1:1, que inclui minerais como caulinita, nacrita e haloisita. A designação 1:1 refere-se à estrutura cristalina constituída por uma camada tetraédrica de sílica (SiO_4), formada por tetraedros de silício coordenados por quatro átomos de oxigênio, associada a uma camada octaédrica de alumina (AlO_6), composta por octaedros de alumínio coordenados por

seis oxigênios ou hidroxilas conforme Figura 5. Essas camadas encontram-se ligadas por pontes de oxigênio compartilhadas, formando uma estrutura lamelar característica (GRIM, 1962; MITCHELL, 1976; MONTE *et al.*, 2003).

Figura 5 - Estrutura 1:1 do caulim.



Fonte: Extraída de Grim (1962); Mitchell (1976); Monte *et al.* (2003).

Quanto à distribuição das reservas, o caulim apresenta ampla ocorrência geográfica. Segundo levantamento do Departamento Nacional de Produção Mineral (2001), as reservas mundiais estimadas à época eram da ordem de 14,2 bilhões de toneladas, concentradas principalmente nos Estados Unidos (53%), Brasil (28%), Ucrânia (7%) e Índia (7%). O Brasil destaca-se como um dos principais detentores dessas reservas, com depósitos expressivos localizados sobretudo na Região Norte do país, consolidando sua relevância no mercado internacional como fornecedor de caulim de alta qualidade.

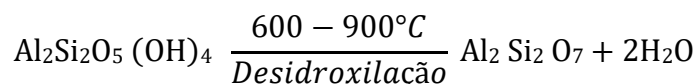
Apesar da abundância do recurso, as atividades de extração e beneficiamento do caulim demandam controle ambiental rigoroso, uma vez que envolvem supressão vegetal, geração de rejeitos e alteração da paisagem, exigindo práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da gestão ambiental adequada.

3.2.1.1 Processo de síntese do metacaulim

O metacaulim, também denominado metacaulinita, é obtido por meio da calcinação controlada do caulim, geralmente em temperaturas entre 600 e 900 °C. Durante esse tratamento térmico ocorre a reação de desidroxilação da caulinita, na qual os grupos hidroxila estruturais são removidos da rede cristalina, promovendo o colapso parcial da estrutura lamelar e a formação de uma fase aluminossilicatada

amorfa altamente reativa (SANTOS, 1989; HE; OSBAECK; MAKOVICKY, 1994). Essa transformação pode ser representada de forma simplificada pela Equação (2):

Equação (2)



A equação expressa a remoção da água estrutural associada aos grupos hidroxila, resultando em um material desordenado, com perda da cristalinidade original da caulinita e aumento da reatividade pozolânica (HE; OSBAECK; MAKOVICKY, 1994). Em temperaturas superiores a aproximadamente 900 °C, podem ocorrer transformações adicionais, como a formação de fases do tipo espinélio e, posteriormente, mulita, reduzindo a reatividade do material (SANTOS, 1989).

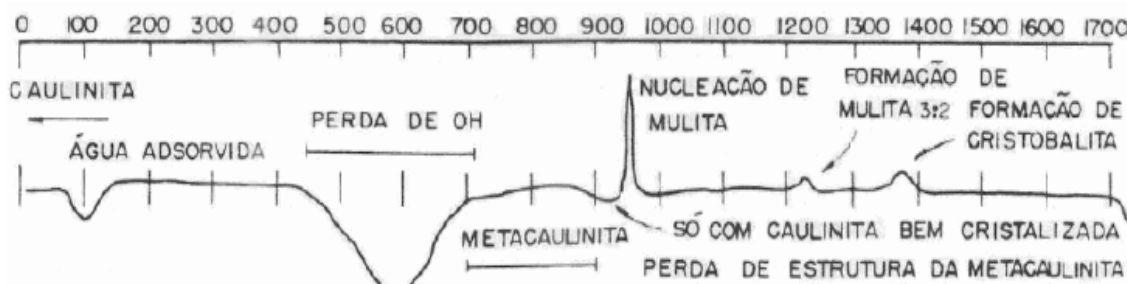
Sob o ponto de vista ambiental, a transformação do caulim em metacaulim envolve essencialmente a liberação de água estrutural, não ocorrendo reação de descarbonatação, diferentemente do processo de produção do clínquer Portland, no qual a decomposição do carbonato de cálcio gera emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂). Assim, embora o processo de calcinação demande energia térmica, o potencial direto de emissão química de CO₂ é consideravelmente inferior ao da produção do cimento Portland (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Adicionalmente, o metacaulim pode ser obtido a partir de rejeitos industriais contendo caulinita, promovendo a valorização de resíduos minerais. Barata (1998) investigou a produção de metacaulim a partir de rejeitos do beneficiamento de caulim utilizados na indústria de papel, verificando elevada reatividade e potencial aplicação em concretos de alto desempenho. Esse tipo de abordagem reforça a viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento de subprodutos industriais na produção de materiais cimentícios alternativos.

O monitoramento do processo de calcinação pode ser realizado por meio de técnicas de análise térmica diferencial (DTA) e termogravimetria (TGA). Essas técnicas permitem identificar eventos endotérmicos associados à perda de água adsorvida e à desidroxilação estrutural, bem como quantificar a perda de massa correspondente. A Figura 6 ilustra as transformações térmicas típicas da caulinita, incluindo a formação do metacaulim e, em temperaturas mais elevadas, o início da nucleação de mulita e cristobalita. A partir dessas análises, é possível determinar a

faixa ideal de calcinação, garantindo a obtenção de um material predominantemente amorfo e com elevada reatividade, condição essencial para aplicações em sistemas geopolimérico (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Figura 6 - Análise termogravimétrica do comportamento da caulinita.



Fonte: Extraída de Santos (1989).

3.2.2 Resíduo da fabricação de catalisadores de FCC

3.2.2.1 Craqueamento em leito fluidizado

Antes de apresentar a origem do resíduo estudado, faz-se necessária uma contextualização sobre o processo de craqueamento catalítico em leito fluidizado (*Fluid Catalytic Cracking* – FCC), amplamente empregado no refino de petróleo.

O craqueamento catalítico foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a produção de frações leves, especialmente gasolina, a partir de cortes pesados do petróleo, como gasóleos e resíduos atmosféricos. O processo ocorre em altas temperaturas (aproximadamente 450–550 °C), na presença de um catalisador sólido finamente particulado, promovendo a quebra (*cracking*) de moléculas de alto peso molecular em compostos menores e de maior valor comercial (CARDOSO, 2008).

O desenvolvimento industrial do processo em leito fluidizado foi intensificado durante a Segunda Guerra Mundial, em função da elevada demanda por combustíveis de aviação. Em 1942, entrou em operação a primeira unidade comercial de FCC, consolidando essa tecnologia como um dos principais processos de conversão no refino moderno (AUGUSTO E SILVA, 2007).

3.2.2.2 Catalisador de FCC

Os catalisadores de FCC são materiais multifásicos complexos, constituídos por partículas esféricas com diâmetro típico entre 50 e 150 µm. De forma geral, são compostos por:

- a) fase ativa (zeólita);
- b) matriz ativa;
- c) ligante (*binder*);
- d) aditivos funcionais (YUN FENG, 2013; MACON, 2015).

Os primeiros catalisadores empregados no craqueamento eram argilas naturais tratadas com ácido. O tratamento promovia a remoção parcial de cátions estruturais, aumentando a acidez superficial e a atividade catalítica. Entretanto, esses materiais apresentavam limitações significativas, como baixa estabilidade térmica e reduzida resistência mecânica, além de seletividade insatisfatória, favorecendo a formação excessiva de coque e gases leves (AUGUSTO E SILVA, 2007).

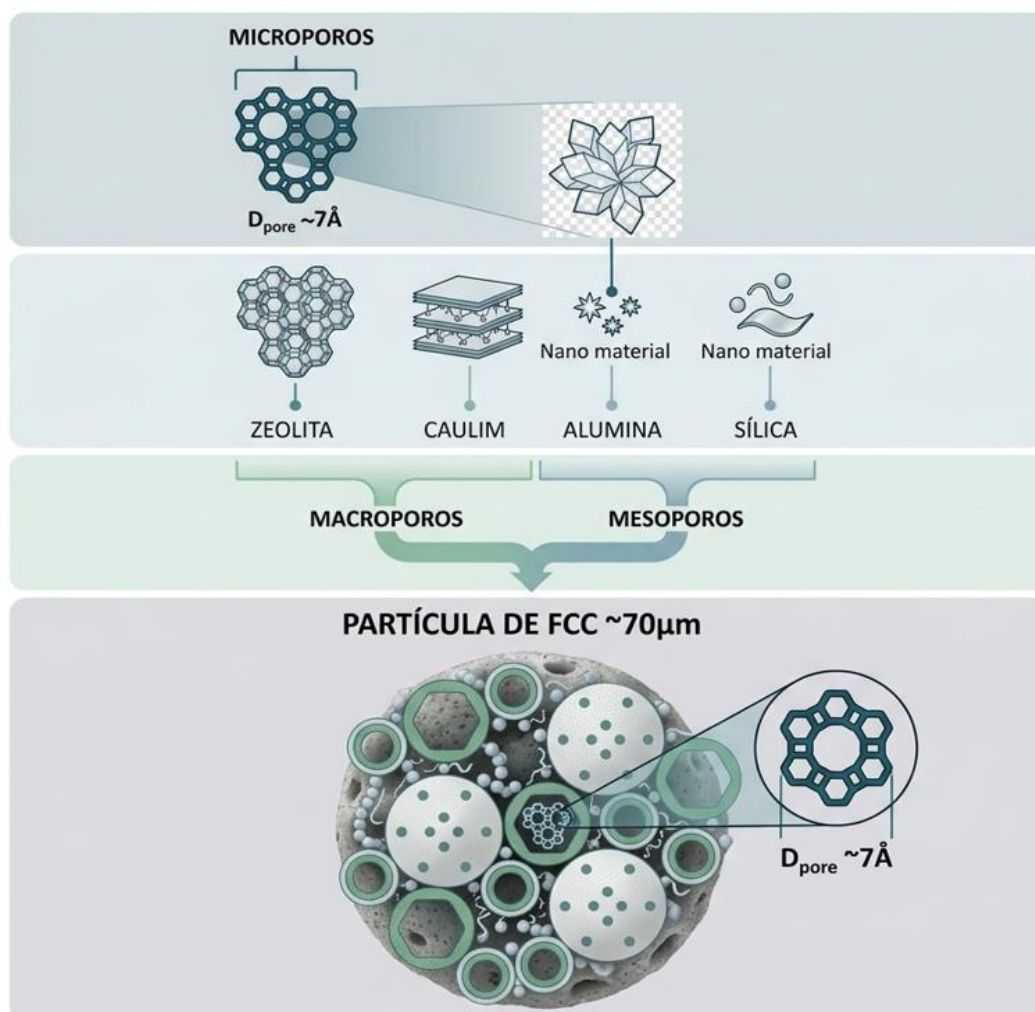
Na década de 1940 foram introduzidos catalisadores sintéticos amorfos de sílica-alumina, com composição típica aproximada de 80–90% SiO_2 e 10–20% Al_2O_3 . Esses materiais apresentaram melhor desempenho catalítico e maior controle da seletividade. Contudo, foi na década de 1960 que ocorreu um avanço decisivo com a introdução das zeólitas sintéticas, especialmente do tipo Y, caracterizadas por estrutura cristalina microporosa com cavidades moleculares bem definidas (AUGUSTO e SILVA, 2007).

Na atualidade, os catalisadores comerciais consolidam-se como sistemas híbridos, estruturados por uma fase zeolítica criteriosamente dispersa em uma matriz de sílica-alumina. Essa arquitetura é estabilizada por um ligante inorgânico, resultando em uma configuração onde a matriz ativa desempenha funções cruciais:

- a) **Estabilidade:** Garante resistência térmica e mecânica ao conjunto;
- b) **Atividade Complementar:** Potencializa a conversão catalítica;
- c) **Eficiência Operacional:** Facilita a difusão molecular e assegura a integridade do material contra o desgaste em condições operacionais severas (MACON, 2015).

De maneira geral, a composição típica de um catalisador de FCC pode ser representada pela Figura 7 abaixo:

Figura 7 - Composição hipotética de um catalisador zeolítico comercial.



Fonte: Adaptado através de inteligência artificial de Weckhuysen *et al.* (2015).

Segundo Sadeghbeigi (2012), essa estrutura multifásica é determinante para o desempenho catalítico, estabilidade estrutural e regenerabilidade do material durante os ciclos sucessivos de reação e queima de coque.

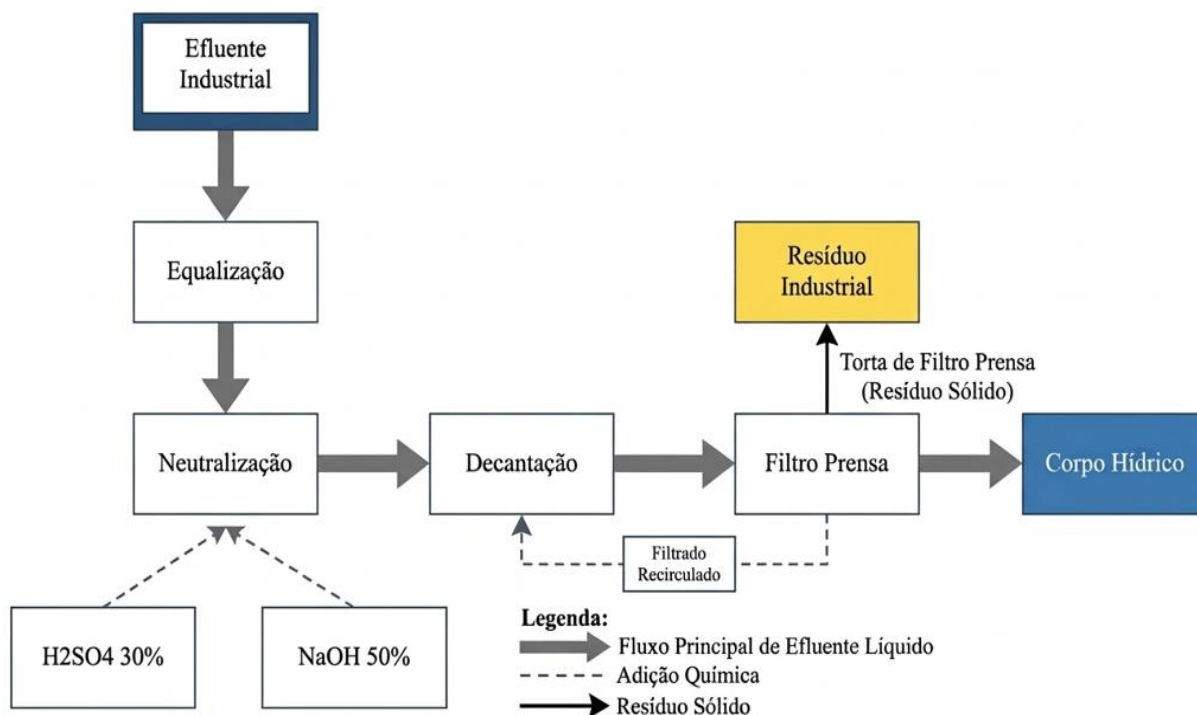
3.2.2.3 Origem do resíduo na FCC

O catalisador de FCC é amplamente utilizado na indústria de refino de petróleo para promover a conversão de frações pesadas em produtos de maior valor agregado, como gasolina, diesel, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e querosene. Durante sua produção industrial são gerados efluentes líquidos contendo material particulado fino e sais dissolvidos.

Na Fábrica Carioca de Catalisadores S.A. (FCCSA), essas correntes são encaminhadas a uma unidade de tratamento de efluentes industriais, onde passam

por etapas de equalização, neutralização química, decantação e filtração em prensa (Figura 8). Nesse processo ocorre a separação da fase líquida tratada da fração sólida inorgânica, que constitui o resíduo objeto deste estudo.

Figura 8 - Fluxo de processos da geração do resíduo industrial na FCCSA.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

O material sólido inicialmente sedimentado é submetido à adição de agentes flocculantes, promovendo a agregação das partículas finas em suspensão. Posteriormente, o lodo é encaminhado a filtro prensa de placas, onde ocorre a desidratação mecânica, resultando em uma torta com teor de sólidos entre 50% e 60%. Após essa etapa, o resíduo é armazenado temporariamente em galpão coberto até sua destinação final (Figura 9).

Figura 9 - Geração do RPC na FCCSA em a) a torta do RPC após saída do filtro prensa, em b) desidratando em galpão coberto e em c) e d) apresenta o RPC nas bacias de decantação de sólidos.



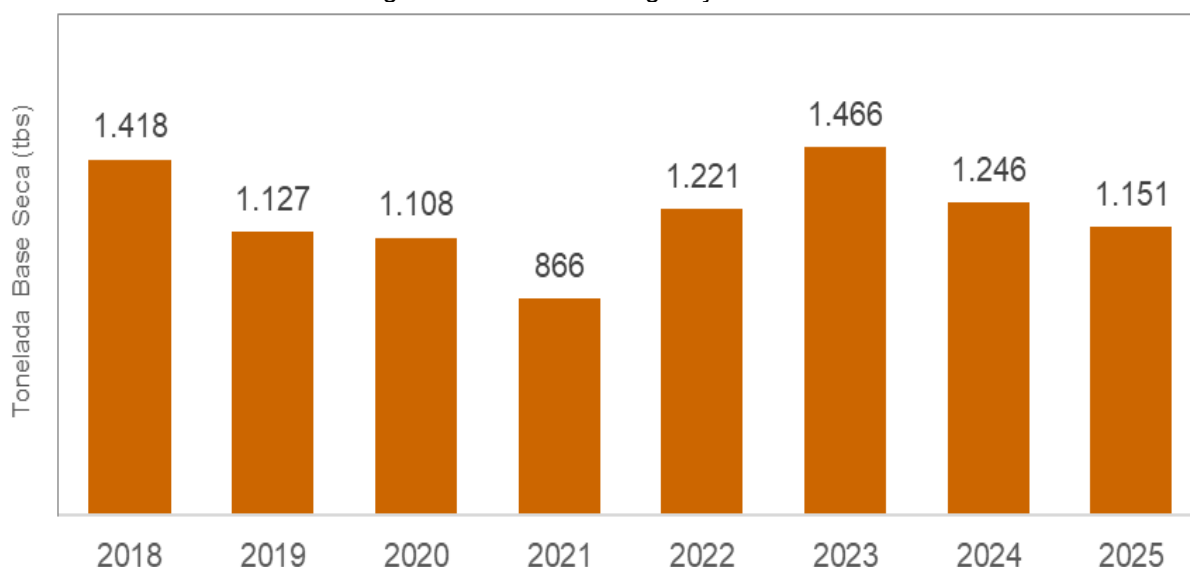
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Atualmente, esse material não possui aplicação tecnológica consolidada, sendo destinado predominantemente a aterros industriais licenciados. Tal prática representa uma destinação ambientalmente passiva, implicando ocupação de volume em aterros e redução de sua vida útil, além de não explorar o potencial de valorização material do resíduo.

A geração desse resíduo está diretamente associada às etapas de síntese de produção dos catalisadores, que envolvem processos de reação química, filtração, secagem e calcinação. Em decorrência dessas operações, formam-se subprodutos sólidos com elevados teores de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), provenientes das perdas de matérias-primas e da purga de sistemas produtivos. A quantidade gerada pode variar em função de parâmetros operacionais, qualidade das matérias-primas, eficiência de reaproveitamento interno e estabilidade das condições de processo.

A Figura 10 apresenta o histórico de geração do RPC nos últimos anos, evidenciando variações associadas a ajustes operacionais e produtivos, bem como a eficiência produtiva.

Figura 10 - Histórico da geração do RPC.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Dados cedidos pelo setor de meio ambiente da FCCSA.

Do ponto de vista normativo, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2020, os resíduos analisados classificam-se como Classe II A – Não Inertes, uma vez que podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, sem, contudo, enquadrar-se como perigosos (ABNT, 2020). A classificação foi realizada com base nos ensaios de lixiviação (ABNT NBR 10005), solubilização (ABNT NBR 10006) e amostragem (ABNT NBR 10007).

Considerando sua composição predominantemente aluminossilicatada e sua classificação como resíduo não perigoso, o material apresenta potencial técnico para ativação alcalina e incorporação parcial em matrizes geopoliméricas, podendo substituir frações de MK. Essa estratégia promove a redução do consumo de matérias-primas virgens e a valorização de subprodutos industriais, alinhando-se aos princípios da economia circular.

Além disso, a aplicação desse material em sistemas cimentícios alternativos, contribui para o avanço de soluções de menor impacto ambiental, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, especialmente o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (ONU, 2015).

3.2.2.4 Restrições técnicas ao reaproveitamento em catálise

Apesar de o RPC gerado na FCCSA apresentar uma matriz predominantemente aluminossilicatada (SiO_2 e Al_2O_3) o que teoricamente sugeriria sua reciclagem e reintrodução no próprio ciclo produtivo da fábrica como fonte de matéria-prima, existe uma barreira química severa que inviabiliza essa rota de economia circular interna: o teor de sódio (Na) contido em sua composição química.

No processo de refino, a eficiência do catalisador de FCC depende crucialmente da preservação da acidez e da cristalinidade da zeólita Y. A literatura científica estabelece que o sódio atua como um dos contaminantes mais deletérios para o sistema catalítico zeolítico (OCCELLI, 1983; SCHERZER, 1989). O mecanismo de desativação ocorre por meio de duas frentes sinérgicas:

- a) **Neutralização de Sítios Ácidos:** O sódio atua como um veneno básico forte. Os cátions Na^+ presentes no meio realizam troca iônica com os prótons dos sítios ácidos de Brønsted (H^+) da zeólita, que são os centros ativos responsáveis pelas reações de cisalhamento das cadeias de hidrocarbonetos (CORMÁ, 1986). Essa neutralização reduz drasticamente a atividade global de craqueamento catalítico.
- b) **Destruição Cristalina (Desvitrificação):** Sob as condições severas de regeneração do FCC — onde o catalisador é submetido a temperaturas superiores a $700\text{ }^\circ\text{C}$ na presença de vapor d'água —, o sódio reduz o ponto de fusão da estrutura de aluminossilicato. Ele atua como um agente fundente, promovendo a migração de espécies de silício e o colapso térmico irreversível da estrutura tridimensional microporosa da zeólita Y (SADEGHBEIGI, 2012). O resultado é a transformação da fase cristalina ativa em uma fase amorfa inativa.

Segundo Sadeghbeigi (2012) e Vogt e Weckhuysen (2015), para que o catalisador mantenha níveis ótimos de conversão de frações pesadas em gasolina e GLP, o teor de sódio (expresso como Na_2O) no catalisador equilibrado deve ser mantido rigorosamente abaixo de 0,2% a 0,5% em massa. Valores acima desse patamar colapsam a área superficial e destroem o catalisador de dentro para fora, gerando subprodutos indesejáveis como excesso de coque e gás hidrogênio.

Como o RPC estudado nesta dissertação provém das etapas de neutralização química e tratamento de efluentes da FCCSA (conforme detalhado na Figura 8), ele carrega uma concentração elevada de sódio remanescente dos processos de síntese e dos agentes químicos utilizados. Caso este material fosse reaproveitado como precursor na formulação de novos catalisadores, o sódio residual migraria para os canais internos da zeólita durante as etapas industriais de calcinação, comprometendo sua estabilidade hidrotermal antes mesmo de o produto ser inserido nas unidades de refino (CERQUEIRA *et al.*, 2008).

Ademais, rotas industriais voltadas a purificar o RPC por meio de sucessivas trocas iônicas com soluções de amônio para a remoção desse teor alcalino gerariam volumes significativos de efluentes salinos, inviabilizando economicamente o reaproveitamento sob a ótica da química verde e da eficiência de processos (CERQUEIRA *et al.*, 2008).

Essa limitação química fundamental justifica o direcionamento proposto neste trabalho. Uma vez descartada a possibilidade de reincorporação do RPC na catálise de refino por conta do envenenamento por sódio, o material valida-se como um excelente candidato para a síntese de matrizes geopoliméricas e sistemas cimentícios alternativos. Nestes sistemas de ativação alcalina, a presença de metais alcalinos como o sódio não é prejudicial; pelo contrário, o sódio atua como um agente estruturante essencial para desencadear as reações de policondensação que consolidam a resistência mecânica do material, viabilizando uma rota de valorização real e ambientalmente segura para o resíduo.

3.2.3 Ativadores alcalinos

Os estudos iniciais sobre ativação alcalina remontam à década de 1940, quando Purdon investigou a reação entre escórias e soluções alcalinas, observando a formação de materiais endurecidos com propriedades cimentícias (DAVIDOVITS, 2008). A partir dessas observações, desenvolveram-se pesquisas voltadas à compreensão do papel das bases fortes na ativação de materiais aluminossilicatados, processo que posteriormente fundamentou o conceito de geopolimerização.

A ativação alcalina consiste na dissolução parcial de estruturas vítreas ou metaestáveis ricas em Si e Al, seguida da reorganização dessas espécies em uma rede tridimensional polimerizada (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999). Quando o precursor entra em contato com a solução altamente alcalina, ocorre a quebra das

ligações Si–O–Si e Si–O–Al, promovendo a formação de espécies silicato e aluminato solubilizados, geralmente complexadas na forma de hidroxialuminatos e hidroxissilicatos (DAVIDOVITS, 1991).

A eficiência do processo depende diretamente da concentração e do tipo de ativador alcalino utilizado. Concentrações insuficientes podem limitar a dissolução do precursor, enquanto concentrações excessivamente elevadas podem comprometer a estabilidade do sistema e favorecer reações secundárias. Em particular, soluções alcalinas residuais expostas ao ar tendem a reagir com o dióxido de carbono atmosférico, formando carbonatos alcalinos, como Na_2CO_3 ou K_2CO_3 , o que pode alterar o pH e a cinética de reação (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007).

Do ponto de vista estrutural, a incorporação do alumínio na rede tetraédrica gera unidades AlO_4^- , que introduzem carga negativa na estrutura. Essa carga é compensada por cátions alcalinos (Na^+ ou K^+), responsáveis pela estabilização eletrostática do gel formado (RATTANASK; CHINDAPRASIRT, 2009). Assim, o ativador ideal deve apresentar concentração suficiente para promover a dissolução inicial e garantir a adequada compensação de cargas na rede polimerizada.

Apesar dos avanços significativos nas últimas décadas, ainda não existe consenso quanto à concentração ótima de ativadores alcalinos, uma vez que essa variável depende da natureza do precursor, da razão Si/Al desejada e das propriedades finais requeridas para o material (PINTO, 2006). Essa variabilidade dificulta a formulação de um modelo universal para o mecanismo de ativação, sendo o processo fortemente dependente das condições experimentais adotadas.

3.2.3.1 Soluções ativadores alcalinas

De acordo com Pinto (2006) as soluções ativadoras podem ser formuladas a partir de compostos contendo metais alcalinos ou alcalino-terrosos, genericamente representados por M , sendo classificadas conforme sua natureza química em:

- a) **saís não silicatos levemente ácidos:** M_2CO_3 , M_3PO_4 , M_2SO_3 , MF;
- b) **saís não silicatos fortemente ácidos:** M_2SO_4 ;
- c) **silicatos alcalinos:** $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$;
- d) **aluminatos:** $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$;
- e) **álcalis cáusticos ou hidróxidos:** MOH.

Na prática, os sistemas mais empregados na ativação alcalina são as combinações entre um hidróxido alcalino (MOH) e o respectivo silicato alcalino ($M_2O \cdot nSiO_2$), sendo M usualmente sódio (Na) ou potássio (K) (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2008). Essa combinação promove maior dissolução do precursor aluminossilicatado e acelera a formação do gel geopolimérico, devido ao aumento do pH e à disponibilidade de espécies silicato solúveis no meio reacional (VAN JAARSVELD; VAN DEVENTER; LORENZEN, 1997).

A natureza e a concentração do ativador influenciam diretamente a cinética de reação, a microestrutura formada e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas dos cimentos geopoliméricos. Por exemplo, a combinação de hidróxido de sódio (NaOH) com silicato de sódio (Na_2SiO_3) favorece a formação de uma matriz mais densa e com menor porosidade aparente, resultando em melhores propriedades mecânicas devido à maior conectividade da rede aluminossilicatada (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2005).

A influência do cátion ativador na geopolimerização gera debates: embora o potássio K^+ tenda a promover um maior grau de policondensação devido ao seu raio iônico superior e menor energia de hidratação, ele também pode aumentar a propensão do material a fissuras. Assim, não há consenso sobre a superioridade entre o sódio Na^+ e o potássio K^+ , sendo o desempenho de cada um dependente das condições específicas do sistema e da composição do gel (KOMLJENOVIC; BAŠČAREVIC; BRADIĆ, 2010).

Nesta pesquisa científica, optou-se pela utilização de ativadores à base de sódio (Na^+) devido sua ampla disponibilidade comercial e melhor relação custo-benefício.

3.2.4 Geopolímeros

3.2.4.1 Processo de geopolimerização

Após o contato entre o precursor aluminossilicatado e a solução ativadora alcalina, inicia-se um conjunto de reações exotérmicas que evoluem de maneira progressiva até o endurecimento do material formado (PALOMO *et al.*, 2004). Esse processo pode ser compreendido como uma geossíntese inorgânica (HERMANN *et al.*, 1999), apresentando similaridades com mecanismos de formação de zeólitas, especialmente no que se refere à dissolução e reorganização estrutural de espécies silicato e aluminato em meio alcalino (PROVIS; VAN DEVENTER, 2005).

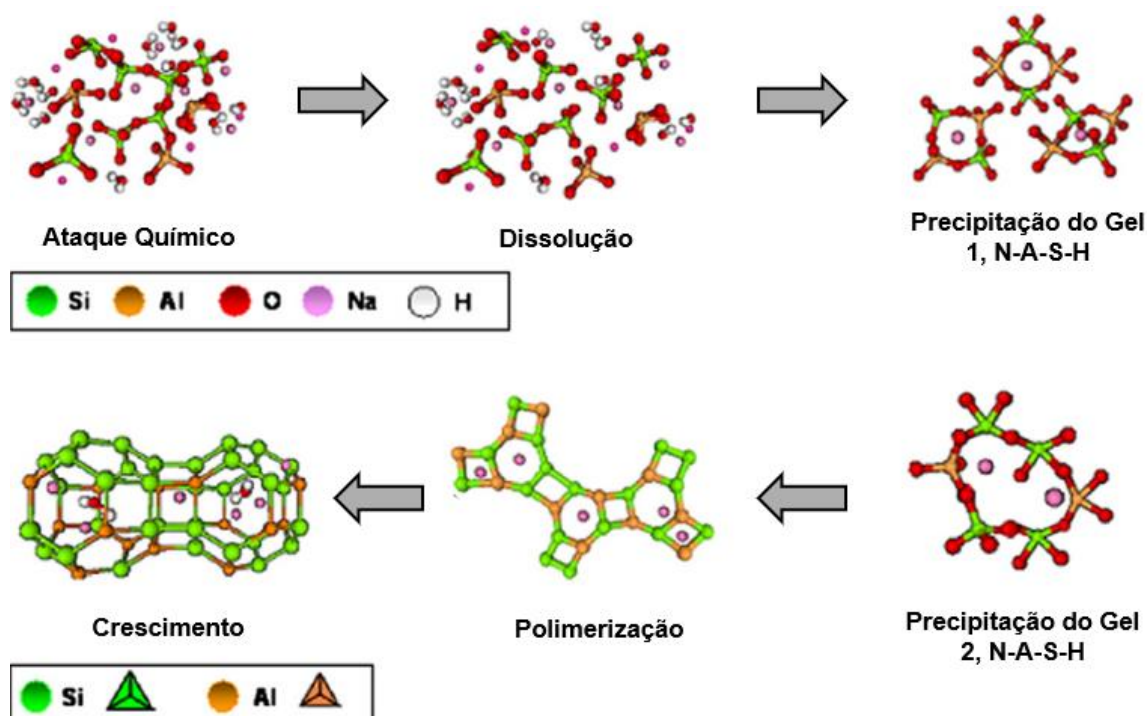
Os primeiros modelos sistemáticos para descrever a ativação alcalina foram propostos por V. Glukhovsky, em 1959. Com base em princípios físico-químicos, o autor dividiu o processo em três estágios principais (PALOMO *et al.*, 2004):

- a) **primeira fase:** destruição da estrutura original do aluminossilicato e formação de espécies reativas (dissolução);
- b) **segunda fase:** coagulação e condensação das espécies dissolvidas;
- c) **terceira fase:** condensação avançada e reorganização estrutural, resultando na formação de uma matriz rígida (DUXSON *et al.*, 2006).

De forma mais detalhada, a geopolimerização pode ser descrita como uma sequência de etapas interdependentes: dissolução, transporte ou reorganização das espécies dissolvidas, gelação (nucleação), policondensação e endurecimento.

Inicialmente, o meio altamente alcalino promove a ruptura das ligações Si–O–Si e Si–O–Al do precursor, liberando espécies silicato e aluminato solúveis. Essas espécies passam então por processos de reorganização e nucleação, formando um gel aluminossilicatado amorfo. Na etapa subsequente, ocorre a policondensação, com formação de ligações Si–O–Al e Si–O–Si, resultando na construção de uma rede tridimensional contínua. O avanço dessa rede leva ao enrijecimento progressivo do material e ao desenvolvimento de resistência mecânica e estabilidade estrutural (DUXSON *et al.*, 2006; RAMOS, 2022). A Figura 11 apresenta um modelo conceitual representando as principais etapas do processo de geopolimerização.

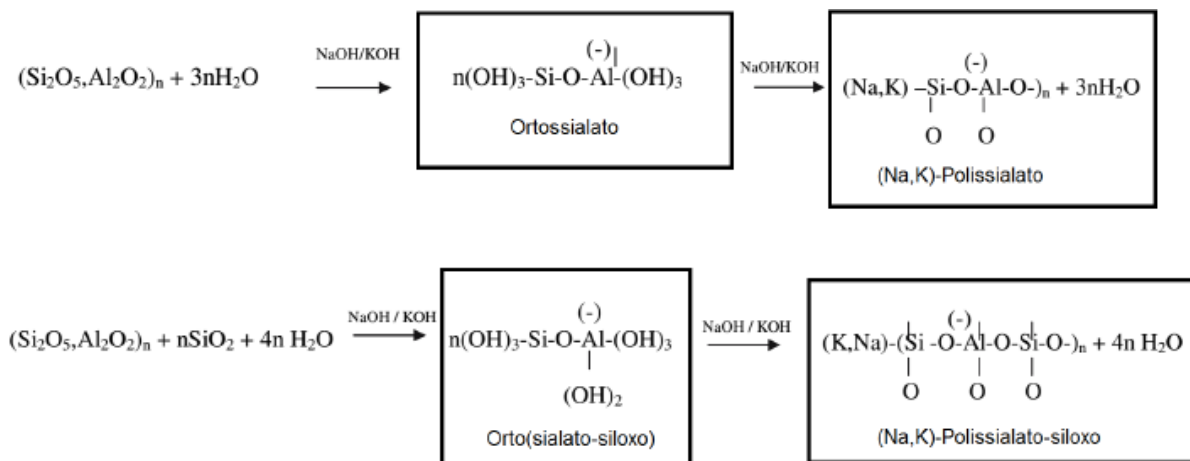
Figura 11 - Modelo conceitual de geopolimerização.



Fonte: Adaptado de Glukhovsky (2011).

Davidovits (1991) descreve a formação de geopolímeros por meio de reações de policondensação envolvendo unidades estruturais de silicato e aluminato, podendo o processo ser representado genericamente pela Figura 14. De forma complementar, Santos (2017) destaca que a razão Si/Al e o tipo de cátion alcalino influenciam diretamente a estrutura final do gel formado, podendo resultar em diferentes arranjos estruturais, como os tipos poli(sialato), poli(sialato-siloxo) e poli(sialato-disiloxo).

Figura 12 - Esquema das reações de policondensação.



Fonte: Extraída de Santos (2017) com base em Davidovits (1979).

Além disso, com base nas reações químicas que ocorrem durante o processo de geopolimerização, observa-se que a água não faz parte da composição final dos geopolímeros, sendo liberada à medida que o produto se forma (Figura 12). Tal comportamento indica que a função da água é essencialmente fornecer as condições permitidas para a dissolução dos precursores e para a transferência das espécies iônicas no meio reacional, influenciando diretamente a trabalhabilidade da pasta geopolimérica (VAN JAARSVELD e VAN DEVENTER, 1999; RAMOS, 2022). Assim, a água atua como um meio de transporte que facilita o contato do ativador alcalino com as partículas sólidas reativas, permitindo o avanço das reações de policondensação que formam a rede tridimensional do geopolímero. Após o suporte, a água é liberada, o que contribui para a compactação e estabilidade do material final, diferentemente do CP, no qual a água participa das ações de navegação. Por isso, o controle da quantidade de água na mistura é fundamental para garantir um bom desempenho mecânico e durabilidade dos geopolímeros (VAN JAARSVELD; VAN DEVENTER; LORENZEN, 1997; RAMOS, 2022).

3.2.4.2 Mecanismos de formação de geopolímero a base de resíduos

O desempenho dos geopolímeros está diretamente relacionado à natureza química e mineralógica das matérias-primas empregadas. No caso de resíduos industriais, as variações composicionais influenciam significativamente os mecanismos de reação e, conseqüentemente, as propriedades finais do material. Minerais silicoaluminados atuam como principais fontes de silício (Si) e alumínio (Al), elementos essenciais para a formação da rede geopolimérica. Por outro lado, resíduos contendo fases ricas em cálcio (Ca), como escórias ou certos tipos de cinzas, podem modificar substancialmente o tipo de gel formado no sistema (CHEN *et al.*, 2025).

Segundo Chen *et al.* (2025), grande parte dos estudos clássicos sobre geopolímeros concentra-se na formação do gel N-A-S-H (sódio-alumino-silicato-hidratado), típico de sistemas com baixo teor de cálcio. Contudo, em matrizes contendo quantidades significativas de cálcio (Ca), podem formar-se géis do tipo C-A-S-H (cálcio-alumino-silicato-hidratado) ou C-S-H (cálcio-silicato-hidratado) modificados, cuja estrutura e comportamento diferem do gel tradicionalmente associado aos geopolímeros de baixa calcinidade. Essa distinção é fundamental para compreender a variabilidade microestrutural e mecânica observada quando diferentes resíduos são utilizados como precursores.

As fases de gel N-A-S-H e C-A-S-H são determinantes para o desenvolvimento estrutural dos materiais álcali-ativados. O mecanismo de formação envolve etapas de dissolução do precursor, reorganização das espécies dissolvidas, nucleação e policondensação, culminando na formação de uma rede tridimensional contínua. A cinética dessas etapas e a interação entre os diferentes tipos de gel influenciam diretamente a microestrutura final e o desempenho do material (BORÇATO, 2024).

O gel N-A-S-H caracteriza sistemas com baixo teor de cálcio, como aqueles produzidos a partir de metacaulim e cinzas volantes classe F. Trata-se de uma estrutura predominantemente amorfa, constituída por unidades tetraédricas de SiO_4 e AlO_4 interligadas e balanceadas por cátions alcalinos (Na^+ ou K^+). Essa organização estrutural confere elevada resistência mecânica, baixa permeabilidade e boa estabilidade química, características associadas à durabilidade desses materiais (BORÇATO *et al.*, 2024; WALKLEY *et al.*, 2015; SEVERO *et al.*, 2013).

Em sistemas ricos em cálcio, como os obtidos a partir de escórias de alto-forno, a formação predominante ocorre via gel C-A-S-H. A incorporação de alumínio na estrutura desse gel o diferencia do gel C-S-H convencional do CP, resultando em modificações na estrutura nanométrica e nas propriedades reológicas e mecânicas. A coexistência de géis N-A-S-H e C-A-S-H pode ocorrer em sistemas híbridos, contribuindo para diferentes padrões de endurecimento e desenvolvimento de resistência (WALKLEY *et al.*, 2015; BORÇATO *et al.*, 2024).

As matérias-primas mais empregadas para obtenção de sistemas aluminossilicatados são cinza volante e metacaulim, geralmente caracterizadas por baixo teor de cálcio. Sob ação de ativadores alcalinos, ocorre a despolimerização das ligações Si-O-Si e Si-O-Al , liberando espécies oligoméricas solúveis. Na sequência, essas espécies passam por processos de condensação e reorganização estrutural, estabelecendo novas ligações Si-O-Al e formando uma rede tridimensional contínua. A remoção progressiva da água livre e a reorganização interna do gel promovem o enrijecimento e consolidação da matriz geopolimérica (JI; PEI, 2018).

Deste modo, as condições de síntese — incluindo concentração do ativador, razão Si/Al , teor de cálcio, temperatura e tempo de cura — influenciam diretamente a cinética de reação, a microestrutura e as propriedades mecânicas e de durabilidade dos geopolímeros. A compreensão detalhada desses mecanismos é essencial para otimizar o aproveitamento de resíduos industriais na produção sustentável de ligantes alternativos de alto desempenho (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

3.2.4.3 Parâmetros de síntese

A síntese de geopolímeros é influenciada por diversos parâmetros físico-químicos e operacionais que controlam a dissolução do precursor, a formação do gel e o desenvolvimento da microestrutura final. Esses fatores incluem as condições de cura, as relações molares entre os constituintes, a concentração do ativador alcalino, o teor de água e os procedimentos de mistura (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

3.2.4.4 Condições de cura

Os métodos de cura empregados em sistemas geopoliméricos incluem banho térmico, estufa ventilada, câmara climatizada e, em estudos específicos, micro-ondas. A cura térmica em estufa ventilada é amplamente utilizada em pesquisas laboratoriais por proporcionar controle adequado de temperatura e umidade, favorecendo o desenvolvimento da resistência mecânica (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2013).

A temperatura de cura influencia diretamente a cinética de dissolução do precursor e a taxa de policondensação das espécies aluminossilicatadas. Estudos pioneiros indicaram que sistemas curados exclusivamente à temperatura ambiente podem apresentar resistência limitada, especialmente quando baseados em cinza volante de baixa reatividade (KATZ, 1998). Wang *et al.* (1994) demonstraram que tipo de ativador, temperatura e tempo de cura atuam de forma combinada na definição das propriedades mecânicas finais.

Kirschner e Harmuth (2004) observaram resistência média de aproximadamente 55 MPa em pastas de metacaulim ativadas com hidróxido e silicato de sódio, submetidas à cura térmica a 75 °C por 4 horas. Em contrapartida, a exposição direta à água durante a cura pode promover lixiviação de álcalis e redução da resistência mecânica.

Temperaturas elevadas aceleram a formação e reorganização do gel N-A-S-H, promovendo ganho rápido de resistência. Entretanto, esse aumento não está necessariamente associado à formação de fases cristalinas, mas sim à maior extensão de policondensação e densificação da matriz (PALOMO *et al.*, 1999; PROVIS; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005). Intervalos excessivamente elevados de temperatura podem induzir retração térmica e microfissuração, comprometendo o desempenho mecânico (HARDJITO; RANGAN, 2005).

Estudos reportam que faixas entre 60 °C e 90 °C, por períodos de 4 a 72 horas, podem otimizar o desenvolvimento inicial de resistência em sistemas à base de cinza volante (THAKUR *et al.*, 2009; HARDJITO *et al.*, 2004). Contudo, a literatura demonstra grande variabilidade nas recomendações, refletindo a dependência das condições de cura em relação à composição do precursor e ao tipo de ativador empregado.

O controle do tempo de cura também é fundamental para evitar perda prematura de água e garantir adequada evolução da reação. Davidovits (1982) já recomendava a proteção das amostras por meio de filmes plásticos para minimizar evaporação e retração inicial. Tempos e temperaturas inadequados podem resultar em fissuração, retração excessiva e redução da durabilidade, especialmente em sistemas com elevada relação água/ligante (VAN JAARVELD *et al.*, 2002).

Dessa forma, a definição das condições de cura deve considerar a natureza do precursor, a composição do ativador e os requisitos de desempenho do material, sendo imprescindível a otimização experimental para cada sistema específico.

3.2.4.5 Dosagem

O desenvolvimento da fase de gel no cimento geopolimérico é fortemente dependente da composição da matéria-prima, do tipo de ativador utilizado e das condições do processo de síntese. Devido às variações na composição química, estrutura molecular e microestrutural dos materiais sintetizados a partir de diferentes fontes, os autores ressaltam a importância de adequar as relações molares ao modelo conceitual da geopolimerização para melhorar a ocorrência (DUXSON *et al.*, 2006).

Segundo Reddy *et al.* (2016), ao compilarem diversos estudos sobre concretos geopoliméricos, evidenciaram que as composições oxidativas das fontes minerais influenciam significativamente a resistência à compressão desses concretos. Constatou-se que os melhores desempenhos foram associados a precursores contendo aproximadamente 45–55% de SiO_2 e 22–28% de Al_2O_3 , desde que a soma de $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ permanecesse inferior a 15–20%, indicando a predominância de sistemas de baixa calcinidade, típicos da formação do gel N-A-S-H.

Davidovits (1982) estabeleceu razões molares ideais para sistemas de sódio (Tabela 2), alertando que desvios nessas proporções comprometem a rede geopolimérica e a resistência mecânica.

Tabela 2 - Compostos reagentes da mistura com razões molares ideais.

Composição	Faixa Molar Ideal
(Na ₂ O, K ₂ O)/SiO ₂	0,20 a 0,28
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,50 a 4,50
H ₂ O/(Na ₂ O, K ₂ O)	15,0 a 17,50
(Na ₂ O, K ₂ O)/Al ₂ O ₃	0,80 a 1,20

Fonte: Davidovits (1982).

Contudo, estudos posteriores indicaram que essas faixas não são universais. Barbosa, Mackenzie e Thaumaturgo (2000), utilizando metacaulim ativado com hidróxido e silicato de sódio, observaram maiores resistências com razões molares ligeiramente distintas das propostas inicialmente por Davidovits conforme Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Faixas molares encontradas utilizando MK ativado com hidróxido e silicato de sódio.

Composição	Faixa Molar Ideal
Na ₂ O/SiO ₂	0,25
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,30
H ₂ O/Na ₂ O	10,0

Fonte: Adaptado de Barbosa *et al.* (2000).

De forma semelhante, Pelisser *et al.* (2013) reportaram resistências à compressão da ordem de 65 MPa utilizando proporções com menor relação Na₂O/SiO₂ (Tabela 4), sugerindo que ajustes na alcalinidade podem favorecer a densificação da matriz.

Tabela 4 - Faixas molares ideais conforme Pelisser (2013).

Composição	Faixa Molar Ideal
Na ₂ O/SiO ₂	0,15
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3,20

Fonte: Adaptado de Pelisser *et al.* (2013).

A relação molar Si/Al merece destaque especial. Davidovits (2008) recomenda valores entre 2,0 e 2,5 para formação de estruturas poli(sialato-siloxo), enquanto Duxson *et al.* (2005) indicam que valores próximos a 1,9 podem favorecer determinadas configurações estruturais, especialmente em sistemas com diferentes graus de polimerização. Essas variações refletem diferenças na natureza do precursor, no teor de cálcio e no método de síntese empregado.

Dessa forma, as evidências demonstram que não existe uma faixa molar universal aplicável a todos os sistemas geopoliméricos. As proporções ideais dependem da reatividade do precursor, da presença de cálcio, da alcalinidade do sistema e das condições de cura. Portanto, a definição da dosagem deve ser orientada tanto por fundamentos teóricos quanto por validação experimental, visando otimizar resistência mecânica, durabilidade e estabilidade estrutural.

3.2.4.6 Efeito da água nas propriedades físico-mecânicas

A água desempenha papel essencial na síntese de geopolímeros, atuando como meio de transporte iônico e facilitando a dissolução das espécies aluminossilicatadas em meio alcalino. Em proporções adequadas, favorece a mobilidade das espécies de Si e Al dissolvidas, contribuindo para a formação de oligômeros e para a evolução da policondensação do gel N-A-S-H ou C-(A)-S-H (PANIAS *et al.*, 2007; THAKUR *et al.*, 2009).

Quantidades insuficientes de água limitam a dissolução do precursor e dificultam a homogeneização da mistura, resultando em menor grau de reação e redução da resistência mecânica. Além disso, a baixa relação água/ligante pode aumentar significativamente a viscosidade do sistema, prejudicando a trabalhabilidade e favorecendo a formação de microfissuras decorrentes de retração autógena (PANIAS *et al.*, 2007).

Por outro lado, teores excessivos de água tendem a aumentar a porosidade capilar após evaporação, reduzindo a densidade da matriz e comprometendo a resistência mecânica. Diferentemente do CP, nos geopolímeros a água não é consumida estequiometricamente na reação, sendo parcialmente liberada durante a policondensação, tornando o controle mais crítico (HARDJITO; RANGAN, 2005).

Assim, a definição da quantidade ótima de água deve considerar a reatividade do precursor, a concentração do ativador e as condições de cura. A literatura frequentemente discute esse parâmetro em termos de relação H_2O/Na_2O ou água/ligante, não havendo um valor universal aplicável a todos os sistemas (DUXSON *et al.*, 2007). O ajuste adequado desse parâmetro é determinante para equilibrar reatividade, trabalhabilidade e desempenho mecânico final.

3.2.4.7 Contribuição dos geopolímeros para a sustentabilidade

Os geopolímeros têm sido amplamente investigados como alternativa de menor

impacto ambiental ao CP, especialmente quando produzidos a partir de resíduos industriais como cinza volante e escória de alto-forno (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). A substituição do CP, cuja produção é altamente emissora de CO₂ devido à calcinação do calcário e ao consumo energético, pode resultar em reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Avaliações de ciclo de vida (ACV) indicam que concretos geopoliméricos podem apresentar redução de potencial de aquecimento global entre 30% e 70%, dependendo da composição do ativador alcalino, da origem do precursor e das condições de transporte (MCLLELLAN *et al.*, 2011; MESHRAM *et al.*, 2025). Entretanto, a produção de silicato e hidróxido de sódio também possui impacto ambiental relevante, o que reforça a necessidade de análise sistêmica para avaliação da real vantagem ambiental (HEATH *et al.*, 2014).

Além da mitigação de emissões, o uso de resíduos industriais contribui para a economia circular ao promover a valorização de subprodutos anteriormente destinados a aterros, reduzindo a extração de matérias-primas naturais (BAO *et al.*, 2020). Associados a elevada durabilidade química e potencial resistência a ambientes agressivos, os geopolímeros apresentam potencial de aumento da vida útil das estruturas, ampliando os benefícios ambientais ao longo do ciclo de vida (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Dessa forma, embora não exista uma solução universalmente sustentável para todas as aplicações, os geopolímeros representam uma alternativa promissora para a construção civil de baixo carbono, desde que sua formulação seja otimizada sob critérios técnicos e ambientais integrados.

3.3 Resumo da revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica demonstrou que os geopolímeros vêm se consolidando como uma alternativa promissora ao CP, especialmente devido ao potencial de redução dos impactos ambientais e ao aproveitamento de resíduos industriais em consonância com os princípios da economia circular. Observou-se crescimento expressivo da produção científica relacionada ao tema nos últimos anos, embora ainda exista espaço significativo para ampliação das pesquisas no cenário brasileiro. O estudo abordou os principais conceitos relacionados aos geopolímeros, incluindo sua estrutura aluminossilicatada, os mecanismos de ativação alcalina e policondensação, bem como a influência da razão Si/Al, do tipo de precursor e das

condições de síntese nas propriedades físico-mecânicas finais. Também foram discutidas as características do MK como precursor de elevada reatividade, além do potencial de aproveitamento do RPC, material rico em sílica e alumínio que atualmente possui destinação predominantemente em aterros industriais licenciados. A revisão evidenciou ainda que parâmetros como tipo e concentração do ativador alcalino, teor de água, temperatura de cura e composição química do sistema exercem influência direta sobre a formação dos géis geopoliméricos e, conseqüentemente, sobre a resistência e durabilidade dos materiais produzidos. Por fim, constatou-se que a incorporação de resíduos industriais em matrizes geopoliméricas representa uma estratégia tecnicamente viável e ambientalmente relevante, contribuindo para a valorização de subprodutos, redução do consumo de matérias-primas naturais e desenvolvimento de materiais cimentícios com menor emissão de carbono no seu processo de produção.

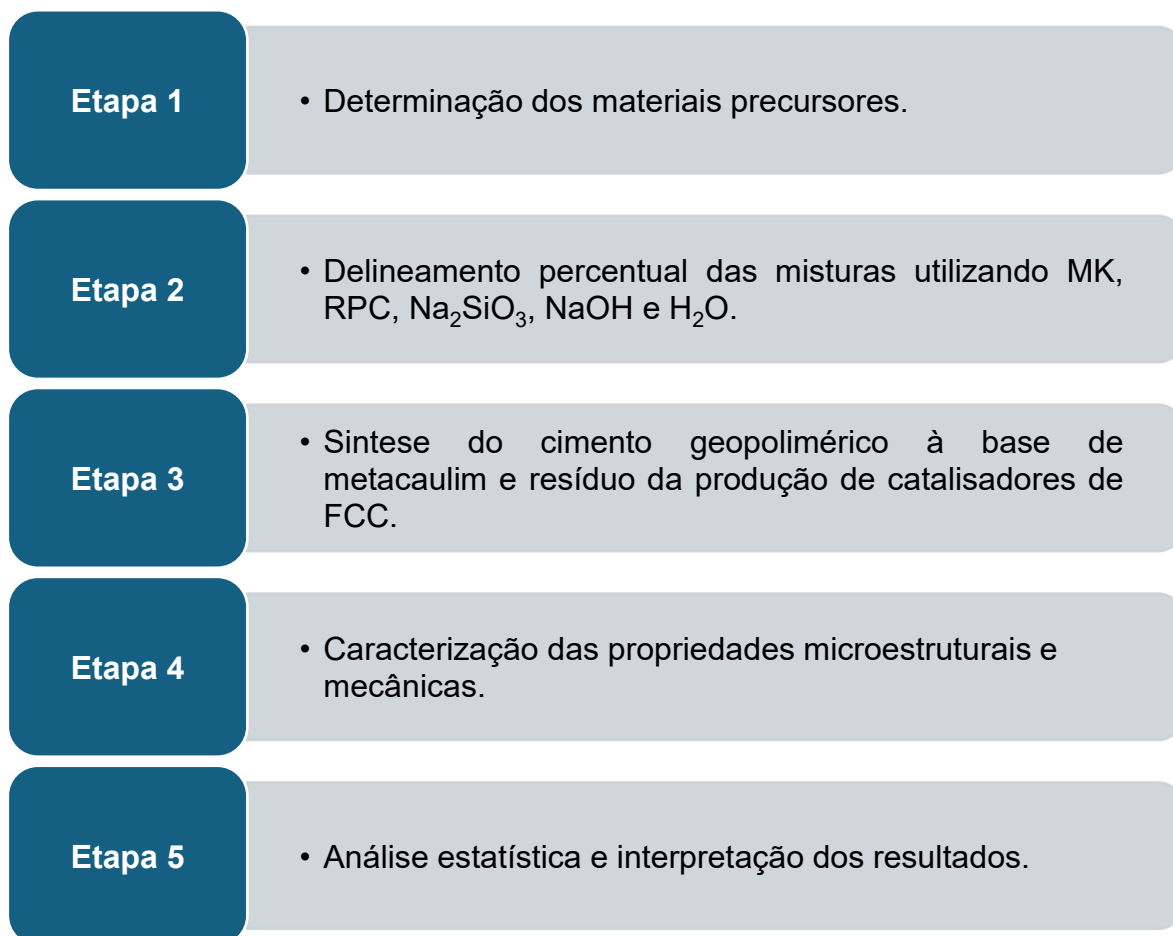
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta, de forma detalhada, os materiais, reagentes e equipamentos utilizados neste trabalho, bem como as metodologias adotadas para a caracterização dos precursores e para a avaliação das propriedades estruturais e mecânicas do cimento geopolimérico produzido.

O objetivo principal desta etapa experimental foi investigar a influência da substituição parcial do metacaulim (MK) pela incorporação de resíduo proveniente da produção de catalisadores de FCC (RPC) nas propriedades físico-mecânicas e microestruturais do material geopolimérico.

Para isso, foi elaborado um plano experimental estruturado em cinco etapas distintas, organizadas conforme a sequência cronológica das atividades desenvolvidas. A sistematização do procedimento experimental é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Fluxo de etapas do plano experimental.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.1 Materiais utilizados

Para a síntese das matrizes geopoliméricas, foram empregados como precursores aluminossilicatos o metacaulim (MK) comercial do tipo HP, produzido pela empresa Metacaulim do Brasil e disponibilizado pelo Laboratório de Pesquisa em Ciência e Engenharia de Materiais (LAPECEng) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), e o RPC proveniente da produção de catalisadores de craqueamento catalítico em leito fluido (UFCC), fornecido pela Fábrica Carioca de Catalisadores S.A. (FCCSA).

A solução ativadora alcalina foi composta por hidróxido de sódio (NaOH) em pérolas, de grau analítico (P.A.) e pureza mínima de 98%, da empresa Dinâmica Química, e por silicato de sódio comercial fornecido pela empresa Auros Química.

Para a preparação das soluções alcalinas e para a diluição dos reagentes, utilizou-se água potável, atendendo aos padrões locais de potabilidade.

4.1.1 Metacaulim

A composição química do MK foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), e os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise química por FRX do MK.

Elemento	Teor (%)
SiO ₂	54,0
Al ₂ O ₃	42,0
Fe ₂ O ₃	0,5
TiO ₂	0,5
CaO	0,1
MgO	0,1
K ₂ O	0,5
Na ₂ O	0,1
SO ₃	0,1

Fonte: Ramos (2017).

O somatório dos teores de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ apresentados na Tabela 5 corresponde a 96,50% da composição do MK. De acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 12653 (2012) e *American Society for Testing Materials* (ASTM) C618 (2012), materiais pozolânicos devem apresentar soma mínima de 70% desses óxidos, sendo valores superiores indicativos de elevado potencial reativo.

Entretanto, a composição química total determinada por fluorescência de raios

X (FRX) não permite avaliar a fração amorfa do material, responsável pela maior parte da reatividade em sistemas geopoliméricos. A dissolução alcalina ocorre predominantemente nas fases estruturalmente desordenadas, enquanto fases cristalinas apresentam menor reatividade (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Assim, parte do SiO_2 e do Al_2O_3 pode estar presente em formas cristalinas pouco reativas, não estando integralmente disponível para os processos de dissolução e policondensação.

De acordo com os critérios estabelecidos pelas normas ABNT NBR 12653:2012, *Indian Standard* (IS) 1344:1981 e ASTM C618:2012, um material é classificado como pozolânico quando apresenta:

- a) $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$;
- b) $\text{SiO}_2 \geq 40\%$;
- c) $\text{CaO} \leq 10\%$;
- d) $\text{SO}_3 \leq 3\%$;
- e) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \leq 3\%$.

Os resultados obtidos para o MK (Tabela 5) atendem integralmente a esses requisitos, confirmando sua adequação como material pozolânico. Além disso, o elevado teor combinado de SiO_2 e Al_2O_3 reforça seu potencial para aplicação na síntese de geopolímeros de base aluminossilicatada.

4.1.2 Resíduo da produção de catalisadores de FCC

4.1.2.1 Amostragem

Com o objetivo de garantir representatividade, confiabilidade e reprodutibilidade dos dados referentes às características químicas do RPC, foi estabelecido um plano de amostragem sistemático, em conformidade com princípios estatísticos aplicáveis à amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

Foram coletadas cinco amostras independentes e representativas do processo produtivo, distribuídas ao longo de um período compreendido entre seis meses e um ano. As coletas foram realizadas no filtro-prensa da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da FCCSA.

A amostragem distribuída temporalmente permitiu capturar possíveis variações sazonais e operacionais do processo industrial, que poderiam influenciar a

composição química e a estabilidade do resíduo gerado. Segundo a ABNT NBR 10007 (2004), a representatividade da amostra é um dos fatores determinantes para a confiabilidade dos resultados analíticos, especialmente quando se trata de resíduos industriais sujeitos a variações no processo produtivo.

O número de amostras e o intervalo temporal adotados possibilitaram avaliar a estabilidade do perfil químico do RPC, identificando eventuais tendências ou flutuações associadas a alterações na matéria-prima ou nas condições operacionais. Tal rigor metodológico foi fundamental para assegurar a robustez dos dados experimentais empregados na caracterização do material e para fundamentar sua aplicação na formulação das matrizes geopoliméricas.

4.1.2.2 Secagem

O RPC coletado na ETE da FCCSA apresentava umidade inicial estimada entre 40% e 50%. A remoção da umidade é etapa fundamental para evitar interferências na dosagem e na reatividade do material, uma vez que a água residual pode alterar a relação água/sólidos do sistema geopolimérico (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

As amostras foram submetidas à secagem em forno de micro-ondas por 15 minutos, divididos em três ciclos consecutivos de 5 minutos, com interrupções para homogeneização e verificação da massa. O processo foi conduzido até que não fosse observada variação significativa de massa, indicando estabilização da umidade.

4.1.2.3 Moagem

Após a secagem, o RPC foi submetido à cominuição mecânica. Inicialmente, realizou-se maceração manual em almofariz e pistilo de ágata, visando à desagregação de partículas e homogeneização preliminar.

Posteriormente, o RPC foi processado em moinho de bolas de alta energia, operando a 500 rotação por minuto (RPM) por 6 horas, com inversão automática do sentido de rotação a cada 30 minutos. A redução do tamanho de partícula é fator determinante para o aumento da área superficial específica e, consequentemente, para o incremento da reatividade em sistemas cimentícios e geopoliméricos (MEHTA; MONTEIRO, 2014; DUXSON *et al.*, 2007). Esse procedimento resultou na obtenção de material particulado fino, favorecendo a dissolução alcalina das espécies aluminossilicatadas durante a síntese do geopolímero.

4.1.3 Ativadores alcalinos

As propriedades químicas e físico-químicas dos ativadores alcalinos foram obtidas a partir das fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes, conforme apresentado nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Propriedades químicas do silicato de sódio.

Elemento	Teor (%)
SiO ₂	25,0 – 30,0
Na ₂ O	7,0 – 10
H ₂ O	55,0 – 65,0

Fonte: Empresa Auros Química (2025).

Tabela 7 - Propriedades físico-químicas dos ativadores alcalinos.

Aspecto	Íquido, viscoso, inodoro, levemente opalescente (acinzentado, esverdeado, amarelado a róseo)	Pastilhas (pérolas) brancas, sólidas, inodoras e com aparência cerosa.
Fórmula	Na ₂ SiO ₃	NaOH
CAS	1344-09-8	1310-73-2
pH	10,00 - 12,00	12,00 - 14,00
Densidade	1.300 – 1400 g/cm ³	Aproximadamente 2,13 g/cm ³ .
Lote	AQ22C086	127200

Fonte: Adaptado de Auros Química (2025) e Dinâmica Química (2025).

4.2 Métodos

4.2.1 Síntese de geopolímero com RPC

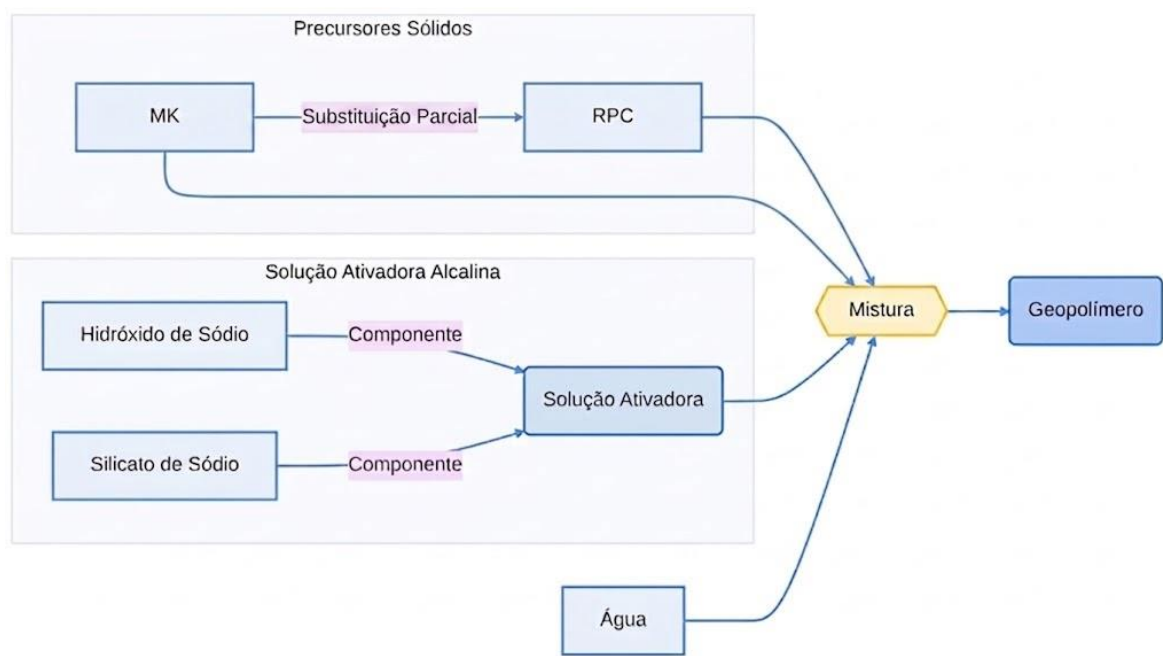
O processo de síntese do geopolímero proposto neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 14, inicia-se com a definição dos precursores sólidos, nos quais o MK foi parcialmente substituído pelo RPC. Essa estratégia teve como finalidade promover a valorização do resíduo e reduzir a dependência de matéria-prima convencional.

Paralelamente, foi preparada a solução ativadora alcalina, composta por hidróxido de sódio (HS) e silicato de sódio (SS) Essa solução é responsável pela dissolução das fases aluminossilicáticas presentes nos precursores, promovendo a liberação de espécies reativas de silício e alumínio.

Posteriormente, os precursores sólidos (MK e/ou RPC) foram incorporados à solução ativadora juntamente com água, cuja função foi ajustar a trabalhabilidade da pasta e favorecer o meio reacional. A interação entre as espécies dissolvidas culmina

na formação de uma rede tridimensional aluminosilicatada por meio da reação de policondensação alcalina, resultando na matriz geopolimérica.

Figura 14 - Esquematisação do geopolímero proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

4.2.1.1 Fração entre as misturas

A definição das proporções das misturas fundamentou-se em critérios estequiométricos amplamente reportados na literatura para obtenção de matrizes geopoliméricas estruturalmente estáveis.

Diversos autores indicam que razões molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compreendidas entre 3,0 e 5,5 favorecem a formação de estruturas tridimensionais adequadas para aplicações estruturais e para imobilização de contaminantes (DAVIDOVITS, 1982 apud VASSALO, 2013; DUXSON *et al.*, 2005; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007; RASHAD, 2013).

Tabela 8 - Razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ utilizado em outras literaturas.

Autor	Fonte de Aluminossilicato	Relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Relação atômica Si/Al	Solução extratora
Zhang <i>et al.</i> (2016)	Cinzas volantes e resíduo industrial	4,0	2,0	0,1 M H_2SO_4
Eswed <i>et al.</i> (2015)	Caulim e Zeólita	3,6	1,8	Água destilada; 0.1 M HCl;

				0.1 M NaOH; 0.1 M NaCl; 1.0 M NaCl
Yunsheng <i>et al.</i> (2007)	Metacaulim e escória de altoforno	4,0	2,0	Ácido acético e acetato de sódio

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2016), Eswed *et al.* (2015), Yunsheng *et al.* (2007).

As relações molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 3,0 e 4,0 foi selecionada como base da produção dos geopolímeros à base de RPC. As relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dos precursores — principais fontes de sílica e alumina — foram determinadas por fluorescência de raios X (FRX).

4.2.1.2 Variação da composição dos precursores

A metodologia de dosagem foi definida por meio de um delineamento experimental do tipo unifatorial, no qual a variável independente foi o teor de substituição do MK pelo RPC.

Foram avaliadas quatro formulações distintas, mantendo-se:

- a) constante a massa total de precursores sólidos (30,0 g);
- b) constantes as proporções da solução ativadora e da água;
- c) constante a massa total dos três traços (59,55 g).

A composição dos precursores sólidos foi variada nos seguintes níveis de substituição do MK:

- a) 100% de MK (Referência);
- b) 10% de RPC;
- c) 25% de RPC;
- d) 75% de RPC.

O RPC foi adicionado em substituição direta à massa de MK reduzida, garantindo que a massa total do precursor aluminossilicático permanecesse constante em todas as formulações.

As tabelas abaixo apresentam as massas em gramas (g) e percentual (%) dos componentes para os três traços experimentais:

Tabela 9 - Composição das misturas e parâmetros de dosagem das pastas geopoliméricas para diferentes teores de substituição de MK por RPC.

Componentes	MK (100%)	RPC (10%)	RPC (25%)	RPC (75%)
Precursores (g)				
MK	30,00	27,00	22,5	7,50
RPC	0,00	3,00	7,50	22,50
Solução Ativadora (g)				
Silicato de Sódio	14,04	14,04	14,04	14,04
Hidróxido de Sódio	12,39	12,39	12,39	12,39
Diluição (g)				
Água	12,12	12,12	12,12	12,12
Massa Total (g)	59,55	59,55	59,55	59,55

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Tabela 10 - Percentual em massa dos materiais utilizados para cada formulação geopolimérica.

Componentes	MK (100%)	RPC (10%)	RPC (25%)	RPC (75%)
Percursores (%)				
MK	43,77	39,39	32,83	10,94
RPC	0,00	4,38	10,94	32,83
Solução Ativadora (%)				
Silicato de Sódio	20,48	20,48	20,48	20,48
Hidróxido de Sódio	18,07	18,07	18,07	18,07
Diluição (%)				
Água	17,68	17,68	17,68	17,68
Massa Total (%)	100,00	100,00	100,00	100,00

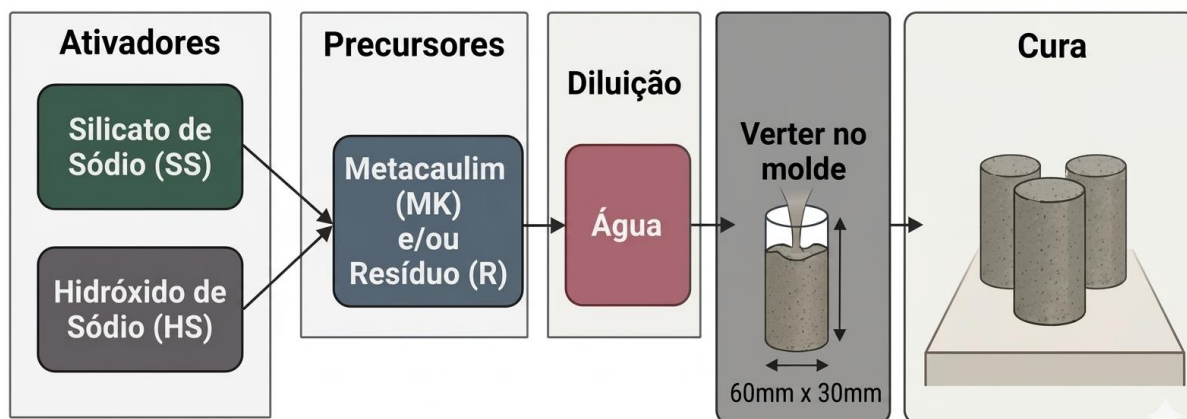
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

É relevante informar que a formulação com 100% de RPC em substituição total ao MK foi excluída deste estudo. Essa decisão foi baseada em resultados de pesquisas preliminares que não obtiveram resultados satisfatórios de desempenho, permitindo a otimização do projeto de pesquisa e o foco nas formulações de substituição parcial.

4.2.1.3 Preparação das pastas geopoliméricas

A preparação das pastas de cimento geopolimérico seguiu um procedimento rigoroso para garantir a uniformidade e a reatividade da mistura. Os passos detalhados na Figura 15 foram estabelecidos com base em testes prévios.

Figura 15 - Fluxo de produção das pastas com adição do RPC.



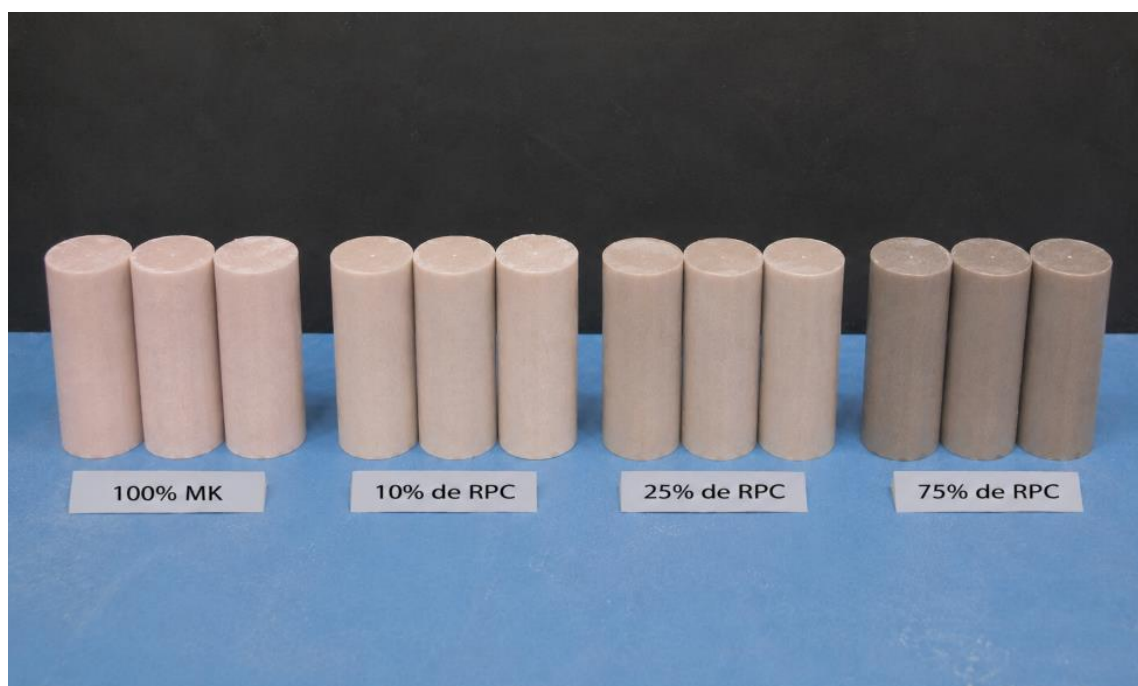
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A produção das pastas geopoliméricas compreendeu as seguintes etapas:

- pesagem dos Materiais:** As quantidades de MK, RPC, silicato de sódio, hidróxido de sódio e água foram determinadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g.
- preparo da Solução Ativadora:** O hidróxido de sódio foi dissolvido no silicato de sódio sob agitação por 4 minutos, resultando em uma solução alcalina homogênea.
- incorporação dos precursores sólidos:** os precursores sólidos foram gradualmente incorporados à solução ativadora, seguidos da adição de água. A mistura foi homogeneizada manualmente por aproximadamente 5 minutos, até obtenção de pasta uniforme.
- moldagem:** as pastas foram vertidas em moldes acrílicos cilíndricos (25 mm × 60 mm), produzindo-se corpos de prova em triplicata para cada formulação. O adensamento foi realizado manualmente por leves impactos contra a bancada e, quando necessário, com auxílio de haste de madeira para eliminação de vazios.
- cura:** a cura foi realizada em temperatura ambiente, sem tratamento térmico

adicional. Os corpos de prova (Figura 16) permaneceram hermeticamente selados e protegidos da luz para preservação da umidade interna e mitigação da carbonatação precoce. O desmolde ocorreu imediatamente antes dos ensaios mecânicos realizados aos 7, 14, 28 e 90 dias.

Figura 16 - Formulações de geopolímeros produzidas em triplicata.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

4.2.2 Técnicas de caracterização

Nos subitens a seguir são descritos os ensaios realizados com o objetivo de caracterizar o cimento geopolimérico à base de MK e RPC.

4.2.2.1 Difratometria de raio X (DRX)

A Difratometria de Raios X (DRX) é uma técnica analítica não destrutiva utilizada para identificação de fases cristalinas em materiais sólidos. O método fundamenta-se na interação da radiação X com planos cristalográficos regularmente espaçados, produzindo padrões de difração característicos que permitem a identificação das fases presentes no material.

A técnica possibilita, inclusive, a distinção entre compostos polimórficos, como o quartzo e a cristobalita (SiO_2), que apresentam diferentes arranjos estruturais.

No caso dos geopolímeros, a matriz resultante da geopolimerização apresenta predominantemente estrutura amorfa ou semicristalina, caracterizada por ordem

atômica de curto alcance. Essa característica é evidenciada por um halo difuso típico situado, em geral, entre 20° e 35° (2θ), conforme descrito por Duxson *et al.* (2007).

Segundo Longhi (2015), a análise por DRX é fundamental para complementar a identificação das fases cristalinas formadas durante o processo de geopolimerização. Além disso, a técnica permite monitorar a possível formação de fases secundárias cristalinas, como zeólitas, que podem se desenvolver em função das condições de cura, alcalinidade do sistema e disponibilidade de espécies reativas.

Dessa forma, realizou-se a caracterização por DRX dos precursores (MK e RPC) e das composições geopoliméricas contendo 0%, 10%, 25% e 75% de substituição do MK por RPC.

As análises foram realizadas utilizando fragmentos dos corpos de prova rompidos aos 28 dias no ensaio de resistência à compressão. Previamente à análise, as amostras foram trituradas em almofariz e pistilo até a obtenção de material pulverizado com granulometria fina através de uma peneira de malha 325 mesh, visando minimizar efeitos de orientação preferencial.

Os ensaios foram conduzidos no laboratório da FCCSA, utilizando difratômetro da marca *Panalytical*, modelo *Cubix*. Os padrões de difração foram coletados no intervalo angular de 5° a 80° (2θ), com taxa de varredura de $2^\circ/\text{min}$, tensão de 30 kV, corrente de 30 mA e radiação $\text{Cu K}\alpha_1$, com comprimento de onda $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$.

4.2.2.2 Fluorescência de raio X (FRX)

Para determinar a composição química dos materiais precursores MK e RPC em termos de óxidos, utilizou-se a técnica de FRX.

4.2.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

De acordo com Dedavid, Gipiela e Machado (2007), a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) fundamenta-se na interação de um feixe de elétrons com a superfície da amostra, permitindo a obtenção de informações morfológicas com elevada resolução.

Diferentemente da microscopia óptica, o MEV apresenta profundidade de campo significativamente superior, conferindo às micrografias aspecto tridimensional e facilitando a interpretação da topografia superficial. Em comparação à Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), o MEV possui resolução inferior, porém destaca-se pela maior simplicidade na preparação das amostras, uma vez que não requer cortes

ultrafinos.

De forma complementar à análise morfológica, utilizou-se a técnica de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), acoplada ao microscópio eletrônico. O EDS possibilita a identificação qualitativa e semiquantitativa dos elementos químicos presentes na amostra, por meio da detecção dos raios X característicos emitidos durante a interação do feixe de elétrons com o material.

No contexto dos geopolímeros, a análise por EDS é relevante para avaliar a distribuição dos principais elementos formadores da rede aluminosilicática (Si, Al e Na), bem como verificar a homogeneidade da incorporação do resíduo industrial na matriz geopolimérica.

As análises microestruturais e químicas foram realizadas em Microscópio Eletrônico de Varredura da marca FEI, modelo Quanta 400, equipado com sistema de microanálise por Energia Dispersiva (EDS) da marca Bruker, modelo *Esprit 2.5*. Os ensaios foram conduzidos no laboratório do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), vinculado à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

As amostras analisadas consistiram em fragmentos dos corpos de prova rompidos aos 28 dias no ensaio de resistência à compressão. Previamente às análises, os fragmentos foram secos e fixados em suportes metálicos apropriados, sendo posteriormente submetidos à metalização com ouro para garantir adequada condutividade elétrica e minimizar efeitos de carregamento superficial.

4.2.2.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi empregada com o objetivo de identificar os principais grupos funcionais presentes nas matrizes geopoliméricas e acompanhar possíveis modificações estruturais decorrentes do processo de geopolimerização.

A técnica baseia-se na absorção de radiação infravermelha associada às vibrações moleculares características das ligações químicas presentes no material. Nos geopolímeros, as bandas associadas às vibrações Si–O–Si e Al–O–Si são particularmente relevantes para avaliação da formação da rede aluminosilicática.

A Tabela 11 apresenta as principais atribuições das bandas características observadas em cimentos geopoliméricos.

Tabela 11 - Tabela característica de FTIR em cimento geopolimérico.

Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição
460 - 470	Vibração de deformação angular Si-O-Si ou O-Si-O
450 - 650	Vibração de deformação Si-O-Si
550 - 750	Vibração de alongamento simétrica Si-O-Si ou Al-O-Si
780 - 800	Vibração de alongamento simétrica Si-O-Si
990 - 1090	Vibração de alongamento assimétrica Si-O-Si ou Al-O-Si
2300 - 3500	Vibração de alongamento -OH, HOH

Fonte: Adaptado de Longhi (2015).

Assim como no ensaio de DRX, as amostras foram previamente processadas em almofariz e pistilo até a obtenção de uma granulometria fina (material particulado) utilizando fragmentos dos corpos de prova rompidos aos 28 dias no ensaio de resistência à compressão.

Para a obtenção dos espectros de infravermelho, utilizou-se o espectrofotômetro Alpha II do laboratório LAB-NANOTEC (UFRRJ). O equipamento opera com cristal de seleneto de zinco (ZnSe), sendo os dados processados por meio do *software KnowItAll Informatics System* da *Bio-Rad Laboratories*.

4.2.2.5 Resistência a compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 25 mm de diâmetro e 60 mm de altura, nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.

Durante o período de cura, as amostras foram mantidas em temperatura ambiente, protegidas da incidência de luz direta (natural ou artificial), a fim de minimizar variações térmicas e processos de carbonatação superficial.

Previamente aos ensaios mecânicos, procedeu-se à desmoldagem das amostras por meio de indução térmica controlada em forno micro-ondas por 30 segundos, com o objetivo de facilitar a extração sem comprometer a integridade estrutural dos corpos de prova.

Os ensaios foram realizados em prensa eletro-hidráulica digital (M/Solotest), com capacidade nominal de 100 toneladas. O procedimento experimental seguiu as diretrizes da ABNT NBR 7215 (1996), adotando-se uma taxa de carregamento de 0,25 ± 0,05 MPa/s.

A resistência à compressão (R_c) foi determinada pela razão entre a carga máxima de ruptura (F_c) e a área da seção transversal do corpo de prova (A_{cp}), conforme a Equação (3):

Equação (3)

$$R_c = (F_c / A_{cp}) = \left(F_c / \frac{\pi d^2}{4} \right)$$

Onde:

R_c : Resistencia à compressão (MPa);

F_c : carga de ruptura compressiva (N);

A_{cp} : area do corpo de prova (mm²);

d : diâmetro (mm).

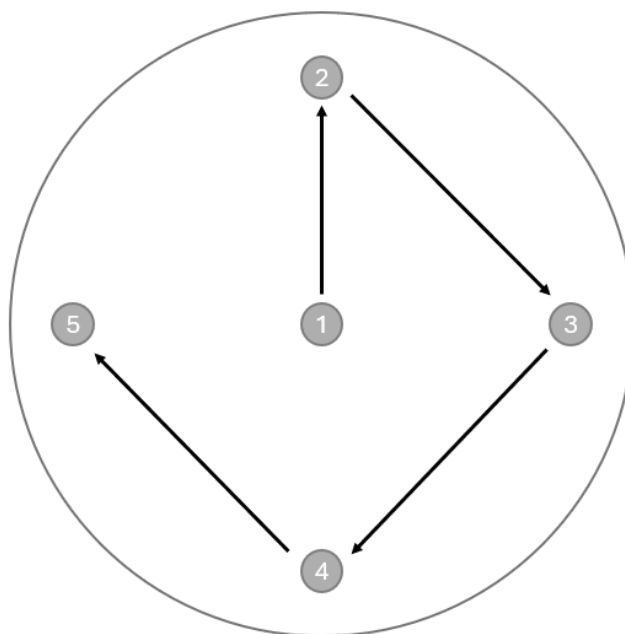
4.2.2.6 Dureza Shore

A dureza superficial das matrizes geopoliméricas foi avaliada por meio do ensaio de Dureza Shore, na escala D, utilizando durômetro calibrado conforme os requisitos da norma ASTM D2240.

O ensaio baseia-se na penetração controlada de um indentador de aço endurecido na superfície do material, sob condições padronizadas de força e tempo de aplicação.

Para garantir representatividade estatística e minimizar efeitos decorrentes da heterogeneidade superficial, foram realizadas cinco medições independentes na face superior de cada corpo de prova. Conforme ilustrado na Figura 17, os pontos de medição foram distribuídos estrategicamente, compreendendo uma medição central e quatro medições periféricas, permitindo a avaliação de diferentes regiões da amostra.

Figura 17 - Pontos de medição de dureza Shore D nos CPs.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Em cada ponto, o durômetro foi mantido em contato com a superfície por período entre 3 e 5 segundos, visando reduzir a influência de relaxação elástica do material. A leitura foi registrada após estabilização do ponteiro.

Adicionalmente, manteve-se distância mínima de 6 mm entre as indentações e das bordas do corpo de prova, conforme recomendado pela norma, evitando interferência de zonas de deformação adjacentes.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Pesquisa em Ciência e Engenharia de Materiais (LAPECEng – UFRRJ), utilizando durômetro digital Shore D (0 – 100 HD).

4.2.2.7 Massa específica

A massa específica aparente das composições geopoliméricas foi determinada a partir dos corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

O cálculo foi realizado pela relação entre a massa da amostra e seu volume geométrico, conforme a Equação (4):

Equação (4)

$$\gamma = \frac{m}{V}$$

Onde:

γ : massa específica do cimento geopolimérico (g/cm³);

m : massa do corpo de prova;

V : volume do corpo de prova;

4.2.3 Síntese das técnicas de caracterização utilizadas

A Figura 18 sintetiza o programa experimental delineado para este trabalho, detalhando as técnicas de caracterização, seus respectivos objetivos fundamentais, parâmetros de análise e os equipamentos utilizados na investigação das propriedades microestruturais, mecânicas e físicas das matrizes desenvolvidas.

Figura 18 - Síntese dos equipamentos utilizados nas técnicas de caracterização.

	Técnica	Objetivo	Características	Equipamento
Propriedades microestruturais	Área Superficial	Determinar a área superficial dos percursos	Método BET por adsorção de nitrogênio	Analizador modelo Analizador de adsorção de N ₂ – Micromeritics Tristar II
	Granulometria	Identificar o tamanho médio das partículas, bem como sua distribuição em faixas de escala.	Amostra em pó e variação entre as escalas D10, D50 e D90.	Analizador BETTERSIZE S3 PLUS
	Fluorescência de Raio X	Quantificar o percentual de óxidos dos materiais.	-	Philips, PW 2400
	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier	Caracterizar as ligações químicas dos materiais e analisar variação das composições.	Banda de variação entre 400 cm ⁻¹ a 4000 cm ⁻¹	Alpha II
	Difração de Raio X	Identificar qualitativamente se há fases cristalinas ou se o material é amorfo.	Velocidade de 2°/min 5 a 80° (2θ)	Analizador Cubix da Panalytical
	Microscopia Eletrônica de Varredura	Analisar a morfologia das partículas	Microscopia com EDS em diversas resoluções.	MEV - FEI Quanta 400 EDS - Esprit 2.5 da Bruker
Propriedades mecânicas	Resistência à Compressão	Determinar a resistência dos CPs em Mpa	100 toneladas	Prensa Eletrohidráulica Digital M/SOLOTEST
	Dureza Shore	Determinar a dureza superficial dos CPs.	5 marcações nas superfícies dos CPs por 3 – 5 segundos	Analizador Digital Shore D de 0 ~ 100 HD
Outras	Massa Específica	Determinar a massa específica dos CPs.	Relação da massa e o volume dos CPs.	Balança analítica + paquímetro digital

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

4.2.4 Análise Estatística

Com o objetivo de avaliar a significância das variações observadas nos resultados experimentais, realizou-se análise estatística por meio da técnica de Análise de Variância (ANOVA) em planilha de Excel com a base de dados dos resultados médios de cada categoria analisada.

Segundo Montgomery (1991), a ANOVA é um método estatístico amplamente empregado para verificar se diferenças entre médias de grupos experimentais são estatisticamente significativas, considerando simultaneamente as variabilidades intra e intergrupos. A aplicação dessa técnica permitiu identificar a influência do teor de substituição do MK por RPC sobre as propriedades mecânicas avaliadas, fornecendo suporte quantitativo para interpretação dos resultados.

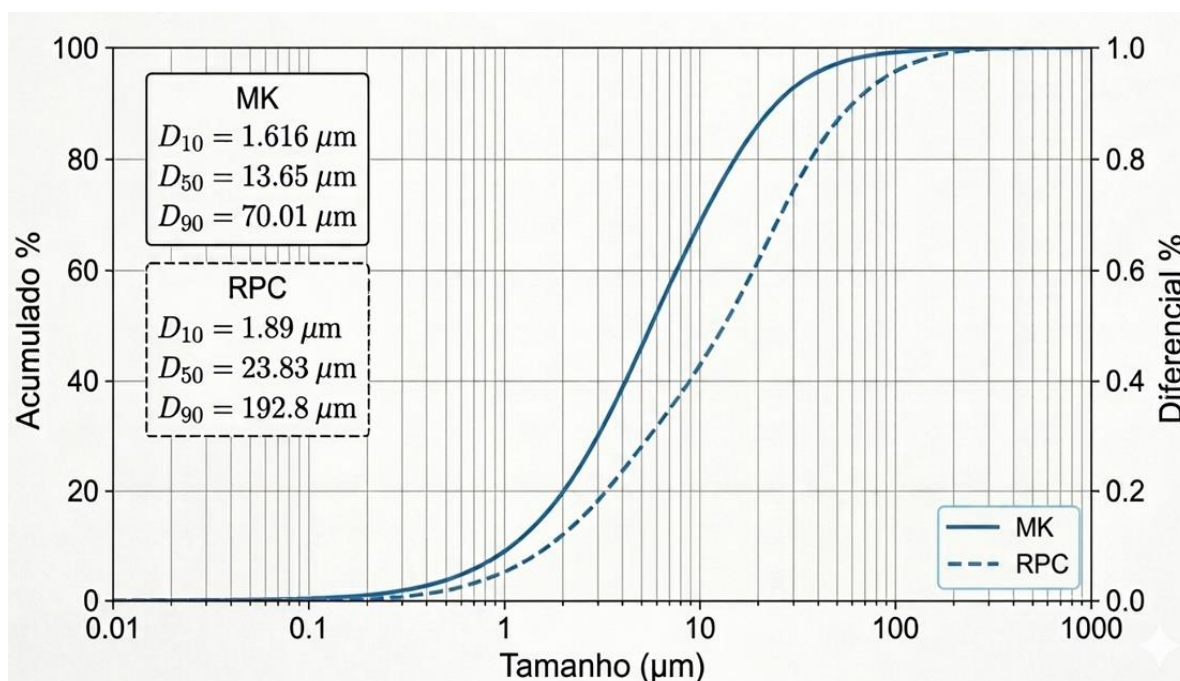
5 RESULTADOS

5.1 Caracterização dos precursores

5.1.1 Granulometria

A Figura 19 apresenta as curvas acumuladas de distribuição granulométrica do MK e do RPC, obtidas por difração a laser. A análise comparativa evidencia diferenças significativas entre os materiais quanto à distribuição e ao tamanho das partículas, parâmetros diretamente relacionados à área superficial específica, à cinética de dissolução em meio alcalino e, conseqüentemente, ao potencial de reatividade no sistema geopolimérico.

Figura 19 - Distribuição granulométrica acumulada do MK e do RPC.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Os resultados obtidos para o MK indicaram diâmetros característicos correspondentes a $D_{10} = 1,616 \mu\text{m}$, $D_{50} = 13,65 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 70,01 \mu\text{m}$. Esses valores demonstram uma distribuição granulométrica relativamente fina e mais homogênea, com 50% das partículas apresentando diâmetro inferior a aproximadamente $14 \mu\text{m}$. Tal comportamento favorece maior área de contato entre o precursor e a solução ativadora alcalina, contribuindo para maior dissolução das espécies aluminossilicatadas e intensificação da reação de geopolimerização. Estudos indicam que partículas mais finas apresentam maior área superficial específica e maior taxa

de dissolução em soluções alcalinas, favorecendo o desenvolvimento das propriedades mecânicas dos geopolímeros (AZEVEDO, 2017)

Complementarmente, dados da literatura reportam que o metacaulim comercial pode apresentar diâmetro médio em torno de 9,34 μm , área superficial específica de aproximadamente 160.000 cm^2/g e massa específica de 2,57 kg/dm^3 , características associadas à elevada reatividade pozolânica do material (METACULIM DO BRASIL, 2016; RAMOS, 2017).

Por outro lado, o RPC apresentou distribuição granulométrica mais ampla e heterogênea, com valores de $D_{10} = 1,89 \mu\text{m}$, $D_{50} = 23,83 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 192,8 \mu\text{m}$. Observa-se que o valor de D_{50} do RPC é aproximadamente 75% superior ao do MK, enquanto o D_{90} é cerca de três vezes maior, indicando maior presença de partículas grosseiras. Esse comportamento evidencia menor área superficial específica disponível para reação e, conseqüentemente, menor potencial de dissolução em meio alcalino.

A diferença entre as curvas granulométricas também demonstra que o RPC possui maior amplitude de distribuição de partículas, sugerindo menor uniformidade granulométrica quando comparado ao MK. Segundo a literatura, o aumento do tamanho médio das partículas reduz a taxa de dissolução dos compostos amorfos em meio alcalino, impactando negativamente a reatividade dos precursores geopoliméricos (AZEVEDO *et al.*, 2019; RIBEIRO *et al.*, 2017). Devido a este processo, o RPC passou por um processo de moagem para reduzir o tamanho média das partículas e, conseqüentemente, obter melhores taxas de reação durante a produção das pastas geopoliméricas.

A análise granulométrica foi realizada por difração a laser utilizando o equipamento *BETTERSIZE S3 PLUS*, que integra técnicas de difração a laser e análise dinâmica de imagem. O procedimento experimental incluiu dispersão ultrassônica por 2 minutos, rotação a 1600 rpm e análise no modo *multipeak* utilizando o modelo óptico de *Mie*, considerando índice de refração das partículas de 1,52 – 0,1i e do meio dispersante (água) de 1,333. A taxa de obscurecimento registrada para o RPC foi de 12,09%, valor situado dentro da faixa recomendada para garantir a confiabilidade das leituras granulométricas.

5.1.2 Área superficial

A área superficial específica constitui um dos principais parâmetros para avaliar a reatividade potencial de materiais utilizados como precursores geopoliméricos, uma vez que está diretamente relacionada à disponibilidade de sítios ativos para dissolução em meio alcalino. Em geral, materiais com maior área superficial apresentam maior contato com a solução ativadora, favorecendo a dissolução das fases amorfas ricas em sílica e alumina e, conseqüentemente, acelerando as reações de geopolimerização (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; DAVIDOVITS, 2020).

Os resultados apresentados na Tabela 12 evidenciam uma diferença significativa entre os materiais estudados. O MK apresentou área superficial inferior a 10 m²/g, valor compatível com aqueles reportados para metacaulins comerciais utilizados como precursores geopoliméricos, os quais normalmente variam entre aproximadamente 5 e 20 m²/g, dependendo da matéria-prima e das condições de calcinação (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; TEIXEIRA, 2018).

Tabela 12 - Área superficial específica dos materiais estudados.

Material	Resultado em m²/g
MK	< 10
RPC	155

Fonte: RPC elaborado pelo Autor (2025) e MK por Teixeira (2018).

Por outro lado, o RPC apresentou área superficial de 155 m²/g, aproximadamente uma ordem de grandeza superior à observada para o MK. A elevada área superficial observada para o RPC pode ser atribuída, em grande parte, à presença da zeólita utilizada como fase ativa do catalisador de FCC. As zeólitas são materiais cristalinos altamente porosos, caracterizados por uma extensa rede de microporos e elevada área superficial específica, propriedades que justificam sua ampla aplicação como catalisadores industriais (CUNDY; COX, 2003; ČEJKA; CORMA; ZONES, 2010). Dessa forma, mesmo após sua desativação e geração como uma parte integrando do RPC, parte dessa estrutura porosa permanece preservada, justificando o valor significativamente superior de área superficial quando comparado ao MK. Essa característica pode favorecer a interação entre o material e a solução ativadora durante a geopolimerização, ampliando a superfície disponível para as reações de dissolução das fases reativas.

5.1.3 Composição química por FRX

A composição química do RPC foi determinada por FRX técnica amplamente empregada na caracterização de materiais cimentícios suplementares devido à sua precisão, rapidez e natureza não destrutiva. Entretanto, o resultado do MK foi baseado nos resultados de Ramos (2017) devido ao mesmo material utilizado neste trabalho.

Para o RPC, as amostras foram preparadas por fusão com mistura fundente composta por tetraborato de lítio (65,9%), metaborato de lítio (32,9%) e iodeto de lítio (1,2%), com posterior obtenção de pastilhas vítreas, procedimento que minimiza efeitos de matriz e aumenta a confiabilidade analítica. A quantificação dos elementos foi realizada com base em curvas de calibração obtidas a partir de padrões certificados, aplicando-se correções de matriz para maior acurácia (C2LAB, 2023; AFINKOPOLÍMEROS, 2024).

Os resultados obtidos para ambos os materiais estão apresentados na Tabela 13, permitindo comparação direta entre os precursores pozolânico (MK e o RPC).

Tabela 13 - Composição química do MK e do RPC por FRX (% em massa).

Elemento	MK	RPC1	RPC2	RPC3	RPC4	RPC5	Desv.P
Al ₂ O ₃	42,0	47,36	45,01	54,80	46,81	49,53	3,77
SiO ₂	54,0	36,99	34,38	26,19	36,54	36,25	4,52
Na ₂ O	0,1	7,63	9,20	5,82	5,91	5,95	1,49
SO ₄	0,1	5,96	8,60	11,22	8,63	6,45	2,09
La ₂ O ₃	0,0	1,16	1,79	1,01	0,93	0,59	0,44
Outros	3,8	0,90	1,02	0,96	1,18	1,23	0,14

Fonte: MK por Ramos (2017) e o RPC elaborado pelo Autor (2025).

Observa-se que o MK apresenta composição típica de material altamente aluminossilicatado, com predominância de SiO₂ (54,0%) e Al₂O₃ (42,0%), resultando em somatório de SiO₂ + Al₂O₃ igual a 96,0%. Esse valor é significativamente superior ao limite mínimo de 70% estabelecido pelas normas ABNT NBR 12653 (2012), IS 1344 (1981) e ASTM C618 (2012) para classificação como material pozolânico.

Segundo Vassallo (2013), quando esse somatório ultrapassa 90%, o material pode ser preliminarmente classificado como de elevada reatividade potencial. No entanto, destaca-se que a FRX fornece apenas a composição química global, não distinguindo fases cristalinas de amorfas, o que significa que nem todo o SiO₂ e Al₂O₃

identificado está necessariamente disponível para reação no sistema geopolimérico.

O RPC, por sua vez, apresenta também caráter predominantemente aluminossilicatado, com teores expressivos de Al_2O_3 (54–45%) e SiO_2 (26–37%). Entretanto, diferencia-se do MK pela presença significativa de Na_2O (5–9%) e SO_4 (6–11%), além de maior variabilidade composicional entre as amostras analisadas.

A concentração de Na_2O encontrada no RPC pode contribuir para o aumento da alcalinidade do sistema reacional, potencialmente favorecendo a dissolução de fases amorfas. Por outro lado, o teor relevante de sulfatos pode influenciar o comportamento reológico e a formação de fases secundárias, dependendo das condições de ativação e cura.

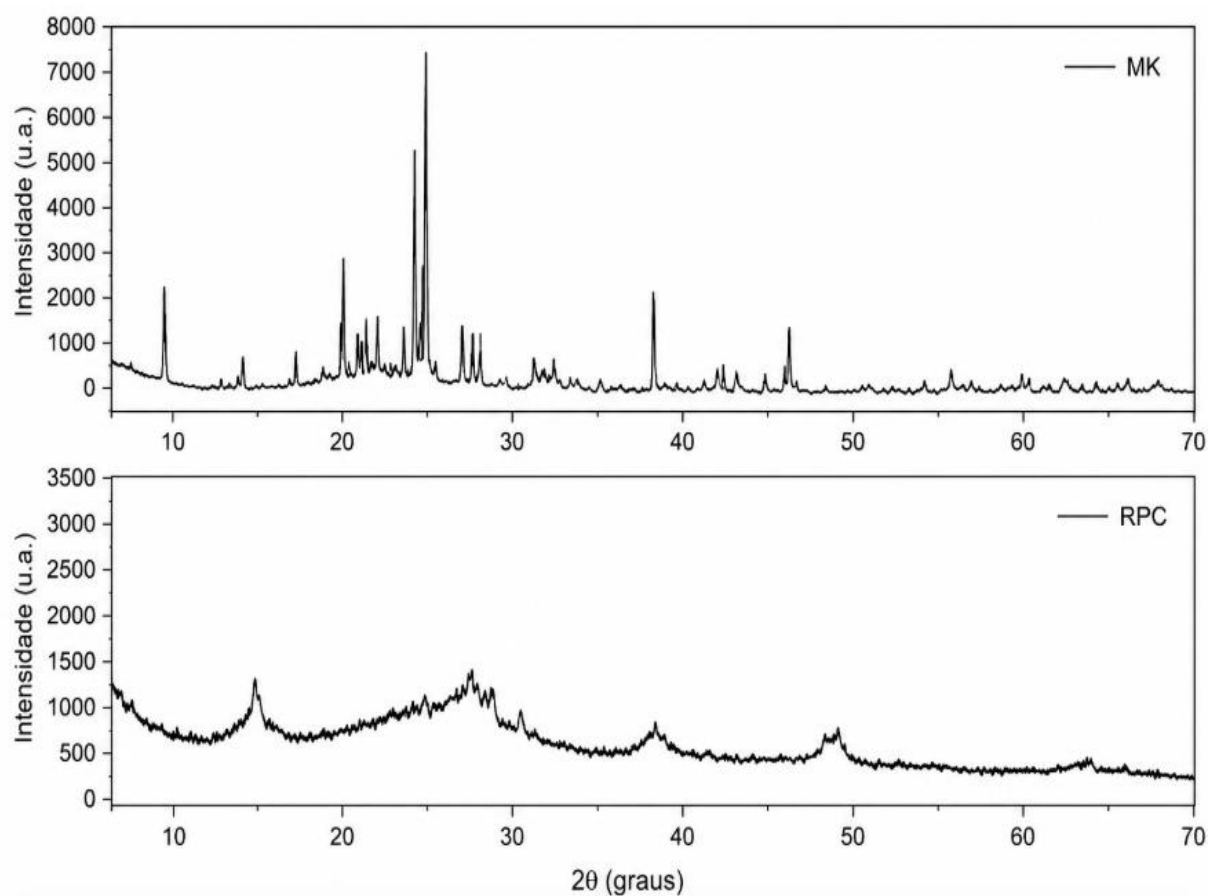
Comparativamente, verifica-se que:

- a) O MK apresenta composição mais estável e concentrada em óxidos de SiO_2 e Al_2O_3 ;
- b) O RPC apresenta maior heterogeneidade química por conter outros elementos em sua composição;
- c) Ambos possuem perfil químico compatível com sistemas ativados alcalinamente devido ao elevado teor de SiO_2 e Al_2O_3 ;
- d) Apenas o MK atende integralmente aos critérios normativos clássicos de material pozolânico segundo ABNT NBR 12653 (2012) e ASTM C618 (2012).

5.1.4 Difratometria de raio X (DRX)

A análise de DRX foi empregada para identificar a presença de fases cristalinas ou amorfas, bem como para avaliar a organização estrutural dos materiais. A Figura 20 apresenta os difratogramas dos precursores sólidos utilizados nas pastas geopoliméricas: o MK e o RPC.

Figura 20 - Difratoograma do MK e do RPC.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A identificação das fases cristalinas presentes no MK e no RPC foi realizada por meio da indexação dos picos de difração, utilizando como referência as fichas cristalográficas do banco de dados ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). A Tabela 14 sumariza os principais picos observados em graus (2θ) com ângulo de varredura de 0° a 70° , os respectivos espaçamentos interplanares, os desvios calculados e os índices de Miller (hkl) correspondentes a cada plano de difração identificado para ambos os materiais.

Tabela 14 - Identificação dos principais picos e dos índices de Miller na DRX.

Materiais Identificados	Picos Principais ($^\circ 2\theta$)	Desv.P (Å)	Índice de Miller (hkl)
MK			
Quartzo	26,5	3,34	(100)
Quartzo	20,8	4,26	(101)

Quartzo	50,1	1,82	(112)
Mulita	26,1	3,41	(120)
Mulita	33,2	2,70	(220)
Mulita	40,8	2,21	(220)
Ilita	9,0	2,1	(001)
Ilita	29,6	3,34	(100)
RPC			
Faujasita	6,2	0,02	(111)
Faujasita	10,2	0,05	(220)
Faujasita	14,6	0,03	(331)
Faujasita	31,4	0,05	(555)
Quartzo	26,6	0,02	(101)
Quartzo	48,9	0,02	(121)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

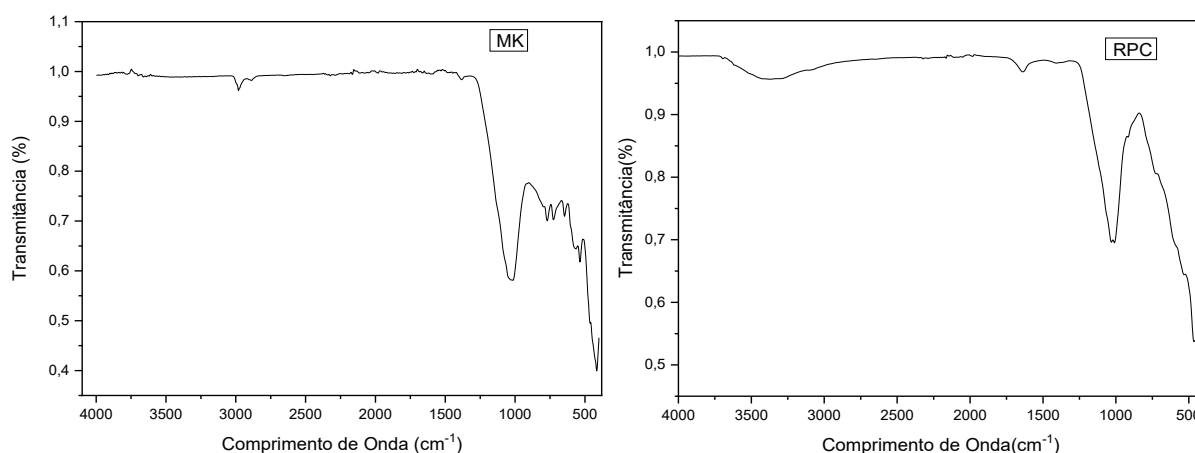
O difratograma do MK (Figura 20) revela a coexistência de uma fase desordenada com fases cristalinas remanescentes. Observa-se um halo amórfico pronunciado na região de $\sim 15 - 35^\circ$ (2θ), indicativo de uma desidroxilação eficaz que confere ao material potencial reatividade pozolânica (LATTANZI *et al.*, 2025). Paralelamente, a presença de picos intensos de quartzo e traços de caulinita residual reflete a carga mineralógica original do precursor.

Em contraste, o RPC (Figura 20) exibe um perfil predominantemente amorfo, caracterizado por bandas de difração largas e de baixa intensidade. Essa natureza desordenada, associada a vestígios de estruturas zeolíticas degradadas provenientes do processo de produção de catalisadores, sugere uma reatividade química superior à do MK para a síntese de novos materiais (PACEWSKA *et al.*, 2011). Enquanto o MK mantém uma estabilidade mineralógica marcada por picos definidos, o resíduo apresenta-se como uma fonte de aluminossilicatos mais acessível ao ataque alcalino.

5.1.5 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

As análises de FTIR do MK e do RPC na Figura 21 confirmam a natureza aluminossilicatada de ambos os precursores, apresentando bandas vibracionais fundamentais para a reatividade do sistema.

Figura 21 - Análise de FTIR do MK e do RPC.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Tabela 15 - Classificação das principais bandas de FTIR do MK.

Localização (cm ⁻¹)	Modo Vibracional	Interpretação
~2990	Vibração de alongamento -OH, HOH	Rede amorfa de aluminossilicato.
~1080	Estiramento assimétrico Si-O-T (T=Si ou Al)	Rede amorfa de aluminossilicato.
~800	Estiramento Al-O (hexacoordenado)	Alumínio residual da estrutura original.
~400	Dobramento Si-O-Si	Deformação da rede tetraédrica de sílica.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Tabela 16 - Classificação das principais bandas de FTIR do RPC.

Localização (cm ⁻¹)	Modo Vibracional	Interpretação
~3450	Estiramento assimétrico O - H	Rede amorfa de aluminossilicato.
~1630	Deformação H-O-H	Umidade superficial.
~1010	Vibração Si-O-Al	Fase ativa para síntese de geopolímeros.
~570	Vibração Si-O-Al	Possível ligação entre tetraedros de sílica e alumina.
~460	Dobramento Si-O-Si	Deformação da rede tetraédrica de sílica.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

No MK, a ausência de bandas na região de 3600 a 3700 cm⁻¹ atesta a eficiência da calcinação e a desidratação completa da caulinita original (PANCHAREE *et al.*, 2021). A banda principal em ~1080 cm⁻¹ associada ao estiramento assimétrico de ligações Si-O-T (T=Si ou Al), exibe um perfil largo e intenso, o que caracteriza a quebra

da ordem de longo alcance e a formação de uma estrutura metaestável e amorfa, altamente propensa à ativação alcalina (BARBOSA *et al.*, 2000; PANIAS *et al.*, 2007). Adicionalmente, as bandas em 800 cm^{-1} e 400 cm^{-1} indicam a presença de alumínio em coordenação tetraédrica, fator determinante para a rápida dissolução e posterior policondensação da matriz (KUENZEL *et al.*, 2012).

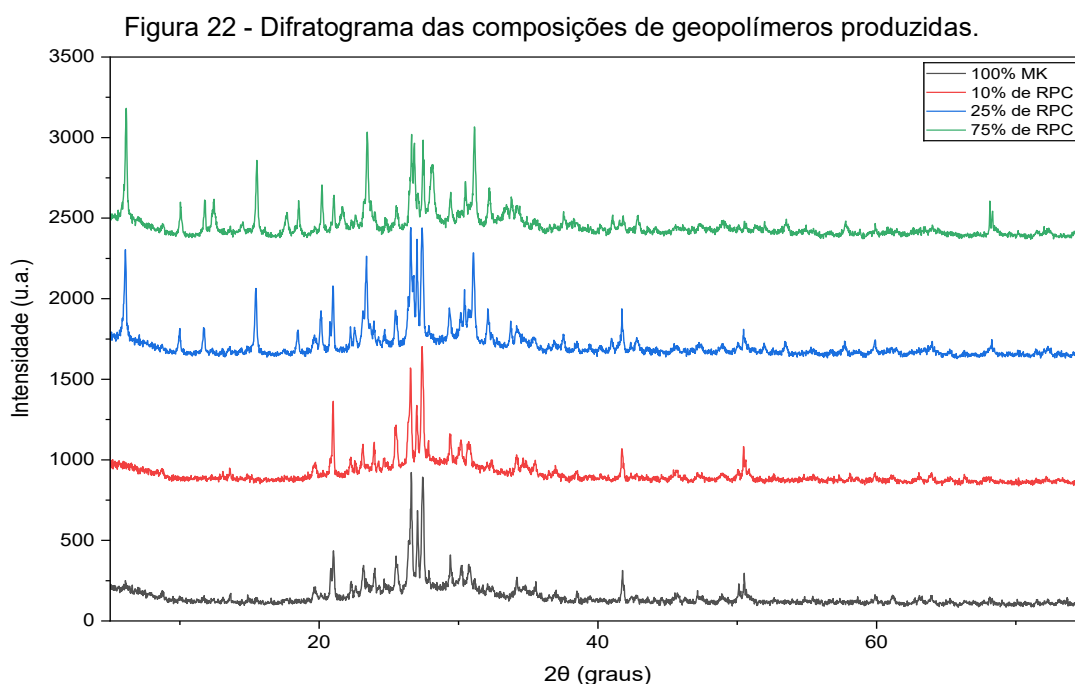
O RPC apresenta um espectro similar, com a banda de estiramento Si-O-T situada em aproximadamente $1010\text{-}1080\text{ cm}^{-1}$, reafirmando seu potencial como coprecursor. Um diferencial relevante é a presença de uma banda em $\sim 570\text{ cm}^{-1}$, atribuída à vibração de anéis duplos de seis membros (D6R), característica da estrutura zeolítica Faujasita (GIANNETTO *et al.*, 2000). Diferente do MK, o RPC exibe bandas em 3450 cm^{-1} e 1630 cm^{-1} referentes à água adsorvida e grupos hidroxila superficiais (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2010). Em ambos os materiais, as vibrações de dobramento Si-O-Si em baixas frequências ($\sim 450\text{ cm}^{-1}$) confirmam a integridade da rede tetraédrica que servirá de base para a rede geopolimérica.

5.2 Caracterização dos geopolímeros produzidos

5.2.1 Caracterização microestrutural

5.2.1.1 Difratomia de raio X

A Figura 22 reúne os difratogramas das composições de geopolímeros produzidos a base de RPC e MK.



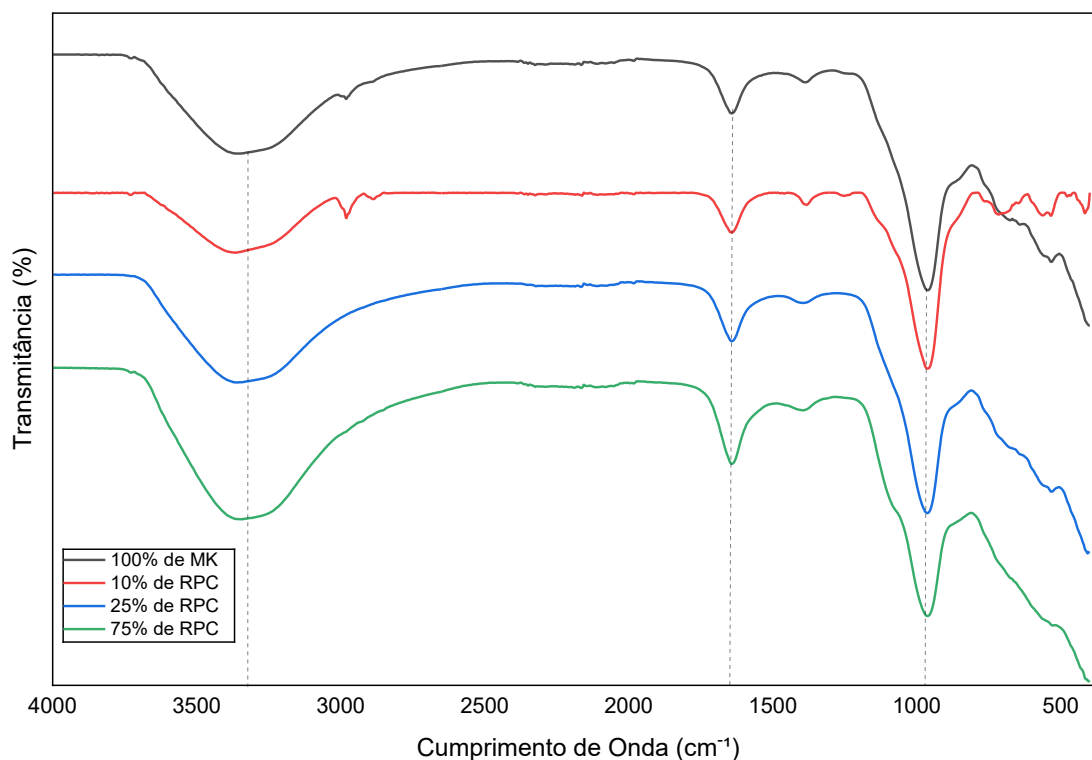
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

De acordo com os difratogramas, todas as amostras apresentam caráter predominantemente amorfo, com a presença de um halo difuso na região entre 20° e 40° (2θ), típico de materiais geopoliméricos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; DAVIDOVITS, 1991). A incorporação do RPC não eliminou essa característica, indicando a formação de gel aluminosilicato amorfo do tipo N-A-S-H, principal produto da geopolimerização (DUXSON *et al.*, 2007). No entanto, observou-se o aumento progressivo da intensidade e quantidade de picos cristalinos com o incremento do teor de RPC, especialmente na amostra com 75%, sugerindo a presença de fases minerais não reagidas, como quartzo, frequentemente identificado em sistemas contendo matérias-primas silicosas (HEAH *et al.*, 2012; YAO *et al.*, 2009). Esses resultados indicam que, embora o resíduo participe parcialmente da reação geopolimérica, também atua como fase inerte, influenciando a microestrutura final do material, conforme discutido por Provis e Bernal (2014).

5.2.1.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 23 apresenta a espectros de transmitância no infravermelho das composições geopoliméricas produzidas.

Figura 23 - FTIR das composições de geopolímeros produzidos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A análise dos espectros de FTIR (Figura 23) permitiu identificar as bandas vibracionais características e as transformações estruturais resultantes da ativação alcalina das matrizes de MK e RPC. Inicialmente, identifica-se em todas as amostras uma banda larga e intensa na região de $3440\text{--}3460\text{ cm}^{-1}$ atribuída ao estiramento das ligações O-H de moléculas de água adsorvida e grupos Si-O-Si e Al-O-Al superficiais (BARBOSA; MACKENZIE; THAUMATURGO, 2000). A presença de água na rede é corroborada pelo pico em 1650 cm^{-1} referente à deformação angular das moléculas de H_2O . A variação na intensidade dessas bandas entre as composições sugere que a incorporação do RPC altera a capacidade de retenção de água e a densidade de hidroxilas na estrutura porosa.

Adicionalmente, as bandas situadas entre 1410 e 1450 cm^{-1} indicam o estiramento assimétrico das ligações C-O, características de grupos carbonatos (CRIADO *et al.*, 2005). Esse fenômeno, inerente ao processo de carbonatação, ocorre pela reação entre o CO_2 atmosférico e o excesso de álcalis do ativador remanescentes na matriz. A persistência dessa banda em todas as amostras, incluindo o referência (100% de MK), indica que o tempo de cura e o armazenamento favoreceram a formação dessas espécies carbonatadas na superfície, independentemente do teor de RPC utilizado.

O estágio de geopolimerização é evidenciado pela banda de maior magnitude, localizada na faixa de 970 e 1010 cm^{-1} que corresponde ao estiramento assimétrico das ligações Si-O-T (T = Si ou Al) (DAVIDOVITS, 2008). Esta banda representa a unidade fundamental da rede aluminossilicata, e sua integridade em todas as composições confirma que a substituição do MK pelo RPC não comprometeu a formação do ligante geopolimérico. Mesmo na amostra com 75% de RPC, a definição deste pico sugere a viabilidade química do resíduo como precursor reativo (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005). Pequenos deslocamentos no número de onda podem ser interpretados como ajustes na razão molar entre Si/Al e na organização estrutural da matriz.

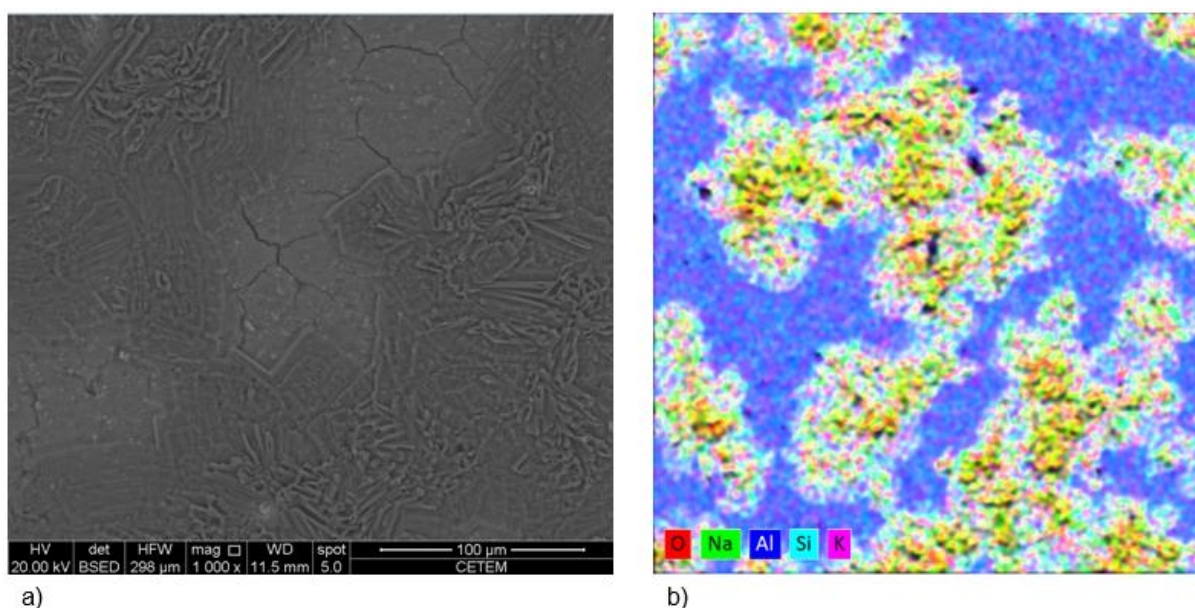
Por fim, a região de baixa frequência (abaixo de 800 cm^{-1}) apresenta vibrações associadas às unidades estruturais básicas do sistema. O pico em 800 cm^{-1} é atribuído a estiramentos Al(IV)-O ou à presença de fases residuais de sílica, enquanto as bandas entre 450 e 550 cm^{-1} referem-se à deformação das ligações Si-O-Si e Al-O-Si (REES *et al.*, 2007). A manutenção desses perfis vibracionais reforça a compatibilidade química entre o MK e o RPC, indicando que o RPC se integra à

microestrutura do geopolímero de forma análoga à matriz de referência, consolidando-se como um material promissor para a síntese de novos ligantes.

5.2.1.3 Microscopia eletrônica de varredura e EDS

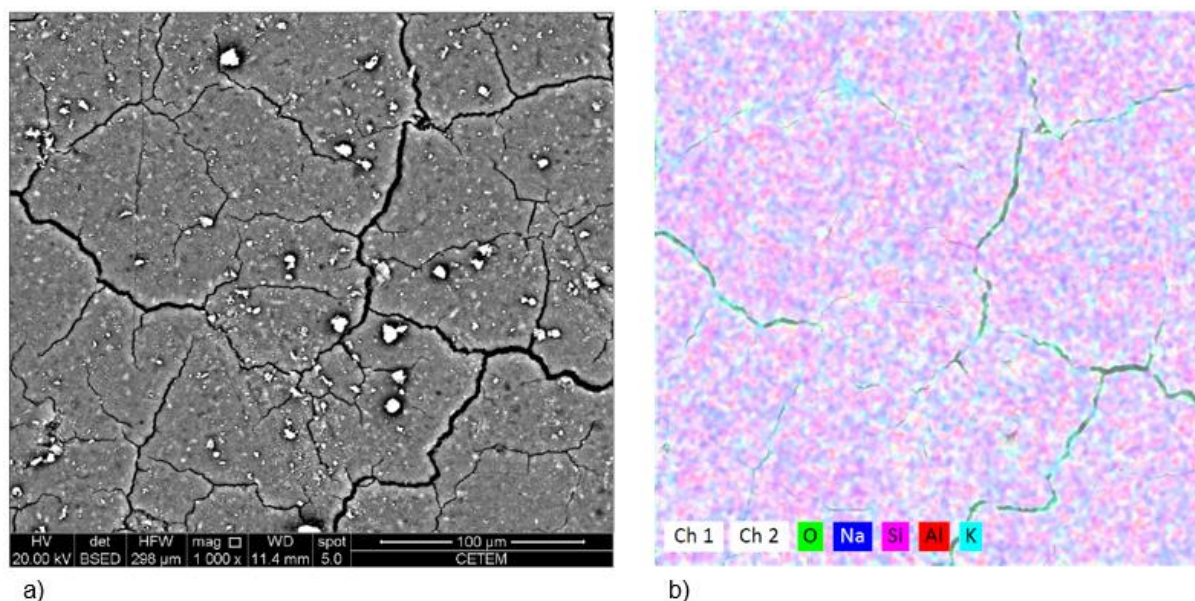
As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas por MEV e EDS dos geopolímeros produzidos.

Figura 24 - MEV da composição com 100% de MK em a) e EDS em b).



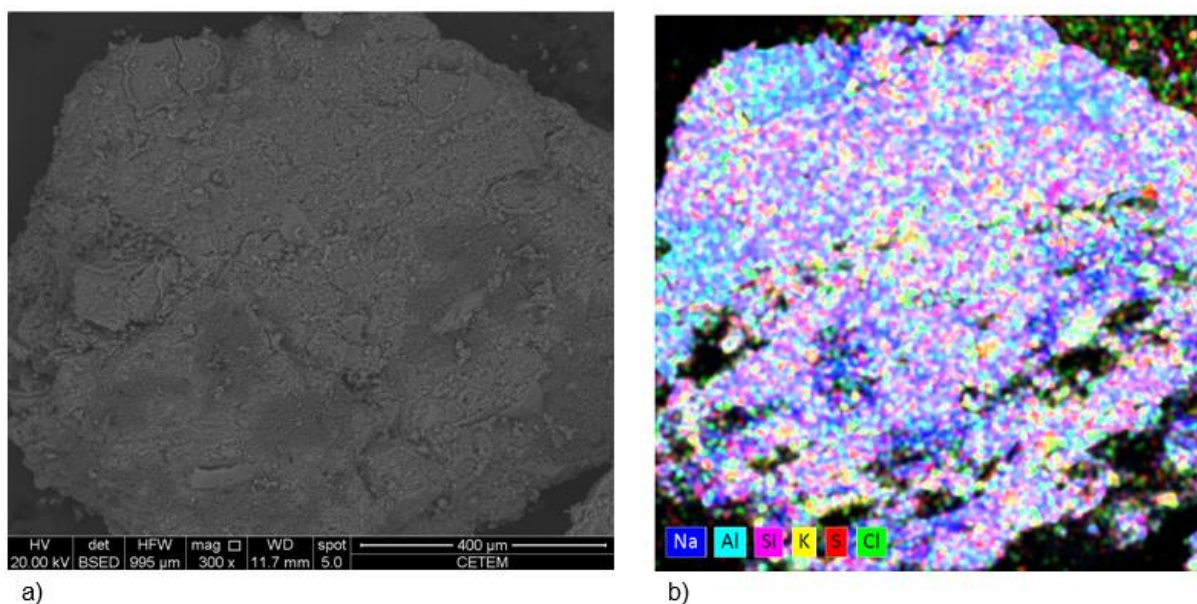
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 25 - MEV da composição com 10% de RPC e 90% de MK em a) e EDS em b).



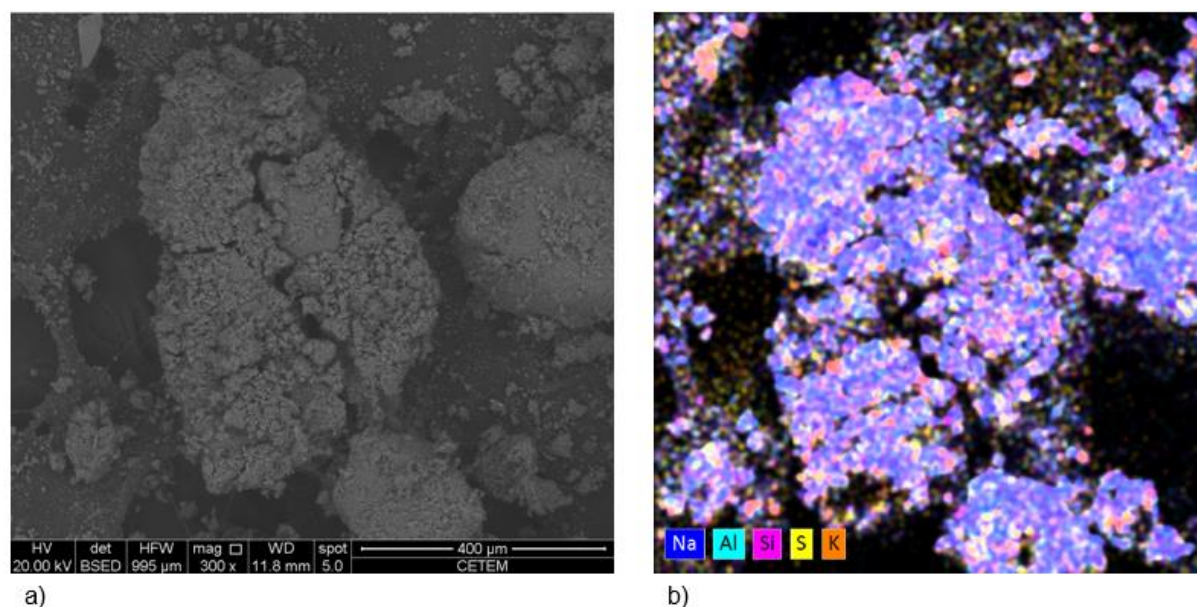
Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 26 - MEV da composição com 25% de RPC e 75% de MK em a) e EDS em b).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 27 - MEV da composição com 75% de RPC e 25% de MK em a) e EDS em b).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

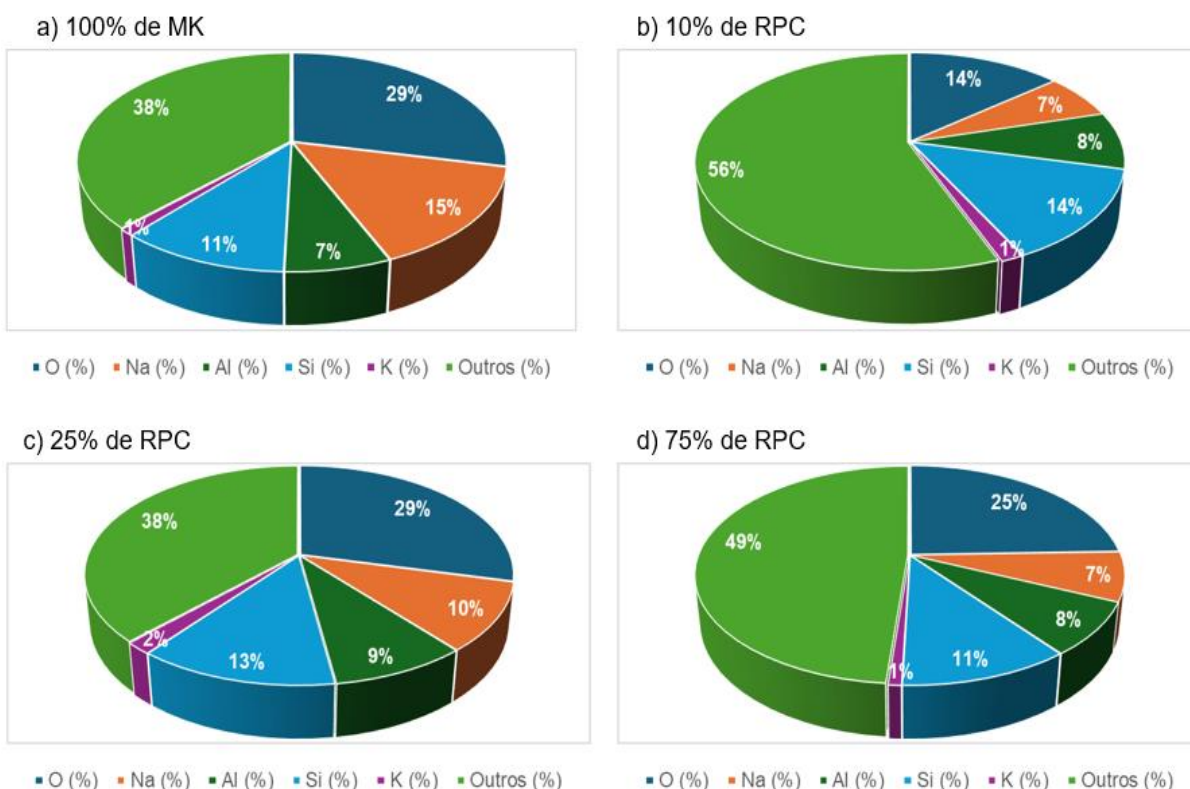
A análise de EDS foi empregada de forma complementar à MEV, com o objetivo de mapear e quantificar a distribuição elementar nas matrizes geopoliméricas produzidas. Essa microanálise química permitiu avaliar a homogeneidade da dispersão dos precursores na pasta e a eficiência das reações de síntese. A Tabela 17 e a Figura 28 apresentam os resultados quantitativos em porcentagem de massa dos principais elementos constituintes, fornecendo dados cruciais para a compreensão das relações estequiométricas do gel formado.

Tabela 17 - Resultados quantitativos de massa por EDS das formulações geopoliméricas.

Composição	O (%)	Na (%)	Al (%)	Si (%)	K (%)	Outros (%)
100% de MK	28,63	15,08	6,75	10,82	0,98	37,74
90% MK - 10% RPC	13,85	6,63	8,47	13,73	1,45	55,87
75% MK - 25% RPC	28,89	10,09	8,75	12,77	1,73	37,77
25% MK - 75% RPC	24,50	7,25	7,83	10,93	0,83	48,66

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026)

Figura 28 - Resultados quantitativos de massa por EDS em a) 100% de MK, b) 10% de RPC, c) 25% de RPC e d) 75% de RPC.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Os dados confirmam a predominância de oxigênio (O), silício (Si) e alumínio (Al), elementos fundamentais para a formação das redes de poli(sialato) e poli(sialato-siloxo) (DAVIDOVITS, 2008). Além destes, a detecção de sódio (Na) é atribuída aos íons compensadores de carga provenientes da solução ativadora (HS) e da composição do RPC, necessários para neutralizar a perda de carga gerada pela substituição isomórfica de Si^{4+} por Al^{3+} nos tetraedros da rede (SINGH *et al.*, 2015).

A razão molar Si/Al é um parâmetro crítico que governa as propriedades mecânicas e a estabilidade química dos sistemas geopoliméricos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Para a amostra com 100% de MK, a razão obtida foi de 1,60,

valor condizente com materiais de boa performance cimentícia. Com a incorporação do RPC, observou-se uma variação gradual nesta proporção: a composição com 10% de RPC manteve-se em 1,62, enquanto as misturas com 25% e 75% de RPC apresentaram reduções para 1,46 e 1,40, respectivamente. Essa tendência sugere que o aumento do teor de RPC altera a disponibilidade relativa de precursores durante a dissolução, resultando em uma matriz ligeiramente mais rica em alumínio (DUXSON *et al.*, 2007).

A concentração de sódio apresentou um decréscimo notável, partindo de 15,08% na referência para 7,25% na amostra com maior teor de resíduo (75% RPC). Tal comportamento pode indicar uma alteração na cinética de ativação ou uma menor demanda por cátions compensadores frente à nova estequiometria imposta pelo resíduo. Paralelamente, o elevado percentual de "Outros" elementos identificados (entre 37,74% e 55,87%) é uma característica de materiais heterogêneos e reflete a presença de componentes residuais inerentes ao processo de fabricação do catalisador utilizado como matéria-prima (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005).

Em síntese, a manutenção das proporções elementares essenciais de Si, Al e Na em todas as amostras, mesmo em substituições majoritárias, corrobora a natureza reativa do RPC. Os resultados indicam que o RPC não atua meramente como carga inerte, mas integra-se ativamente à rede aluminossilicata, permitindo a síntese de um ligante estável e comparável ao geopolímero de referência produzido exclusivamente com MK (REES *et al.*, 2007).

5.2.1.4 Conclusão relativa às caracterizações microestruturais

A partir das caracterizações microestruturais realizadas, observou-se um comportamento semelhante entre as composições geopoliméricas, com variações associadas ao teor de RPC incorporado. Por meio da difração de raios X, verificou-se a presença predominante de um halo amorfo na região de $2\theta \approx 20-30^\circ$, característico de materiais geopoliméricos, indicando a formação do gel aluminossilicato do tipo N-A-S-H. No entanto, com o aumento do teor de RPC, observou-se o incremento da intensidade de picos cristalinos, sugerindo a presença de fases parcialmente reativas ou inertes provenientes do RPC.

As análises por espectroscopia no infravermelho evidenciaram o deslocamento da banda principal associada às vibrações Si-O-T (T = Si ou Al) para menores números de onda, confirmando a reorganização estrutural e a formação da rede

geopolimérica. Adicionalmente, foram observadas bandas associadas à presença de água adsorvida e à formação de carbonatos, indicando processos de hidratação e possíveis reações secundárias de carbonatação.

A análise de EDS confirmou a predominância de Si, Al e Na com razão compatível ao gel N-A-S-H, ratificando a integração do RPC na estrutura. Os dados químicos comprovam que o material não atua como mero enchimento inerte, mas participa ativamente da reação.

De forma geral, os resultados microestruturais demonstram que o RPC influencia diretamente a evolução estrutural do sistema, participando da formação do gel geopolimérico e alterando a composição e organização da matriz. Esses achados estão em consonância com os resultados mecânicos, indicando que o RPC pode atuar como substituinte parcial do MK, contribuindo para a produção de materiais geopoliméricos com potencial aplicação tecnológica.

5.2.2 Propriedades mecânicas

5.2.2.1 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão das formulações geopoliméricas, avaliados aos 7, 14, 28 e 90 dias de cura, estão apresentados na Tabela 18 e na Figura 29. Observa-se que a amostra de referência, composta por 100% de MK, apresentou os maiores valores de resistência mecânica em todas as idades analisadas, alcançando 29,52 MPa aos 7 dias e evoluindo progressivamente até atingir 34,00 MPa aos 90 dias. Esse comportamento demonstra a elevada reatividade do MK e a eficiente formação da matriz geopolimérica, associada à formação e densificação do gel N-A-S-H ao longo do processo de cura (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

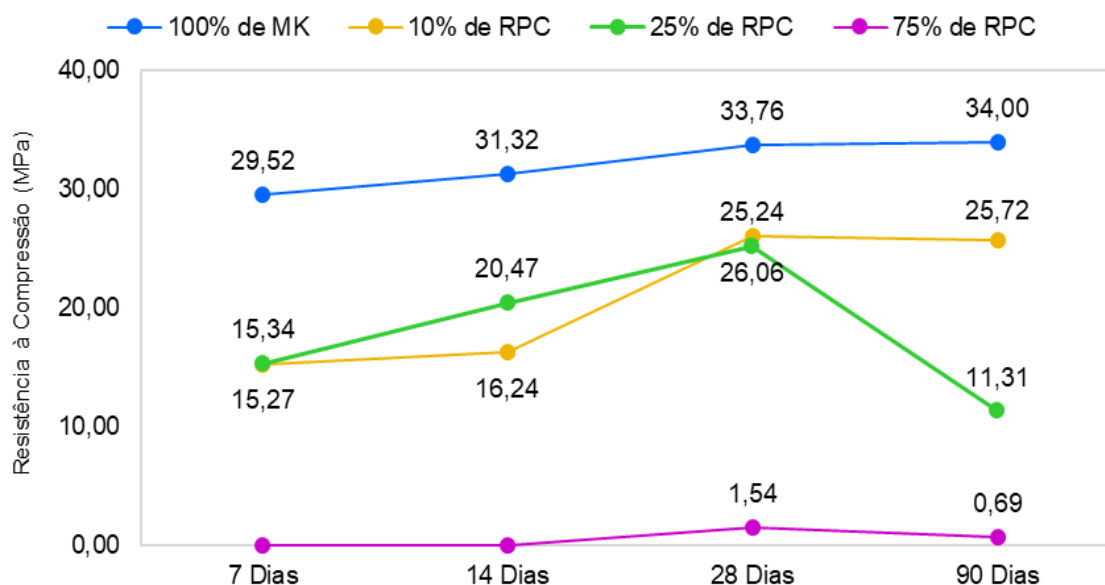
As formulações contendo substituição parcial do MK pelo RPC apresentaram redução da resistência mecânica em relação à amostra de referência, evidenciando que o aumento do teor de resíduo influencia diretamente o desempenho do material. Entretanto, as formulações com 10% e 25% de RPC apresentaram evolução significativa da resistência até os 28 dias, atingindo respectivamente 26,06 MPa e 25,24 MPa. Esses resultados indicam que, em baixos teores de substituição, o RPC ainda contribui para a formação de uma matriz geopolimérica coesa, permitindo o desenvolvimento de propriedades mecânicas satisfatórias (DUXSON *et al.*, 2007).

Tabela 18 - Resistência média à compressão (MPa), desvio padrão e coeficiente de variação para todas as formulações e idades.

Composição	Idade dos CPs			
	7 Dias	14 Dias	28 Dias	90 Dias
100% de MK	29,52 ± 5,51	31,32 ± 4,01	33,76 ± 2,19	34,00 ± 7,09
10% de RPC	15,27 ± 0,89	16,24 ± 1,46	26,06 ± 1,88	25,56 ± 1,91
25% de RPC	15,34 ± 2,50	15,13 ± 7,55	25,24 ± 1,24	11,31 ± 4,84
75% de RPC	Inconclusivo	Inconclusivo	1,54 ± 1,17	0,69 ± 0,37

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 29 - Evolução da resistência à compressão em função da idade de cura.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A composição com 10% de RPC apresentou comportamento relativamente estável após os 28 dias, mantendo resistência de 25,56 MPa aos 90 dias. Esse resultado sugere que a substituição parcial em baixos teores não compromete significativamente a continuidade da matriz ligante, mantendo um processo de geopolimerização eficiente ao longo do tempo. Além disso, os baixos desvios padrão observados nessa formulação indicam boa homogeneidade e repetibilidade experimental, características desejáveis para aplicações em materiais cimentícios avançados. (YAO *et al.*, 2009).

Por outro lado, a formulação contendo 25% de RPC apresentou comportamento distinto aos 90 dias, com queda expressiva da resistência mecânica para 11,31 MPa. Apesar do ganho inicial observado até os 28 dias, a redução posterior está associada há problemas ocorridos na prensa nesses últimos ensaios e, portanto, acabam perdendo a significância na base de dados.

A formulação com 75% de RPC apresentou desempenho mecânico extremamente reduzido, com resultados inconclusivos nas idades iniciais devido a problemas na geopolimerização (Figura 30) e resistências residuais de apenas 1,54 MPa aos 28 dias e 0,69 MPa aos 90 dias. Esse comportamento demonstra que elevados teores de substituição comprometem significativamente a geopolimerização, impossibilitando a formação de uma matriz estruturalmente estável. Esse resultado pode ser relacionado à menor fração amorfa reativa disponível no sistema, bem como ao aumento de fases cristalinas identificadas nas análises de DRX, fatores que limitam a dissolução dos aluminossilicatos e reduzem a formação do gel N-A-S-H (PROVIS; BERNAL, 2014).

Figura 30 - Formulação de 75% de RPC com geopolimerização comprometida.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

De forma geral, os resultados indicam que a incorporação do RPC é tecnicamente viável em baixos teores de substituição, especialmente até 10%, mantendo resistências mecânicas compatíveis com aplicações não estruturais. Contudo, teores elevados de substituição promovem redução significativa da resistência mecânica, evidenciando que o equilíbrio entre sustentabilidade e desempenho depende diretamente da proporção de resíduo incorporado à matriz geopolimérica. Esses resultados corroboram com estudos da literatura que apontam que resíduos industriais ricos em sílica e alumina podem atuar como precursores

suplementares, desde que utilizados em proporções adequadas para não comprometer a formação da estrutura geopolimérica (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

5.2.2.1.1 Avaliação estatística da resistência à compressão

Ao realizar a análise de variância fatorial (ANOVA) com fator duplo de repetição (idade e formulação), pode-se observar os seguintes resultados conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Análise de variância para resistência à compressão dos CPs.

Variação	SQ	gL	MQ	F	valor-P	F crítico
Formulação	4270,19	2,00	1423,40	44,65	0,00	3,01
Idades	145,00	3,00	72,50	2,27	0,12	3,40
Interações	89,30	6,00	14,88	0,47	0,83	2,51
Dentro	765,15	24,00	31,88			
Total	5269,64	35,00				

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A ANOVA bifatorial demonstrou que o fator formulação (teor de RPC) exerce influência estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão dos geopolímeros ($F = 44,65$; $p < 0,05$), evidenciando que as diferenças observadas entre as composições não são aleatórias, mas diretamente associadas à substituição do MK. Por outro lado, o fator idade de cura não apresentou efeito significativo ($p = 0,12$), indicando que, no intervalo avaliado, a evolução da resistência não é suficientemente expressiva para diferenciar estatisticamente os resultados. Adicionalmente, a ausência de interação significativa entre formulação e idade ($p = 0,83$) demonstra que o comportamento mecânico das composições é independente do tempo de cura, mantendo-se a mesma tendência ao longo das idades analisadas. Esses resultados indicam que o teor de RPC é o principal parâmetro de controle das propriedades mecânicas do sistema, em concordância com as análises microestruturais, que evidenciaram redução da fração amorfa reativa e aumento de fases cristalinas com o incremento do RPC, impactando diretamente a formação do gel N-A-S-H (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). A Tabela 20 sintetiza esses resultados, destacando a relevância de cada fator no comportamento mecânico do sistema.

Tabela 20 - Síntese da análise de variância.

Fator	Significância	Importância
Formulação	Significativo	Muito alto
Idade	Não significativo	Baixo
Interação	Não significativo	Irrelevante

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

5.2.2.2 Dureza Shore

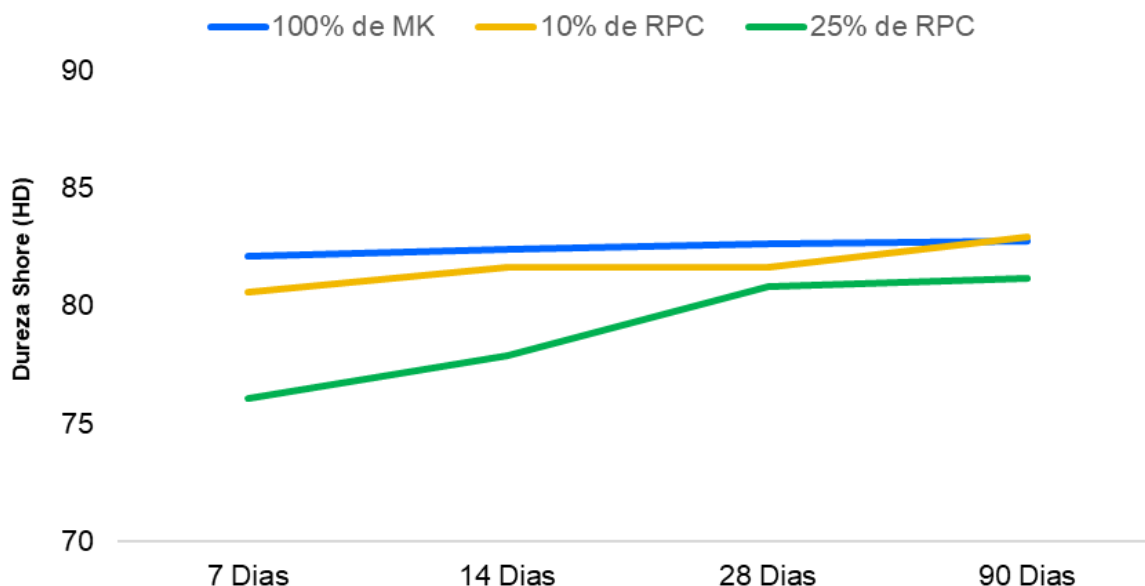
A Tabela 21 e a Figura 31 apresentam, respectivamente, os valores médios de dureza Shore (HD) e seus respectivos desvios padrões para as diferentes proporções de RPC em substituição ao MK, avaliadas nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.

Tabela 21 - Média de dureza das composições nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.

Composição	Idade dos CPs			
	7 Dias	14 Dias	28 Dias	90 Dias
100% de MK	82,10 ± 1,28	82,40 ± 1,84	82,6 ± 1,22	82,7 ± 2,15
10% de RPC	80,60 ± 1,32	81,60 ± 1,23	81,70 ± 1,47	82,9 ± 1,87
25% de RPC	76,10 ± 2,45	77,90 ± 3,09	80,80 ± 3,06	81,20 ± 2,31
75% de RPC	Não mensurável	Não mensurável	29,60 ± 9,33	18,90 ± 10,61

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 31 - Evolução da dureza Shore D ao longo do período de cura.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A amostra de referência exibiu valores de dureza acima de 80 HD, mantendo estabilidade mecânica ao longo de todo o período de cura. Esse comportamento

ratifica a eficiência da matriz de MK pura na formação rápida de redes de aluminossilicatos.

Em contrapartida, as amostras contendo 10% e 25% de RPC demonstraram uma cinética de endurecimento distinta. A amostra com 10% de RPC, embora tenha iniciado com valores ligeiramente inferiores ao controle, superou a dureza da referência aos 90 dias, atingindo 82,9 HD. Já a mistura com 25% de RPC apresentou o maior ganho de dureza relativo ao longo do tempo (+6,7%), indicando um efeito de consolidação tardia da matriz.

5.2.2.2.1 Avaliação estatística da dureza Shore

Para determinar se as variações de dureza observadas entre o material de referência e as misturas com RPC são estatisticamente relevantes, os dados foram submetidos à ANOVA conforme Tabela 22.

Tabela 22 - Análise de variância para dureza shore das formulações com exceção de 75% de RPC nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.

Variação	SQ	gL	MQ	F	valor-P	F crítico
Formulação	132,56	2,00	66,28	56,23	0,00	3,19
Idades	64,03	3,00	21,34	18,11	0,00	2,80
Interações	40,50	6,00	6,75	5,73	0,00	2,29
Dentro	56,57	48,00	1,18			
Total	293,66	59,00				

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

A ANOVA aplicada aos resultados de dureza Shore indicou que todos os fatores avaliados — formulação, idade de cura e a interação entre esses fatores — exercem influência estatisticamente significativa sobre o comportamento do material ($p < 0,05$) (Tabela 23). O fator formulação apresentou o maior valor de F (56,23), evidenciando ser o principal responsável pelas variações observadas na dureza. O fator idade também se mostrou significativo ($F = 18,11$), indicando que o desenvolvimento da dureza ocorre de forma progressiva ao longo do tempo. Além disso, a interação entre formulação e idade ($F = 5,73$) foi significativa, demonstrando que o efeito do teor de RPC depende da idade de cura, ou seja, o comportamento das composições varia ao longo do tempo.

Tabela 23 - Síntese da significância dos fatores avaliados.

Fator	Significância	Importância
Formulação	Significativo	Muito alto
Idade	Significativo	Alto
Interação	Significativo	Moderado

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Os resultados indicam que, diferentemente da resistência à compressão, a dureza Shore é influenciada não apenas pela composição do material, mas também pela evolução temporal e pela interação entre esses fatores. A forte influência da formulação está associada às mudanças microestruturais promovidas pela incorporação do RPC, como a possibilidade de variação na densidade da matriz e na quantidade de gel formado. Já a significância do fator idade sugere que a dureza é sensível ao processo de cura, refletindo a progressiva reorganização estrutural e densificação da matriz geopolimérica ao longo do tempo.

A presença de interação significativa indica que o efeito do teor de RPC não é constante ao longo das idades, ou seja, determinadas composições podem apresentar ganhos ou perdas de dureza mais pronunciados em idades específicas. Esse comportamento é compatível com a cinética de geopolimerização, na qual diferentes fases podem reagir em velocidades distintas, especialmente em sistemas contendo materiais com reatividade heterogênea (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; BERNAL, 2014).

Dessa forma, os resultados evidenciam que a dureza Shore D é uma propriedade mais sensível às transformações microestruturais ao longo do tempo do que a resistência à compressão, sendo influenciada tanto pela composição quanto pela evolução do sistema geopolimérico.

5.2.2.3 Conclusões relativas às propriedades mecânicas

A análise das propriedades mecânicas demonstra que a incorporação do RPC como substituto parcial do MK produz materiais com características distintas, governadas principalmente pelo teor de substituição e, de forma secundária, pela cinética de cura.

Em primeiro lugar, os resultados de resistência à compressão revelam que substituições de até 25% de RPC permitem a obtenção de ligantes com desempenho mecânico satisfatório (na ordem de 25 MPa aos 28 dias), embora inferiores à matriz

de referência. O comportamento estatístico confirmou que a formulação é o fator determinante para a resistência, indicando que a menor reatividade intrínseca do RPC em relação ao MK limita a densificação estrutural do gel sódio aluminossilicato (N-A-S-H) (DUXSON *et al.*, 2007). Entretanto, o melhor desempenho da amostra com 10% de RPC aos 90 (25,72 MPa) dias sugere uma contribuição reativa tardia do RPC, promovendo o ganho de resistência em idades mais avançadas, fenômeno característico de sistemas com materiais de cinética de dissolução mais lenta (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005). Segundo Reddy *et al.* (2016), a proporção de óxidos precursores exerce influência determinante na resistência de sistemas geopoliméricos; para resultados otimizados, os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ devem situar-se, idealmente, nas faixas de 45-55%, 22-28% e 15-20%, respectivamente. Contudo, ressalta-se que variações sutis nessas concentrações podem acarretar alterações substanciais no comportamento mecânico final do ligante.

Em segundo lugar, a dureza Shore mostrou-se uma propriedade mais sensível às transformações temporais da matriz. Ao contrário da resistência, a dureza foi influenciada significativamente pela interação entre idade e formulação, evidenciando um processo de consolidação contínua. O fato de a amostra com 10% de RPC atingir valores de dureza similares ou superiores à referência aos 90 dias corrobora a hipótese de que o RPC promove uma densificação progressiva da superfície, possivelmente associada ao preenchimento de poros por reações secundárias de geopolimerização (PROVIS; BERNAL, 2014).

Por fim, a inviabilidade mecânica da formulação com 75% de RPC estabelece um limite técnico para a substituição, associado à carência de fase amorfa reativa necessária para a coesão do material. Em síntese, os resultados validam a utilização do RPC em teores de até 25% como uma alternativa técnica e sustentável, mantendo propriedades mecânicas compatíveis com diversas aplicações na construção civil (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

5.2.3 Outras análises complementares

5.2.3.1 Massa específica

Os valores de densidade aparente e massa específica das amostras geopoliméricas são apresentados na Tabela 24 e Figura 32 observa-se que a formulação de referência apresentou os maiores valores de densidade (entre 1,66 e 1,68 g/cm^3 *) e massa seca (entre 17,03 e 17,48 g). Com a incorporação do RPC,

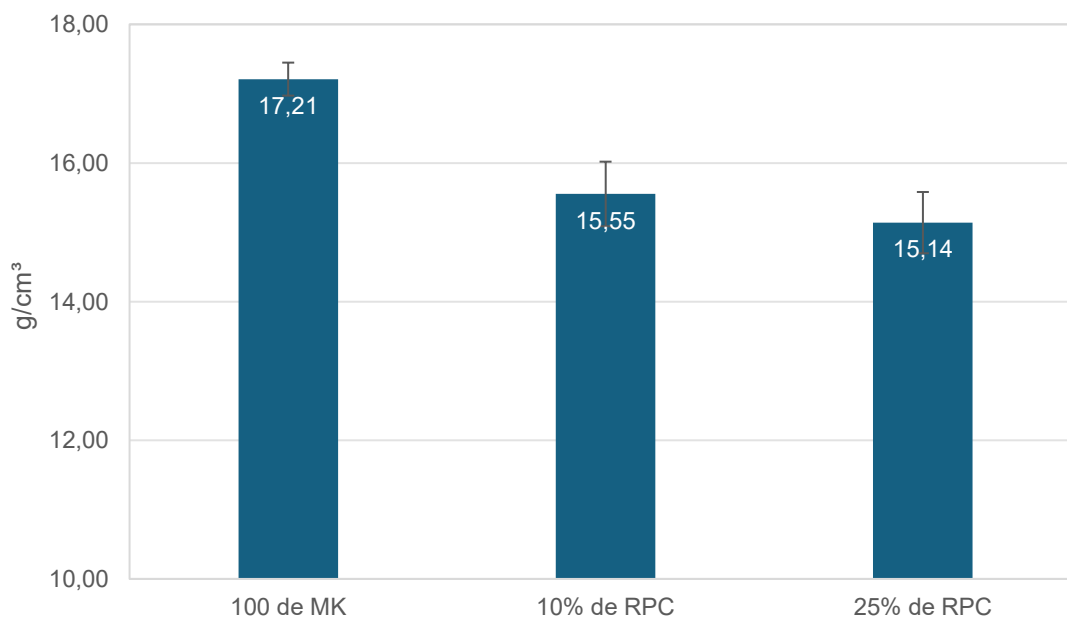
verificou-se uma redução desses parâmetros, sendo mais evidente na formulação com 10% de RPC (densidade entre 1,64 e 1,66 g/cm³; massa entre 15,04 e 15,95 g) e na formulação com 25% de RPC (densidade entre 1,61 e 1,64 g/cm³; massa entre 14,66 e 15,53 g).

Tabela 24 - Resultados de massa específica e densidade das formulações com idade de 7 dias.

A	Formulação	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Seca (g/cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Desvio Padrão
1	100% de MK	2,85	1,6	10,21	17,03	1,67	
2	100% de MK	2,85	1,62	10,33	17,12	1,66	0,24
3	100% de MK	2,84	1,64	10,39	17,48	1,68	
1	10% de RPC	2,84	1,51	9,57	15,67	1,64	
2	10% de RPC	2,84	1,45	9,19	15,04	1,64	0,47
3	10% de RPC	2,85	1,51	9,63	15,95	1,66	
1	25% de RPC	2,85	1,51	9,63	15,53	1,61	
2	25% de RPC	2,85	1,38	8,80	14,66	1,67	0,44
3	25% de RPC	2,84	1,47	9,31	15,23	1,64	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 32 - Média dos resultados de massa aparente das amostras com idades de 7 dias.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Os resultados indicam que a incorporação do RPC promove uma redução sistemática da densidade aparente e da massa seca, o que está diretamente associado a alterações na microestrutura do material. A amostra com 100% de MK apresentou maior densidade, indicando uma matriz mais compacta e com menor volume de vazios, o que é coerente com sua maior resistência à compressão.

A redução observada nas formulações com 10% e 25% de RPC pode ser atribuída a diferentes fatores. Primeiramente, a substituição parcial do MK por um material possivelmente menos reativo leva à formação de uma matriz menos densa, com menor quantidade de gel N-A-S-H, conforme já indicado pelas análises de DRX e FTIR. Além disso, a presença de partículas não reagidas do resíduo pode contribuir para a formação de uma estrutura mais heterogênea e com maior porosidade (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; DUXSON *et al.*, 2007).

Outro aspecto relevante é a variação na altura (H) dos corpos de prova, que influencia diretamente o volume e, consequentemente, a densidade calculada. Observa-se que as amostras com RPC apresentam valores de altura ligeiramente menores, o que pode estar relacionado a retração ou diferenças no processo de moldagem e cura.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa, empregou-se o resíduo proveniente da produção de catalisadores de craqueamento catalítico em leito fluído (RPC) em substituição ao metacaulim (MK) para estudo sobre a produção de cimento geopolimérico.

O trabalho pode demonstrar que a incorporação RPC como precursor suplementar em matrizes de MK é tecnicamente viável para teores de substituição de até 25%. Os resultados de resistência à compressão revelaram que, embora a amostra de referência tenha apresentado o melhor desempenho mecânico absoluto, as formulações com 10% e 25% de RPC alcançaram patamares superiores a 25 MPa aos 28 dias, valor este compatível com diversas aplicações na construção civil. A análise estatística (ANOVA) confirmou que a dosagem do RPC é o parâmetro de maior influência no sistema, enquanto o ganho de dureza Shore observado em idades avançadas (90 dias) para a mistura com 25% de RPC evidenciou uma cinética de reação tardia benéfica, sugerindo que o resíduo não atua apenas como carga inerte, mas contribui ativamente para a consolidação da matriz.

Do ponto de vista microestrutural e físico, as análises de DRX e FTIR corroboraram a formação do gel aluminossilicato (N-A-S-H), embora com menor intensidade nas amostras contendo maiores teores de RPC. A redução sistemática da massa específica aparente e da densidade com o incremento do resíduo indicou uma alteração na compacidade do material, resultante da granulometria mais grosseira do RPC (D90 de 192,8 μm) em comparação ao MK. Essa característica física justifica a maior porosidade observada nas misturas com 75% de RPC, as quais apresentaram colapso das propriedades mecânicas, delimitando assim o limite de saturação para a substituição efetiva do precursor de alta reatividade pelo RPC.

Em síntese, com este trabalho, pode-se verificar o potencial de valorização deste material que hoje é encaminhado para aterros sanitários licenciados no campo dos materiais de construção sustentáveis. A substituição parcial de um insumo de alto valor agregado, como o MK, por um RPC da cadeia de indústrias químicas, permite a produção de um cimento geopolimérico apresentando como principais vantagens:

- a) a destinação do RPC de uma forma sustentável com base na economia circular;
- b) a utilização de uma matéria prima de baixo valor agregado, principalmente em relação ao MK;

- c) desempenho mecânico satisfatório e propriedades físicas controladas;
- d) menores impactos ambientais pelo descarte de materiais no meio ambiente.

Tais achados contribuem para o avanço da economia circular na indústria química, oferecendo uma rota de destinação nobre para resíduos industriais e reduzindo o consumo de matérias-primas virgens e de emissão de CO₂ na cadeia de produtos cimentícios, sem comprometer a integridade estrutural dos materiais desenvolvidos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa e nas lacunas científicas identificadas durante o desenvolvimento experimental, sugerem-se as seguintes frentes de investigação para o aprofundamento do estudo de matrizes geopoliméricas contendo resíduo de catalisador de FCC (RPC):

- a) Otimização das condições de cura e estabilidade térmica;
- b) Alteração na razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$;
- c) Caracterização estrutural e de durabilidade avançada;
- d) Manufatura aditiva (Impressão 3D).

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653. Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2020. Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:2004. Resíduos sólidos – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:2004. Resíduos sólidos – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:2004. Resíduos sólidos – Amostragem**. Rio de Janeiro, 2004.
- AGENDA 21. Capítulo 21 – **Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos**. Disponível em: <http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/Agenda-21-ECO-92-ou-RIO-92/caitulo-21-manejo-ambientalmente-saudavel-dos-residuos-solidos-e-questoes-relacionadas-com-os-esgotos.html>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- ANDREW, R. M. **Global CO₂ emissions from cement production**. Earth System Science Data, [s. l.], v. 10, p. 195-217, 2018.
- AUROS QUÍMICA. **Ficha técnica do silicato de sódio**. Disponível em: <https://www.lojaquimica.com.br/materia-prima/silicatos/silicato-de-sodio-alcalino-liquido-5-litros>. Acesso em 27 nov. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos — Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 71 p. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 07 out. 2025.
- AHMAD, S. et al. **Potenciais aplicações de geopolímeros na construção: uma revisão**. *Jornal de Pesquisa e Tecnologia de Materiais*, v. 1234-1248, 2021.
- AUGUSTO E SILVA, V. L. **Craqueamento catalítico em leito fluidizado: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.
- AZEVEDO, A. R. G. **Desenvolvimento de geopolímeros à base de metacaulim e resíduos industriais**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.
- AZEVEDO, A. R. G. et al. **Influence of particle size and curing conditions on the properties of geopolymers**. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 209, p. 652–660, 2019.

BAO, Y. et al. **Environmental performance of alkali-activated materials: a review.** Journal of Cleaner Production, v. 250, p. 119–130, 2020.

BARATA, M. S. **Produção e caracterização de metacaulim obtido a partir de rejeitos de caulim.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. **Synthesis and characterisation of aluminosilicate inorganic polymers.** International Journal of Inorganic Materials, 1999.

BARBOSA, VFF; MACKENZIE, KJ; THAUMATURGO, C. **Síntese e caracterização de materiais à base de polímeros inorgânicos de alumina e sílica.** International Journal of Inorganic Materials , v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.

BAKHAREV, T. **Resistência de materiais geopoliméricos ao ataque ácido.** Cement and Concrete Research, v. 35, p. 657–670, 2005.

BORÇATO, AG et al. **Microestrutura e propriedades mecânicas de geopolímeros produzidos com cal dolomítica.** Revista Matéria, v. 1, 2024.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 1344: **Especificação para uso estrutural de concreto de cimento Portland.** Nova Delhi, 1981.

CARDOSO, D. **Refino de petróleo: processos de conversão.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ČEJKA, J.; CORMA, A.; ZONES, S. I. **Zeolites and Catalysis: Synthesis, Reactions and Applications.** Weinheim: Wiley-VCH, 2010.

CERQUEIRA, H. S. et al. **Deactivation of FCC catalysts.** Catalysis Today, v. 130, n. 2-4, p. 524-537, 2008.

CHATHAM HOUSE. **Making Concrete Change: innovation in low-carbon cement and concrete.** Londres: The Royal Institute of International Affairs, 2018.

CHEN W. et al., **Geopolymers prepared from industrial solid waste: Comprehensive properties and application prospects.** Environmental Research, 2025.

CHINDAPRASIRT, P. et al. **Efeitos dos métodos de cura no concreto geopolimérico à base de cinzas volantes.** Construction and Building Materials, v. 37, p. 150-157, 2013.

CORMÁ, A. **Hydrogen transfer in zeolites: a review.** Applied Catalysis, v. 21, n. 2, p. 289-311, 1986.

CRIADO, M. et al. **Carbonation of an alkali-activated slag paste.** Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 145-151, 2005.

CUNDY, C. S.; COX, P. A. **The hydrothermal synthesis of zeolites: history and development from the earliest days to the present time**. Chemical Reviews, v. 103, n. 3, p. 663-702, 2003.

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymer and methods of making them**. Patente US 4.349.386, 1982.

DAVIDOVITS, J. **Composto polimérico mineral sintético da família dos silicoaluminatos e processo de preparação**. Patente US n. 4.472.199, 1984.

DAVIDOVITS, J. **Química e aplicações de geopolímeros**. 1.ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 1988.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials**. Journal of Thermal Analysis, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. Geopolymer Institute, 2008.

DAVIDOVITS, J. **Química de geopolímeros e desenvolvimento sustentável**. Journal of Materials Science, v. 42, p. 1833-1853, 2008.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. 3. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2011.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 5. ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2020.

DEDAVID, B. A.; GIPIELA, G.; MACHADO, M. A. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Caulim - balanço mineral brasileiro**. Brasília, 2001. 13 p. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnmp/paginas/balancomineral/>. Acesso em: 03 set. 2025.

DINAMICA QUÍMICA. **Reagentes**: página 90. Indaiatuba, [2025]. Disponível em: <https://dinamicaquimica.com.br/produtos/reagentes?page=90>. Acesso em: 25 nov. 2025.

DUXSON, P. et al. **Propriedades de sistemas geopoliméricos: Compreendendo o papel da água, da relação Si/Al e do cátion metálico**. Journal of Material Chemistry, v. 15, p. 2708-2715, 2005.

DUXSON, S. et al. **Understanding the relationship between microstructure and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers**. Holistic Approach to Environment, v. 42, n. 9, p. 3081-3089, 2005.

DUXSON, P. et al. **O papel da tecnologia de polímeros inorgânicos no desenvolvimento do "concreto verde"**. Pesquisa em Cimento e Concreto, v. 37, n. 12, pág. 1590-1597, 2006.

DUXSON, S. et al. **The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'**. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 12, p. 1590-1597, 2007.

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

EL-ESWED, B. I.; YOUSEF, R. I.; AL-GHARABLI, S. I.; KHALILI, F. **Adsorption of Cu(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) onto kaolin/zeolite based-geopolymers**. Journal of Environmental Management, [S. l.], v. 166, p. 379–387, 2015.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. **Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1204-1209, 2005.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A. **Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1984-1992, 2005.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. **Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure**. Microporous and Mesoporous Materials, [s. l.], v. 86, n. 1-3, p. 207-214, 2005.

FILHO, CR de. **Memorial descritivo da unidade de tratamento de efluentes (U-180)**. Documento técnico interno da Fábrica Carioca de Catalisadores S.A.. v. 19, p. 10–19, 2025.

GARCÍA-LODEIRO, I. et al. **Comparative study of the structure of synthetic aluminosilicate gels (N-A-S-H) and reduced-calcium substituted gels (C-A-S-H)**. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 1, p. 27-38, 2010.

GARCÍA-LODEIRO, I. et al. **Physico-chemical characterization of models of gels (N-A-S-H and C-A-S-H) formed in alkali-activated slag systems**. Palaestra, v. 43, n. 3, p. 1014-1022, 2008.

GARCIA-LODEIRO, I.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, A.; MACPHEE, D. **Effect on fresh C-S-H gels of the simultaneous addition of alkali and aluminium**. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 1, p. 27–32, jan. 2010.

GIANNETTO, G. et al. **Zeolitas: Características, propiedades y aplicaciones industriales**. Caracas: Ediciones Innovación Tecnológica, 2000.

GLUKHOVSKY, V. D. **New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 1, p. 63-75, 2011.

GRIM, Ralph E. **Applied clay mineralogy**. New York: McGraw-Hill, 1962.

HARDJITO, D. et al. **On the development of fly ash-based geopolymer concrete**. ACI Materials Journal, v. 101, n. 6, p. 467–472, 2004.

HARDJITO, D.; RANGAN, BV. **Desenvolvimento e propriedades do concreto geopolimérico à base de cinzas volantes com baixo teor de cálcio**. Relatório de Pesquisa GC1, Faculdade de Engenharia, Universidade de Tecnologia de Curtin, 2005.

HEAH, C. Y. et al. **Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers**. Construction and Building Materials, v. 35, p. 912–922, 2012.

HEATH, A. et al. **Life cycle assessment of geopolymer concrete: a review**. Construction and Building Materials, v. 36, p. 380–390, 2014.

HE, C.; OSBAECK, B.; MAKOVICKY, E. **Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin**. Applied Clay Science, v. 9, p. 165–187, 1994.

HERMANN, E.; KUNZE, C.; GATZWEILER, R.; KIEBIG, G.; DAVIDOVITS, J. **Solidification of various radioactive residues by geopolymers with special emphasis on long term stability**. Proceedings International Conference Geopolymer, p.211-228, 1999.

HERMANN, E.; MÜLLER, M.; BÜCHLER, P. **Geopolymerisation of aluminosilicate materials**. Journal of Materials Science, v. 34, p. 4245–4251, 1999.

ISAIA, GC **Estudo da resistência ao fogo de materiais geopoliméricos**. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JARDIM, A. et al. **Política nacional, gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. Coleção Ambiental, pág. 57–74, 2012.

JI, Z.; PEI, Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: a review. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 231, p. 256-267, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.041>. Acesso em: 10 dez. 2025.

KATZ, A. **Properties of geopolymer mortar produced by extrusion**. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 3, p. 443–452, 1998.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. **Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review**. Journal of Materials Science, v. 42, n. 3, p. 729-746, 2007.

KIRSCHNER, A. V.; HARMUTH, H. **Investigations on geopolymer binders with respect to their application for building materials**. Ceramics-Silikáty, v. 48, n. 3, p. 117–120, 2004.

KIRSCHNER, P.; HARMUTH, H. **Desenvolvimento da resistência de geopolímeros à base de metacaulim ativados com NaOH e silicato de sódio**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 7, p. 1059-1066, 2004.

KOMLJENOVIC, M.; BAŠČAREVIC, Z.; BRADIC, V. **Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers**. Journal of Hazardous Materials, v. 181, p. 35-42, 2010.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. **Geopolimerização: uma revisão e perspectivas para a indústria mineral**. Minerals Engineering, v. 20, n. 14, p. 1261–1277, 2007.

KUENZEL, C. et al. **Influence of the Meakaolin Out-of-Plane Bending Mode on the Geopolymer Formation**. Applied Spectroscopy, v. 66, n. 1, p. 89-94, 2012.

KURI, B.; KHAN, M.; SARKER, PK **Propriedades e aplicações de geopolímeros: uma revisão**. Construção e Materiais de Construção, v. 288, p. 123052, 2021.

LONGHI, M. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinza pesada e metacaulim: influência da solução ativadora e da temperatura de cura**. 2015. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LERMEN, RT. et al. **Influência do teor de água na microestrutura e propriedades físicas de geopolímero à base de cinzas vulcânicas**. Materials Science Forum. v. 1064, p. 58-65, 2022.

LATTANZI, L.; CONTE, A.; SIN, A.; GARCIA, J. M.; RANDALL, C. A.; COLOMBO, P. **Cold sintering of geopolymer powders**. Journal of the American Ceramic Society, [S. l.], v. 108, n. 4, e20331, 2025.

LONGHI, M. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinza pesada e metacaulim: influência da solução ativadora e da temperatura de cura**. 2015. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MACON, A. L. **Catalisadores de FCC: composição, propriedades e desempenho industrial**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MCLLELAN, B. et al. **Reduções de emissões de gases de efeito estufa no concreto geopolimérico**. Construction and Building Materials, 370, 2025.

MEIER, W. M.; Olson, D. H. **Atlas of Zeolite Structure Types**. 3. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1992.

MESHARAM, S.; KUMAR, S. **Redução de 70% do GWP no concreto geopolimérico em comparação com o concreto tradicional**. Journal of Cleaner Production, 366, 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

METACAULIM DO BRASIL. **Ficha técnica do metacaulim HP Ultra**. Disponível em: <https://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>. Acesso em: 10 mai. 2026.

MITCHELL, JK **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley & Sons, 1976.

MONTE, M. B. M. et al. **Caulim: propriedades, processamento e aplicações industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003.

MONTGOMERY, D. C. MYERS, R. H.; **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 2nd ed. New York: John Wiley Professional, 1995.

OCCELLI, M. L. **Hydrothermal stability of deactivation of fluid cracking catalysts**. Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development, v. 22, n. 4, p. 553-559, 1983.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York, 2015.

PACEWSKA, B. et al. **Utilization of spent FCC catalyst in liquid glass based geopolymers**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, [s. l.], v. 105, p. 121–127, 2011.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. **Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture**. Construction and Building Materials, v. 22, n. 7, p. 1315–1322, 2008.

PACHECO-TORGAL, F. et al. **Propriedades e durabilidade do concreto contendo cinzas de carvão e cinzas volantes: uma revisão**. Construction and Building Materials, v. 30, p. 400–415, 2012.

PALOMO, A. et al. **Alkali-Activated Fly Ashes a Cement for the Future**. Cement and Concrete, Elsevier A ciencia Ltda, p. 1323-1329, 1999.

PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; LOPEZ-HOMBRADOS, C. **Alkali-activated fly ashes: past, present and future**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 3, p. 447–452, 2004.

PALOMO, A.; KHALIL, R. **Avanços na pesquisa e padronização de geopolímeros**. Cement and Concrete Research, v. 119, p. 175–183, 2019.

PANCHAREE, S. et al. **Study on the synthesis of metakaolin-based geopolymer**. Case Studies in Construction Materials, v. 15, 2021.

PANIAS, P. et al. **Microestrutura e propriedades de transporte de geopolímero à base de cinzas volantes após exposição a diferentes condições de durabilidade**. *Materiais e Estruturas*, v. 40, n. 9, p. 1743-1757, 2007.

PANIAS, et al. **Effect of synthesis parameteres on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, v. 301, p. 246-254, 2007.

PELISSER, F. et al. **Síntese e propriedades mecânicas de geopolímeros à base de metacaulim**. *Materials Research*, v. 16, n. 6, p. 1342-1348, 2013.

PINTO, A. T. **Geopolímeros: estudo de parâmetros de ativação alcalina**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PROVIS, et al. **Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results**. *Chemistry of Materials*, v. 17, p. 3075-3085, 2005.

PROVIS, J. L. et al. **Statistical thermodynamic model for Si/Al ordering in amorphous aluminosilicates**. *The Journal of Physical Chemistry B*, v. 109, n. 23, p. 11564-11571, 2005.

PROVIS, JL; LUKEY, GC; VAN DEVENTER, JSJ **Os geopolímeros realmente contêm zeólitas nanocristalinas?** *Langmuir*, v. 21, n. 11, p. 5314-5320, 2005.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolímeros: estruturas, processamento, propriedades e aplicações industriais**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Geopolymers and related alkali-activated materials**. *Annual Review of Materials Research*, v. 35, p. 297–327, 2005.

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

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

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

RAMOS, T. M. **Produção e caracterização de geopolímeros à base de metacaulim ativados alcalinamente**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2017.

RAMOS, L. C. **Estudo da síntese e caracterização de geopolímeros à base de metacaulim**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal ____, 2022.

RATTANASAK U., CHINDAPRASIR P.T. **Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer**. Minerals Engineering, v. 22, n. 12, 2009.

REDDY, BV; et al. **Influência da composição do material de origem na resistência à compressão do concreto geopolimérico: uma revisão**. Construction and Building Materials, v. 120, p. 21-33, 2016.

REES, C. A. et al. **The role of alkali silicate in the activation of fly ash**. International Journal of Mineral Processing, [s. l.], v. 82, n. 4, p. 175-185, 2007.

REN, et al. **Valorização de resíduos como matéria-prima em geopolímeros, composição química e sustentabilidade ambiental**. 2021.

RIBEIRO, D. V. **Effect of particle size on the reactivity of aluminosilicate precursors in geopolymeric systems**. Ceramics International, Oxford, v. 43, n. 1, p. 250–257, 2017.

SADEGHBEIGI, R. **Fluid Catalytic Cracking Handbook: An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.

SANTOS, FA **Estudo da variação da relação SiO₂/Al₂O₃ na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, p. 18-21, 2017.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SCHERZER, J. **Octane-enhancing zeolitic FCC catalysts: Scientific and technical aspects**. Catalysis Reviews Science and Engineering, v. 31, n. 3, p. 215-309, 1989.

SCIENCE DIRECT. **journals and books**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/browse/journals-and-books/> . Acesso em: 27 out. 2025.

SEVERO, CGS et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos geopolímeros**. Revista Matéria, v. 2, pág. 415-425, 2013.

SHI, Caijun; KRIVENKO, Pavel; ROY, Della M. **Alkali-activated cements and concretes**. London: Taylor & Francis, 2006.

SHI, C.; FERNANDEZ JIMENEZ, A.; PALOMO, A. **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement**, Cement and Concrete Research, v. 41, p. 750–763, 2011.

SHI, Caijun; KRIVENKO, Pavel; ROY, Della M. **Classification and characteristics of alkali-activated materials**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SINGH, B. et al. **A review of some recent developments. Construction and Building Materials**. Geopolymer concrete, [s. l.], v. 85, p. 78-90, 2015.

SOCIEDADE AMERICANA PARA TESTES E MATERIAIS. ASTM C618-12a: **Especificação padrão para cinzas volantes de carvão e pozolana natural bruta ou calcinada para uso em concreto**. West Conshohocken, 2012.

STEVESON, M.; SAGOE-CRENTSIL, K. **Relationships between composition, structure and strength of silicate-activated aluminosilicate geopolymers**. Journal of Materials Science, v. 40, n. 8, p. 2023-2036, 2005.

SUKMAK, et al., 2013 apud RAMOS, 2017 (**composição mineral em cimentos geopoliméricos e importância da sílica e alumina**).

TASHIMA, M. M. et al. **New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC)**. Fuel, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 106-111, 2012.

TEIXEIRA, EC. **Estudo da zona de transição de concretos preparados com metacaulim através de análise nanométrica**. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

THAKUR, P. et al. **Efeito da temperatura de cura no concreto geopolimérico à base de cinzas volantes**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 7, p. 2618-2624, 2009.

THAKUR, R. N. et al. **Influence of curing regime on strength of geopolymer concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 21, n. 12, p. 759–765, 2009.

TORGAL, FP; SILVA, AF; ANDRADE, P. **Ligantes ativados por álcalis: uma revisão**. Construction and Building Materials, v. 22, n. 7, p. 1305-1315, 2008a.

VALLE, CE **Qualidade ambiental: como ser competitivo protegendo o meio ambiente**: (como se preparar para as normas ISO 14000). São Paulo: Pioneira, p. 117, 1995.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. **The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and Applications**. Minerals Engineering, v. 10, p. 659-669, 1997.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers**. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 38, p. 3932-3941, 1999.

VAN JAARSVELD, JGS; VAN DEVENTER, JSJ; KORNIEJUK, A. **Fatores que influenciam o desempenho de geopolímeros à base de cinzas volantes**. Engenharia Mineral, v. 15, n. 3, pág. 625-632, 2002.

VASSALLO, E. E. **Estudo da reatividade química e pozolânica de materiais silicatados e aluminossilicatados**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

VOGT, E. T. C.; WECKHUUSEN, B. M. **Fluid catalytic cracking: can the old (old workhorse of the refinery) meet the challenges of the future?** Chemical Society Reviews, v. 44, n. 20, p. 7342-7388, 2015.

WALKLEY, B. et al. **Química do gel geopolímero: 1. O papel da relação Si/Al.** Revista de Ciência de Materiais, v. 44, p. 4433-4449, 2015.

WANG, W. et al. **Influência das condições de cura nas propriedades dos geopolímeros.** Cement and Concrete Research, v. 24, n. 4, p. 691-701, 1994.

WECKHUUSEN, Bert M. et al. **Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis.** Chemical Society Reviews, Cambridge, v. 44, n. 20, p. 7342–7370, 2015. DOI: 10.1039/C5CS00029G.

YAO, X. et al. **Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry.** Thermochimica Acta, v. 493, p. 49–54, 2009.

YUN FENG, W. **Catalyst design for fluid catalytic cracking.** Beijing: Chemical Industry Press, 2013.

ZHANG, M.; ZHAO, M.; ZHANG, G.; MANN, D.; LUMSDEN, K.; TAO, M. **Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water.** Construction and Building Materials, [S. l.], v. 124, p. 373–382, 2016