



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

ALLYSON DENYS BRASILEIRO DE ARAUJO

Avaliação do potencial de utilização dos resíduos de caulim em substituição parcial ao cimento Portland no âmbito do APL de pegmatitos RN/PB

RECIFE
2025

ALLYSON DENYS BRASILEIRO DE ARAUJO

Avaliação do potencial de utilização dos resíduos de caulim em substituição parcial ao cimento Portland no âmbito do APL de pegmatitos RN/PB

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao programa de Bacharelado em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima.

Coorientador: Me. Igor Vieira Fernandes.

RECIFE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Araujo, Allyson Denys Brasileiro de.

Avaliação do potencial de utilização dos resíduos de caulim em substituição parcial ao cimento Portland no âmbito do APL de pegmatitos RN/PB. / Allyson Denys Brasileiro de Araujo. - Recife, 2025.

45p. : il.

Orientador(a): Robson Ribeiro Lima

Coorientador(a): Igor Viera Fernandes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Minas - Bacharelado, 2025.

1. Resíduo de caulim. 2. Cinza de caulim. 3. Reatividade pozolânica. 4. Sustentabilidade. I. Lima, Robson Ribeiro. (Orientação). II. Fernandes, Igor Viera. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

ALLYSON DENYS BRASILEIRO DE ARAUJO

Avaliação do potencial de utilização dos resíduos de caulim em substituição parcial ao cimento Portland no âmbito do APL de pegmatitos RN/PB

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao programa de Bacharelado em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovado em: 22/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
(orientador)

Doutorando Igor Vieira Fernandes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE
(coorientador)

Prof. Dr. Antônio Pedro Ferreira Sousa – UFCG
Universidade Federal de Campina Grande (Orientador)
(examinador externo)

Prof. Me. Carlos Eduardo da Silva Araújo
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me conceder saúde, perseverança e determinação para chegar até aqui, iluminando meu caminho mesmo diante dos desafios.

À minha família, especialmente à minha mãe, Lúcia Brasileiro, ao meu pai, José Antônio Brasileiro, e ao meu irmão, Anderson Brasileiro, pela confiança e pelo suporte constante em todas as etapas da minha vida. Sou imensamente grato por terem acreditado em mim, inclusive quando decidi mudar de curso, da Licenciatura em Física para a Engenharia de Minas, sempre me incentivando a seguir os meus sonhos.

À minha namorada, Alice Alcoforado, pelo carinho, paciência e pelo incentivo diário que foram fundamentais nesta reta final do curso.

Ao meu orientador, professor Robson Ribeiro Lima, pela dedicação, paciência e pelas valiosas orientações que não apenas direcionaram este trabalho, mas também enriqueceram minha formação acadêmica.

Ao meu coorientador, Igor Vieira Fernandes, pela orientação e disponibilidade em me ajudar em todas as etapas da realização deste TCC, oferecendo direcionamentos fundamentais para que este trabalho se concretizasse.

Ao meu orientador da iniciação científica, professor Antônio Acácio de Melo Neto, pela confiança, pelos ensinamentos e pelo conhecimento transmitido durante essa etapa tão importante da minha jornada. Estendo também o agradecimento a todos do LABTAG, pela oportunidade de realizar a iniciação científica, experiência que resultou diretamente no tema deste Trabalho de Conclusão de Curso e que foi essencial para o meu amadurecimento acadêmico e profissional.

À minha grande amiga, Mirella Alcoforado, por todo o companheirismo ao longo do curso, pelas inúmeras vezes em que me ajudou e pela amizade sincera que levarei comigo para além da universidade.

Aos professores Amanda, Áureo, Artur, Carlos Eduardo, Carlos Magno, Felipe Brito, José Carlos, Júlio, Márcio, Marinésio, Pedro Guzzo e Rafael, que contribuíram significativamente para minha formação, transmitindo não apenas conhecimento técnico, mas também valores e exemplos que levarei para a vida profissional e pessoal.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, seja com palavras de incentivo, gestos de apoio ou simplesmente compartilhando momentos que tornaram a trajetória mais leve e significativa.

RESUMO

A problemática do resíduo de caulim gera desafios ambientais e socioeconômicos devido à destinação inadequada, pois esse subproduto do beneficiamento pode contaminar solo e água, impactando comunidades locais. Soluções sustentáveis, como tecnologias de reaproveitamento, são essenciais para equilibrar os impactos econômicos e ambientais na região. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial pozolânico do resíduo de caulim para sua utilização em substituição parcial ao cimento Portland. Avaliando suas propriedades e comportamentos que indiquem o seu possível potencial pozolânico. Contribuindo assim para minimizar os danos sociais e ambientais causados pelas operações de aproveitamento do caulim, agregar valor à cadeia produtiva mineral, e fortalecer o Arranjo Produtivo Local em Pegmatitos RN/PB, na Província Pegmatítica do Seridó. Inicialmente, o material foi caracterizado física, química e mineralogicamente. Os testes de superfície específica de Blaine, massa específica pelo frasco de Le Chatelier e granulometria a laser foram realizados para avaliar as características físicas. Foi avaliada a análise termogravimétrica (ATG) para caracterizar quimicamente a amostra, enquanto os testes de Difração de Raios-X (DRX) para avaliar as fases mineralógicas presentes. Na segunda fase, foram realizados testes padronizados e indiretos de avaliação da pozolanidade, conforme as normas brasileiras NBR 5751:2015 e NBR 5752:2014. O primeiro teste avaliou a atividade pozolânica com hidróxido de cálcio aos 7 dias, enquanto o segundo avaliou o índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. O resíduo *in natura* apresentou baixo potencial pozolânico em ambos os testes, indicando que não é adequado para uso como material cimentício suplementar. Em virtude disso, em uma terceira fase o resíduo foi calcinado a 600°C em mufla para aumentar sua amorficidade e reatividade pozolânica. O material calcinado foi caracterizado e avaliado quanto à pozolanidade pelos mesmos testes de resistência mecânica utilizados na segunda fase, e também por avaliações microestruturais por difração de raios-X (DRX) e por análise termogravimétrica em pastas de hidróxido de cálcio e resíduo beneficiado. Os resultados mostraram que o resíduo calcinado apresentou significativo potencial pozolânico, com valores de resistência à compressão superiores aos requisitos mínimos e consumo notório de hidróxido de cálcio na análise termogravimétrica das pastas.

Palavra-Chave: Resíduo de caulim, cinza de caulim, reatividade pozolânica, sustentabilidade, fortalecer o APL.

ABSTRACT

The issue of kaolin waste generates environmental and socioeconomic challenges due to its improper disposal. This byproduct of processing can contaminate soil and water, impacting local communities. Sustainable solutions, such as reuse technologies, are essential to balance the economic and environmental impacts in the region. This study aims to evaluate the pozzolanic potential of kaolin waste for its use as a partial substitute for Portland cement by assessing its properties and behaviors that indicate its possible pozzolanic potential. This contributes to minimizing the social and environmental damage caused by kaolin mining operations, adding value to the mineral production chain, and strengthening the Local Productive Arrangement (LPA) of Pegmatites in RN/PB, within the Seridó Pegmatitic Province. Initially, the material was physically, chemically, and mineralogically characterized. Blaine specific surface area, specific gravity by Le Chatelier flask, and laser granulometry tests were conducted to evaluate its physical characteristics. Thermogravimetric analysis (TGA) was used to chemically characterize the sample, while X-Ray Diffraction (XRD) tests were used to assess the mineralogical phases present. In the second phase, standardized and indirect tests for pozzolanicity were performed according to Brazilian standards NBR 5751:2015 and NBR 5752:2014. The first test evaluated the pozzolanic activity with calcium hydroxide at 7 days, while the second assessed the pozzolanic activity index with Portland cement at 28 days. The raw waste showed low pozzolanic potential in both tests, indicating that it is not suitable for use as a supplementary cementitious material. Consequently, in a third phase, the waste was calcined at 600°C in a muffle furnace to increase its amorphousness and pozzolanic reactivity. The calcined material was characterized and evaluated for pozzolanicity using the same mechanical strength tests from the second phase, as well as by microstructural evaluations through X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetric analysis on pastes of calcium hydroxide and the treated waste. The results showed that the calcined waste exhibited significant pozzolanic potential, with compressive strength values exceeding the minimum requirements and a noticeable consumption of calcium hydroxide in the thermogravimetric analysis of the pastes.

Keywords: Kaolin waste, kaolin ash, pozzolanic reactivity, sustainability, strengthening the LPA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do tratamento Recau – Tratamento térmico.	20
Figura 2 – Difratoograma do hidróxido de cálcio P.A.	21
Figura 3 – Distribuição granulométrica discreta e acumulada do agregado miúdo.	22
Figura 4 – Distribuição discreta e acumulada (a) e diâmetros característicos para o resíduo bruto e a cinza (b).	29
Figura 5 – Distribuição granulométrica discreta e acumulada para o resíduo bruto (Recau_IN) e a cinza (Cincau).	30
Figura 6 – Difratoogramas do Recau_IN e do Cincau.	31
Figura 7 – Resistência à compressão para misturas com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias.	33
Figura 8 – Difratoograma da pasta de hidróxido de cálcio e Cincau	35
Figura 9 – Curvas de perda de massa e de termogravimetria derivada (DTG) para pasta de referência de hidróxido de cálcio (A) e para pasta de Ca(OH)_2 e cincau (B).	36
 Tabela 1 – Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-40.	 20
Tabela 2 – Dados técnicos do aditivo superplastificante SIKA VISCOCRETE 100HE.	22
Tabela 3 – Quantidades de materiais usados na determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias.	25
Tabela 4 – Quantidades de materiais usados na determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias.	26
Tabela 5 – Resultado de resistência à compressão da NBR 5751.	32
Tabela 6 – Resultados de resistência à compressão da NBR 5752.	32
Tabela 7 – Perda de massa obtida no ensaio de termogravimetria e dados obtidos por estequiometria.	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO ESPECÍFICOS	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
3.1	MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.....	13
3.2	CONCEITOS E PROPRIEDADES DO RESÍDUO DE CAULIM	14
3.3	USO DO RESÍDUO CALCINADO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR.....	15
3.4	USO DO RESÍDUO <i>IN NATURA</i> E APLICAÇÕES ALTERNATIVAS	16
3.5	IMPACTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE	16
3.6	PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
4	METODOLOGIA	19
4.1	MATERIAIS	19
4.1.1	Caracterização do caulim	19
4.1.2	Caracterização do cimento Portland	20
4.1.3	Caracterização do hidróxido de cálcio	21
4.1.4	Caracterização do agregado miúdo	21
4.1.5	Caracterização do aditivo superplastificante.....	22
4.2	MÉTODOS.....	23
4.2.1	Caracterização de materiais anidros	23
4.2.1.1	Difração de raios-X (DRX)	23
4.2.1.2	Análise Termogravimétrica (ATG).....	23
4.2.2	Avaliação da atividade pozolânica	24
4.2.3	Índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias - NBR 5752	25
4.2.4	Pastas com hidróxido de cálcio.....	26
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO OBJETIVA DOS RESULTADOS ..	28
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	28
5.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	29
5.3	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	30
5.4	CARACTERIZAÇÃO POZOLÂNICA	31
5.4.1	Ensaio indiretos de avaliação da pozolanicidade	31

5.4.2	Testes indiretos de pozolanicidade em pastas de hidróxido de cálcio	34
5.4.2.1	Difração de raios-X (DRX)	34
5.4.2.2	Análise termogravimetria (ATG)	36
6	CONCLUSÕES	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A exploração e processamento do caulim no polo extrativista de Junco do Seridó – PB acarretam impactos significativos no ambiente circundante. Durante o beneficiamento, o escoamento superficial e a infiltração de substâncias químicas podem contaminar os cursos d'água e alterar as propriedades do solo, prejudicando a vegetação e a sua fertilidade. Segundo Privitera (2017), o resíduo resultante do processo é descartado sem tratamento adequado, resultando em danos irreparáveis ao meio ambiente. Este resíduo se transforma em pó e se dispersa pelo vento e chuva, contaminando o ar, a água, a vegetação e impactando a saúde da população. Além disso, a remoção da vegetação para mineração pode intensificar a erosão do solo, agravando a degradação ambiental e representando uma ameaça à biodiversidade local. Esses impactos ressaltam a importância da implementação de práticas de gestão ambientalmente responsáveis e do uso de tecnologias de mitigação para reduzir os danos ao meio ambiente causados pela atividade de mineração de caulim em Junco do Seridó – PB.

A produção mundial de caulim é significativa, com os principais produtores sendo os Estados Unidos, Brasil, Índia e Alemanha. Em 2023, a produção global de caulim foi estimada em cerca de 44 milhões de toneladas métricas, com o Brasil contribuindo com aproximadamente 1,8 milhões de toneladas. Durante o processo de beneficiamento do caulim, uma grande quantidade de resíduo é gerada. Estima-se que cerca de 75% do caulim extraído se transforme em resíduo. Esses resíduos são frequentemente dispostos sem controle nos pátios das empresas, em terrenos baldios e em áreas de vegetação nativa, ocupando grandes espaços e gerando diversos impactos ambientais (Almeida, 2018).

Por outro lado, a indústria da construção civil, um dos principais setores consumidores de caulim, onde é utilizado na fabricação de cerâmica, plástico, tintas, refratários e em especial o papel, enfrenta desafios relacionados ao consumo energético e à geração de resíduos. O processo de beneficiamento do caulim demanda um alto consumo energético, contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa e para o esgotamento de recursos naturais não renováveis. Diante desses desafios, o resíduo de caulim (Recáu) surge como um material com potencial para ser reutilizado na construção civil.

Com isso, são buscadas alternativas sustentáveis que vem se intensificando nos últimos anos, principalmente devido a essa necessidade de reduzir o impacto ambiental da indústria. Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são uma dessas alternativas, e o resíduo de caulim (Recáu) apresenta um grande potencial nesse sentido (Azevedo 2019). A pozolanicidade do Recáu, que é a capacidade de reagir com hidróxido de cálcio em presença de água formando

compostos cimentícios, o torna um candidato viável para ser usado como MCS (Karatas 2020). A incorporação de resíduos industriais, como o Recau, em materiais de construção promove a sustentabilidade e a economia circular, diminuindo a necessidade de descarte de resíduos e aproveitando subprodutos industriais (Junior 2022).

Este trabalho é parte projeto “Aproveitamento dos Resíduos de Caulim nos Processos de Produção de Materiais Pozolânicos, Cerâmica Vermelha e Remineralizadores no APL em Pegmatitos RN/PB”, fruto da parceria entre a UFCG e o MCTI, com a coordenação geral do professor Antônio Pedro Ferreira Sousa, que conta com a participação de uma equipe multidisciplinar e também a participação de outras instituições de ensino. A UFPE é representada pelo professor Robson Ribeiro Lima do Departamento de Engenharia de Minas CTG.

Os APLs de base mineral são apoiados pelo GTP APL e são constituídos por uma cadeia produtiva diversificada envolvendo a pesquisa mineral, a lavra, o beneficiamento de minérios, a transformação mineral e a comercialização do produto. Atualmente, segundo dados da Rede APL mineral, existem 89 APLs de base mineral constituídos no Brasil e os principais insumos da cadeia produtiva mineral que são aproveitados em APLs são: agrominerais, água mineral, agregados para construção civil, calcário e cal, cerâmica vermelha, cerâmica de revestimento, gesso, gemas e joias, pegmatitos, rochas ornamentais e sal de cozinha (Souza et al., 2023).

Dessa forma, este estudo espera-se caracterizar física, química e mineralogicamente os resíduos de Caulim provenientes do APL Pegmatitos RN/PB e avaliar a pozolanicidade do mesmo tanto no estado bruto como submetido à calcinação, para verificar seu potencial para ser usado como material cimentício suplementar.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar a caracterização do resíduo de caulim *in natura* (Recau_IN) e do resíduo beneficiado (Cincau), avaliando suas propriedades e comportamentos que indiquem o seu possível potencial pozolânico. Essa análise visa fundamentar o uso desses materiais como adição mineral ao cimento Portland, contribuindo assim para minimizar os danos sociais e ambientais causados pelas operações de aproveitamento do caulim, agregar valor à cadeia produtiva mineral, e fortalecer o APL em Pegmatitos RN/PB, na Província Pegmatítica do Seridó.

2.1 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicamente, química e mineralogicamente o Recau *in natura* e beneficiado, abrangendo análises de composição química, estrutura cristalina e morfologia, de forma a identificar as fases minerais presentes e as alterações ocorridas após o beneficiamento;
- Estudar a influência do processo de calcinação do resíduo na modificação de suas características e no desenvolvimento de propriedades pozolânicas;
- Determinar o potencial pozolânico do Recau utilizando os métodos padronizados descritos na NBR 5751 e NBR 5752, de forma a quantificar sua reatividade e sua viabilidade como material cimentício suplementar.
- Confirmar o potencial pozolânico da cinza resultante do beneficiamento do resíduo por métodos diretos de avaliação da pozolanicidade: análise qualitativa de fases por difração de raios-X e teor de Ca(OH)_2 por análise termogravimétrica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são adições minerais usadas junto ao cimento Portland para melhorar as propriedades das argamassas e concretos, além de reduzir impactos ambientais. Eles ajudam a diminuir o consumo de clínquer (principal componente do cimento) e, conseqüentemente, as emissões de gás carbônico durante a produção (Bauer, 2019).

De forma geral, a literatura (Mehta, P. K.; Monteiro, 2014; Neville, A. M.; Cremonini, 2016) classifica os MCS em três grupos:

1. **Materiais pozolânicos** – São materiais ricos em sílica (SiO_2) ou sílica e alumina ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) que, na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland. Essa reação, chamada de *reação pozolânica*, forma compostos cimentantes adicionais, principalmente o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o silicato de cálcio aluminoso hidratado (C-A-H), responsáveis pelo ganho de resistência e pela maior durabilidade do concreto. Exemplos: metacaulim, cinza volante, sílica ativa.
2. **Materiais cimentantes** – São materiais que, assim como o cimento, conseguem hidratar e endurecer sozinhos, sem depender do Ca(OH)_2 produzido pelo cimento. O exemplo mais conhecido é a escória granulada de alto-forno, que reage em meio alcalino para formar compostos hidratados.
3. **Filers inertes** – São materiais que não apresentam reação química significativa, mas contribuem fisicamente para melhorar a compactação e reduzir os vazios da matriz, o que pode ajudar na resistência e na durabilidade. Um exemplo é o filer calcário.

No caso dos materiais pozolânicos, a reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) traz uma série de benefícios importantes para o desempenho do concreto. Essa reação consome a portlandita, que é um produto da hidratação do cimento quimicamente menos estável, e forma compostos adicionais de C-S-H e C-A-H, responsáveis por aumentar a resistência mecânica. Além disso, promove a redução da porosidade e a diminuição da permeabilidade da pasta de cimento, o que contribui para o aumento da durabilidade, dificultando a penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos (Neville, A. M.; Cremonini, 2016).

A velocidade e a intensidade da reação pozolânica dependem de vários fatores, como a composição química do material, o grau de amorfização (quantidade de parte não cristalina), a

finura e as condições de cura. Em argilas ricas em caulinita, por exemplo, a calcinação é usada para aumentar a reatividade, transformando a caulinita cristalina em metacaulinita amorfa — uma fase muito mais reativa com o Ca(OH)_2 (Ribeiro et al., 2021).

No caso do resíduo de caulim, objeto deste estudo, seu aproveitamento na construção civil pode ocorrer de duas formas principais:

- **Como filer**, quando apresenta baixa reatividade, atuando apenas no preenchimento dos vazios da matriz cimentícia e melhorando a compactação.
- **Como pozolana ativa**, quando é devidamente beneficiado por processos como a calcinação, passando a reagir com o hidróxido de cálcio e contribuindo de forma química para a formação de compostos cimentantes.

Essa dupla possibilidade de aplicação torna o resíduo de caulim um material de grande interesse, justificando a análise mais detalhada que será apresentada na seção seguinte.

3.2 CONCEITOS E PROPRIEDADES DO RESÍDUO DE CAULIM

Devido à elevada presença de caulinita em sua composição, o resíduo de caulim apresenta-se como um material promissor para uso como material cimentício suplementar (MCS) na construção civil, em especial como pozolana ativa. A caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) é um argilomineral do grupo das filossilicatas, caracterizado por sua estrutura lamelar e alta reatividade após a ativação térmica. Para aplicação como MCS pozolânico, é necessário submeter esse material à calcinação em temperaturas superiores a 550°C , a fim de romper a estrutura cristalina da caulinita e convertê-la em metacaulinita — uma fase amorfa e altamente reativa com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , liberado durante a hidratação do cimento Portland.

A metacaulinita atua como um reagente pozolânico ao reagir com o Ca(OH)_2 , formando compostos cimentantes secundários, como o gel C-(A)-S-H (silicato de cálcio aluminoso hidratado), que melhora significativamente a resistência mecânica e a durabilidade das pastas e concretos. Esse processo de reação pozolânica contribui para a redução da porosidade, aumento da densidade e mitigação de problemas como a reação álcali-agregado e a lixiviação de íons, aspectos diretamente ligados à maior durabilidade das estruturas e menor necessidade de manutenção. A literatura aponta que a faixa ideal de calcinação da caulinita está entre 650°C e 800°C , com pico de reatividade geralmente observado em torno de 700°C , variando conforme a pureza do material e a taxa de aquecimento (Sabir et al., 2001; Baldo, 2015).

3.3 USO DO RESÍDUO CALCINADO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Nesse contexto, diversos estudos vêm sendo conduzidos com o intuito de avaliar o potencial do resíduo de caulim — muitas vezes descartado em grandes volumes pela indústria de beneficiamento mineral — como MCS em formulações cimentícias, contribuindo para a redução do impacto ambiental gerado pelo descarte inadequado. Lima (2004) investigou o uso da cinza do resíduo de caulim calcinado a 850 °C por 70 minutos como pozolana. Os resultados demonstraram incrementos de até 54% na resistência à compressão em substituições de até 50% do cimento Portland por resíduo calcinado, evidenciando a eficiência do resíduo como MCS ativo com alto potencial técnico.

De forma semelhante, Silva et al. (2021) analisaram o uso do resíduo de caulim no cimento LC³ (Limestone Calcined Clay Cement), uma tecnologia desenvolvida com o objetivo de reduzir significativamente as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento. O LC³ combina calcário e argila calcinada — especialmente metacaulim — permitindo reduzir o teor de clínquer, principal fonte de emissão de CO₂ na indústria cimenteira. Os experimentos revelaram que a metacaulinita obtida a partir do resíduo de caulim calcinado a 750 °C por 1 hora em mufla produziu cimentos com resistência à compressão estatisticamente equivalentes aos formulados com caulim de alta pureza. Destaca-se, ainda, a melhoria no desempenho reológico: o cimento LC³ com resíduo apresentou redução de 9,2% na demanda de água, 15,1% na água de consistência e aumento de 46,4% na fluidez da mistura — fatores essenciais para a trabalhabilidade e economia de água nos canteiros de obra, além de favorecer o uso racional dos recursos naturais.

Outro estudo relevante é o de Arruda Júnior et al. (2022), que analisou o uso do resíduo calcinado como MCS em argamassas e concretos pigmentados. A calcinação a 800 °C por 90 minutos resultou em elevação expressiva da resistência à compressão — até 80% aos 7 dias e 67% aos 28 dias — além da redução de eflorescência e lixiviação quando pigmentos à base de sódio foram empregados. Esse resultado demonstra o efeito sinérgico entre o MCS pozolânico e os aditivos, permitindo o desenvolvimento de materiais coloridos mais duráveis e estáveis, com valor estético agregado e menor degradação por intempéries.

Castro (2008) observou que a calcinação a temperaturas mais baixas, como 600 °C por duas horas, também pode ativar suficientemente o resíduo. A substituição de apenas 10% do cimento por resíduo calcinado resultou em argamassas com desempenho satisfatório para

aplicações em assentamento e revestimento, sinalizando que mesmo temperaturas abaixo da faixa tradicional podem ser viáveis, dependendo da mineralogia do resíduo e do uso pretendido como MCS. Tal abordagem favorece o aproveitamento de resíduos com menor consumo energético, ampliando a sustentabilidade do processo.

3.4 USO DO RESÍDUO *IN NATURA* E APLICAÇÕES ALTERNATIVAS

Importante destacar que, além das rotas envolvendo a calcinação para obtenção de metacaulinita, também há estudos que avaliam o aproveitamento do resíduo de caulim como MCS *in natura*, ou seja, sem tratamento térmico. Nóbrega (2007) propôs o uso de dois tipos de resíduos: o mais grosso (conhecido como birra), como substituto parcial do agregado miúdo, e o mais fino (borra), em substituição à cal em argamassas mistas. Os resultados comprovaram a viabilidade técnica dessas substituições, demonstrando a versatilidade do resíduo como material cimentício alternativo e sua adequação a sistemas construtivos de baixo custo.

Santana (2008), por sua vez, desenvolveu concretos pré-fabricados substituindo até 15% da areia natural por resíduo de caulim sem calcinação. O estudo apontou melhorias significativas no abatimento e resistência à compressão, atribuídas à maior compactação e melhor empacotamento das partículas na matriz do concreto. Essa abordagem é vantajosa do ponto de vista energético, pois elimina a necessidade de calcinação, reduzindo custos e emissões de carbono, sem comprometer o desempenho técnico do produto final.

Azeredo e Diniz (2013) aplicaram o resíduo em concretos autoadensáveis, utilizando as frações finas como MCS em substituição ao cimento e as frações mais grossas como agregado graúdo. Os teores ideais foram de 30% para substituição do cimento e entre 16% e 20% para substituição do agregado graúdo. Os concretos produzidos apresentaram desempenho reológico e mecânico compatíveis com os concretos de referência, evidenciando o potencial técnico do resíduo em aplicações estruturais de maior exigência.

3.5 IMPACTOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE

O aproveitamento do resíduo de caulim, seja na forma calcinada ou *in natura*, representa uma estratégia ambientalmente vantajosa para a construção civil e para a mineração. Do ponto de vista ambiental, o uso desse resíduo contribui diretamente para a redução do descarte inadequado, evitando o acúmulo em áreas de deposição e a consequente degradação de solos,

corpos d'água e vegetação. Além disso, ao substituir parte do clínquer na produção de cimento, contribui para uma redução da demanda energética e das emissões de CO₂, já que o clínquer é o principal responsável pela pegada de carbono do cimento Portland (Brito e Dweck, 2022; Scrivener et al., 2018).

No contexto de tecnologias mais recentes, como o cimento LC³ (Limestone Calcined Clay Cement), o resíduo de caulim calcinado pode desempenhar papel fundamental ao combinar-se com o calcário para reduzir o teor de clínquer, mantendo ou até melhorando propriedades mecânicas e de durabilidade (Prashar, 2024; Scrivener et al., 2018). Esse reaproveitamento está alinhado aos princípios da economia circular, pois transforma um passivo ambiental em insumo de valor agregado, diminuindo a extração de recursos naturais e promovendo o uso eficiente de matérias-primas (Rojas et al., 2020). Assim, o uso desse resíduo contribui não apenas para a preservação ambiental, mas também para a inovação e valorização de resíduos no setor da construção civil.

3.6 PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A literatura técnica aponta de forma consistente que o resíduo de caulim possui elevado potencial de aplicação como material cimentício suplementar, tanto em sua forma calcinada, atuando como pozolana reativa, quanto *in natura*, desempenhando função de adição mineral ou substituto parcial de agregados. Quando calcinado, a transformação da caulinita em metacaulinita amorfa confere ao material alta reatividade com o hidróxido de cálcio, favorecendo a formação de compostos cimentantes adicionais e resultando em concretos e argamassas com maior resistência e durabilidade (Brito; Dweck, 2022; De Azeredo; Struble; Carneiro, 2015; Rojas et al., 2020).

Por outro lado, o resíduo de caulim no seu estado *in natura* tem sido empregado preferencialmente como substituto parcial do agregado miúdo, explorando o efeito de empacotamento e a modulação reológica da mistura (Nascimento et al., 2019; Souza et al., 2021). Quando a fração é mais fina, ele pode atuar também como filer físico, contribuindo para a compacidade e a coesão, desde que se controle a demanda de água. Em geral, os melhores resultados ocorrem com teores moderados de substituição e uso de aditivos, evitando excesso de finos argilosos que aumentam a viscosidade e a porosidade (Menezes et al., 2009). Assim, o emprego “*in natura*” atua majoritariamente por efeito físico (granulometria/empacotamento), distinto do ganho químico obtido quando o resíduo é calcinado e passa a reagir como pozolana.

Dessa forma, a utilização do resíduo de caulim na construção civil integra ganhos técnicos e ambientais, contribuindo para a redução da pegada de carbono, o aproveitamento de resíduos industriais e a diminuição da exploração de recursos naturais (Souza et al., 2021). Ao transformar um passivo ambiental em recurso produtivo, reforça-se a importância de pesquisas voltadas à sua caracterização e validação, como a proposta neste trabalho.

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi estruturada para viabilizar uma avaliação criteriosa do potencial pozolânico do resíduo de caulim, objetivando sua aplicação como material cimentício suplementar. O planejamento experimental contemplou etapas sequenciais de caracterização física, química e mineralógica do material, seguida da realização de ensaios normatizados para determinação de sua reatividade.

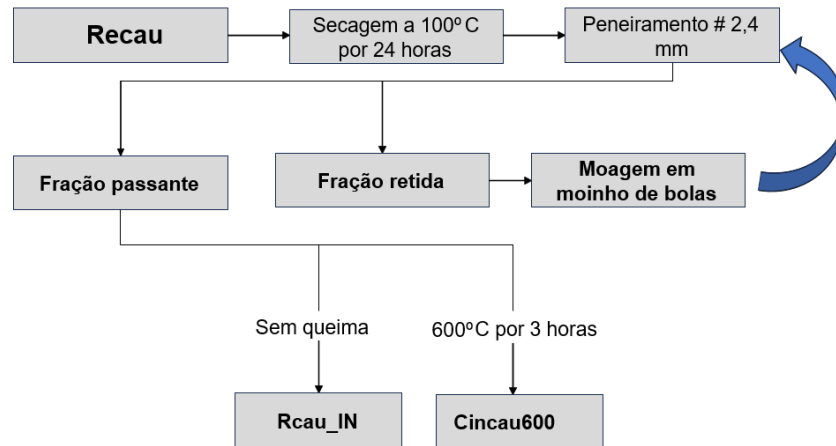
4.1 MATERIAIS

4.1.1 Caracterização do caulim

Conforme abordado na literatura, para apresentar reatividade, é necessária calcinação e moagem para melhorar a reatividade do resíduo e viabilizá-lo como adição cimentícia suplementar. Portanto, para elucidar estas questões, inicialmente o Recau foi seco em estufa a 100°C, e peneirado na malha de abertura de 4,8 mm, para a retirada de materiais contaminantes (pedras, folhas, etc.). Em seguida, o material passante foi peneirado na malha de abertura de 2,4 mm, onde a fração passante seguiu para ser usada nos ensaios e a retida foi moída em moinho de bolas por 5 minutos, com intuito de apenas desagregar o material grosseiro, e retornada novamente para peneirar na malha de abertura de 2,4 mm. O material resultante deste preparo inicial (fração passante) foi denominado de Recau “*in natura*” (Recau_IN).

A fração passante foi encaminhada para o tratamento térmico em mufla. O material foi calcinado a 600°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, permanecendo 3 horas no patamar de queima, e o resfriamento ocorreu de forma lenta em temperatura ambiente. Para efeito comparativo, também foi utilizado o Recau sem tratamento térmico nas investigações do estudo. A Figura 1 ilustra o processo de beneficiamento.

Figura 1 – Esquema do tratamento Recau – Tratamento térmico.



Fonte: Autor (2025).

A atividade pozolânica é fator de grande importância para o objetivo deste estudo. Caso o material apresente bom potencial pozolânico poderá ser de grande valia para ser usado como adição mineral, pois contribuirá para a melhoria das características da zona de transição interfacial entre pasta e agregado e favorecendo à durabilidade, tendo em vista que consumirá hidróxido de cálcio na reação pozolânica. Para o estudo da

4.1.2 Caracterização do cimento Portland

O cimento utilizado para confecção das argamassas para determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, referente à NBR 5752 (ABNT, 2014) foi o composto com filer, CP II-F 40, da empresa Cimento Nacional. Suas características físicas e mecânicas encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-40.

Ensaio		Resultados	Limites NBR
Finura	Resíduo na peneira	0,06	≤ 10,0
	Blaine (cm ² /kg)	4.446	N.A.
Massa específica (g/cm ³)		3,1	N.A.
Início de pega (min)		170	≥ 60
Fim de pega (min)		230	≤ 600
Resíduo insolúvel		1,98	< 7,5
Expansibilidade a quente (mm)		0,1	≤ 5
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	24,1	N.A.
	3 dias	33,5	≥ 15,0
	7 dias	41,1	> 25,0
	28 dias	48,2	> 40,0

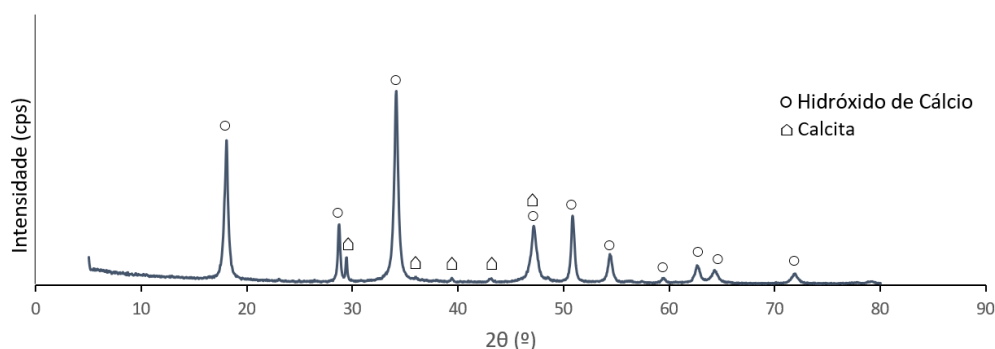
Fonte: Autor (2025).

4.1.3 Caracterização do hidróxido de cálcio

Para o ensaio de determinação da atividade pozolânica com cal, utilizou-se o hidróxido de cálcio P.A, fornecido pela empresa Química Moderna, com teor mínimo de 95%, por se tratar de um material com elevado grau de pureza, como indicado pela NBR 5751 (ABNT, 2015), a fim de garantir maior segurança na obtenção dos resultados. Através do ensaio utilizando o frasco de Le Chatelier (NBR 16605:2017), a massa específica determinada para este material foi de 2,24 g/cm³.

Na análise mineralógica, apresentada na Figura 2, foi identificado que o material é composto majoritariamente de hidróxido de cálcio e picos menores de calcita (CaCO₃), confirmando o elevado teor de Ca(OH)₂, o que favorece à sua reação com o material pozolânico.

Figura 2 – Difratoograma do hidróxido de cálcio P.A.

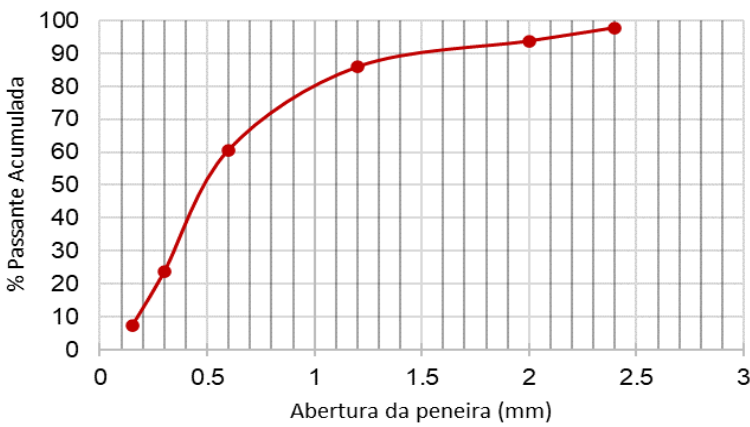


Fonte: Autor (2025).

4.1.4 Caracterização do agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nas argamassas, tanto para o ensaio da NBR 5751 (ABNT, 2015) quanto para o da NBR 5752 (ABNT, 2014), foi uma areia quartzosa cuja composição granulométrica é apresentada na Figura 3. Possui módulo de finura de 2,25, dimensão máxima característica de 2,4 mm e massa específica de 2,47 g/cm³. Não foi possível utilizar areia normal, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-SP), por problemas técnico-financeiros. Portanto, optou-se por um agregado miúdo que apresentasse uma composição granulométrica próxima da areia normatizada segundo a NBR 7214 (ABNT, 2015), assim como ocorreu nos trabalhos de Torres (2019) e Gonzaga (2022).

Figura 3 – Distribuição granulométrica discreta e acumulada do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2025).

4.1.5 Caracterização do aditivo superplastificante

O aditivo utilizado foi o Sika Viscocrete 100HE, fornecido pela Sika Brasil. Este aditivo atua através da adsorção superficial e do efeito estérico, promovendo a separação das partículas de aglomerante, proporcionando uma melhoria na fluidez da mistura. Os dados técnicos estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados técnicos do aditivo superplastificante SIKA VISCOCRETE 100HE.

Propriedade	Resultado
Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto/Cor	Líquido castanho
Densidade	1,09 ± 0,02 kg/L
pH	5,0 ± 1,0

Fonte: Autor (2025).

A necessidade de utilização do aditivo, é importante salientar, se deu em virtude deste contribuir para um melhor adensamento das amostras, mas ao mesmo tempo manter a relação água/aglomerante fixa para todas as misturas nos ensaios de determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias (NBR 5751) e de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (NBR 5752). atividade pozolânica serão usados os métodos da NBR 5751 e da NBR 5752, conforme descritos mais adiante.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Caracterização de materiais anidros

Para as análises físicas das amostras investigadas, do cimento Portland e do hidróxido de cálcio foram determinadas a massa específica por meio do frasco de Le Chatelier, a superfície específica pelo método do permeabilímetro de Blaine e a granulometria a laser com um equipamento de modelo Mastersizer 2000 da Malvern Instruments no Laboratório de Tecnologia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco. Para melhor compreender a composição do resíduo bruto e da sua cinza, também foram realizadas análises mineralógicas por meio da difração de raios-X (DRX) e químicas por meio de análise termogravimetria (ATG).

4.2.1.1 Difração de raios-X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro da Bruker de modelo D2 Phaser no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes da Universidade Federal de Pernambuco. Os parâmetros do ensaio tanto para caracterização das amostras como para o estudo em pastas foram: intervalo de varredura (2θ) de 8 a 70° , passo angular = $0,05^\circ$, tempo por passo de 0,575 segundos, intensidade da corrente de 10 mA, tensão do equipamento de 30 kV. O tubo do feixe era de cobre, emitindo um comprimento de onda de $1,54 \text{ \AA}$.

4.2.1.2 Análise Termogravimétrica (ATG)

A análise termogravimétrica consiste na calcinação da amostra em um meio inerte e devidamente controlado, garantindo que possíveis gases presentes durante o processo não reajam com o material, evitando assim interferências diretas nos resultados. Durante o ensaio, a perda de massa é monitorada em tempo real por uma balança de alta sensibilidade, possibilitando a correlação entre a variação de massa e faixas específicas de temperatura associadas a minerais determinados.

O ensaio de ATG/DTG foi conduzido no Laboratório de Petroquímica, utilizando um equipamento Mettler Toledo, modelo Star System, operando sob atmosfera dinâmica de

nitrogênio (N₂) com fluxo de 50 mL/min. As medições foram realizadas no intervalo de 30 a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

4.2.2 Avaliação da atividade pozolânica

Foram realizados testes de pozolanicidade a partir de ensaios normatizados e não normatizados. Para os primeiros, foram realizados os testes indiretos de determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias e determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Já para os ensaios não normatizados, foi realizada a investigação do consumo de hidróxido de cálcio de pastas com este e o material alternativo avaliado.

4.2.2.1 Atividade pozolânica com cal – NBR 5751:2015

Os métodos para determinar o índice de atividade pozolânica envolvem a avaliação da reatividade com cal e cimento Portland. No primeiro caso, conforme a norma NBR 5751 (ABNT, 2015), três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro de 100 mm de altura são moldados. Esses corpos de prova consistem em argamassas contendo pozolana, hidróxido de cálcio P.A., areia normal e água. A formulação desses materiais segue as diretrizes pré-estabelecida pela norma. A quantidade de água seria ajustada para atingir uma consistência de 225 ± 5 mm, no entanto, sob uma ótica científica, pode comprometer uma análise devido à complexidade de comparar misturas com diferentes proporções de água e aglomerante. A quantidade de água pode ter um impacto significativo nos resultados de resistência à compressão, como discutido em diversos estudos acadêmicos (Kasaniya, et al., 2019; Filho, et al., 2017; Medeiros, et al., 2015; Gava, 1999).

Com base na experiência de estudos anteriores no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (Basto, 2018; Torres et al., 2020; Agra, 2022), foi decidido usar uma relação água/ligante de 0,65 neste estudo conforme a Tabela 3, que apresenta o quantitativo de materiais utilizado na confecção das argamassas com cal e os respectivos índices de consistência obtidos. Isso permitirá atribuir as variações nos resultados do índice de atividade pozolânica à reatividade das amostras de Recau, sem interferência da quantidade de água.

A atividade pozolânica com cal é então determinada por meio do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova após sete dias de cura. Segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), o material pode ser considerado pozolânico no ensaio da NBR 5751 (ABNT, 2015) se obtiver resistência mínima de 6 MPa.

Tabela 3 – Quantidades de materiais usados na determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias.

Mistura	Amostra	Ca(OH) ₂ (g)	Areia (g)	Resíduo (g)	a/c	Água (g)	Aditivo	Aditivo(g)	Ic médio (mm)
1	Recal_IN	104.00	936.00	237.71	0.65	222.11	0.80%	2.73	208.00
2	Cincau	104.00	936.00	230.29	0.65	217.29	0.80%	2.67	155.00

Fonte: Autor (2025).

4.2.2.2 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias - NBR 5752

O Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland aos 28 dias, conforme a norma NBR 5752, é um método utilizado para avaliar a capacidade de um material pozolânico em reagir com o hidróxido de cálcio (presente no cimento Portland) em condições controladas de temperatura e umidade, simulando as condições de cura do concreto. Esse índice é importante para determinar a eficácia da pozolana em melhorar as propriedades do concreto, como resistência mecânica e durabilidade.

O ensaio consiste na utilização de duas diferentes formulações de argamassas: argamassa A, que contém apenas cimento Portland como aglomerante e argamassa B, contendo 25% de material pozolânico, que substitui parcialmente o cimento. Além disso, a argamassa B deve incluir uma quantidade de superplastificante que garanta um índice de consistência dentro do intervalo de ± 10 mm em relação à argamassa A de referência. O índice de desempenho para este caso é calculado pela relação percentual entre as resistências à compressão média da argamassa B e da argamassa de referência. A quantidade dos materiais usados para cada amostra e os respectivos índices de consistência obtidos estão disponíveis na Tabela 4.

O índice de atividade pozolânica é calculado segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), onde determina que o material pode ser considerado pozolânico se caso apresente índice de atividade pozolânica, aos 28 dias com cimento, igual ou superior a 90% à argamassa de referência.

Tabela 4 – Quantidades de materiais usados na determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias.

Mistura	Código da amostra	Cimento (g)	Areia (g)	Resíduo (g)	Água (g)	Aditivo (%)	Aditivo (g)	Ic médio (mm)
REF	Amostra A	416	1248	-	$200 \pm 0,2$	-	-	163
1	Recau_IN	$312 \pm 0,4$	1248	$104 \pm 0,2$	200	0,80	3,33	159
2	Cincau	$312 \pm 0,4$	1248	$104 \pm 0,2$	200	0,80	3,33	168

Fonte: Autor (2025).

4.2.3 Pastas com hidróxido de cálcio

A fim de realizar a validação da reatividade pozolânica da cinza confeccionada neste estudo, optou-se por realizar um ensaio direto de avaliação em pastas de hidróxido de cálcio em análise termogravimétrica, objetivando avaliar o comportamento e a redução do teor de hidróxido de cálcio em virtude da reação pozolânica. As pastas foram preparadas utilizando uma quantidade de 17,34g de hidróxido de cálcio P.A. e a amostra calcinada de resíduo de caulim correspondente ao dobro do volume de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou seja, com a mesma proporção cal/pozolana da NBR 5751 (ABNT, 2015), mantendo a relação água/aglomerante de 0,65. Essa massa de hidróxido de cálcio foi escolhida por ser uma medida equivalente ao necessário para a moldagem de metade de um corpo de prova do normativo em questão, tendo em vista que essa quantidade é mais do que suficiente quando se trata de pastas para investigações microestruturais. A mistura foi realizada em agitador mecânico por 2 minutos a 1600 rpm, e o material foi moldado em recipientes cilíndricos vedados com filme plástico para evitar evaporação e carbonatação.

A cura ocorreu inicialmente por 24 ± 1 h em temperatura de 23 ± 2 °C, sob vácuo em dessecador com sílica gel e hidróxido de bário. Em seguida, as pastas foram mantidas por mais 6 dias em estufa a 55 ± 2 °C. Após 7 dias, a hidratação foi interrompida por imersão em nitrogênio líquido (a -180°C), seguida de fragmentação e armazenamento a -30 °C até a liofilização. O processo de liofilização foi realizado a baixa pressão (< 500 µHg) e temperatura inferior a -30 °C por 24 h, permitindo a sublimação da água. Sublimar a água permite a interrupção efetiva das reações de hidratação, já que ela será eliminada sem passar pelo estado líquido. O material seco foi moído até passar em peneira de 75 µm e utilizado nos ensaios microestruturais de difração de raios-X e de termogravimetria (ATG).

Na difração de raios-X, realizou-se uma avaliação qualitativa das fases mineralógicas presentes na pasta de hidróxido de cálcio e a cinza confeccionada neste estudo. O intuito foi

avaliar a presença de produtos de reação pozolânica e auxiliar na identificação dos estágios térmicos que serão avaliados em seguida na termogravimetria. Para essa análise mineralógica utilizou-se o software Diffrac.EVA da Bruker no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag). A identificação das fases cristalinas foi realizada por comparação do difratograma obtido no ensaio com aqueles dos minerais disponíveis no banco de dados do PDF-2 do Internacional Center for Diffraction Data (ICDD).

Na análise termogravimétrica, o teor de hidróxido de cálcio foi determinado a partir da perda de massa observada entre 380 e 450°C, faixa correspondente à desidroxilação da portlandita segundo a reação $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. A massa de água liberada foi convertida em massa equivalente de Ca(OH)_2 utilizando-se a relação estequiométrica entre suas massas molares (74,09 g/mol para Ca(OH)_2 e 18,02 g/mol para H_2O), resultando no fator 4,11. Dessa forma, multiplicando a perda de água por este fator e dividindo pela massa seca da amostra, obteve-se o teor percentual de Ca(OH)_2 .

O consumo foi calculado comparando-se a pasta de referência (Ca(OH)_2 puro) com a pasta contendo o resíduo de caulim, ajustando-se o valor de referência para refletir a quantidade inicial de hidróxido de cálcio presente na mistura após a substituição pela pozolana. Isso foi feito multiplicando o teor de hidróxido de cálcio da pasta pura pela relação mássica da mistura representada na Equação 1. Por fim, o cálculo do consumo de Ca(OH)_2 foi obtido conforme a Equação 2, como adotado por vários estudos na literatura (Agra et al., 2023; Fernandes et al., 2025; Torres et al., 2020).

$$f_{\text{mistura}} = \frac{m_{\text{Ca(OH)}_2}}{m_{\text{Ca(OH)}_2} + m_{\text{cincau}}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Cons. Ca(OH)}_2(\%) = \frac{M_{\text{ref}} \times f_{\text{mistura}} - M_{\text{mistura_cincau}}}{M_{\text{ref}} \times f_{\text{mistura}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

- $m_{\text{Ca(OH)}_2}$ é a massa de hidróxido de cálcio na mistura;
- m_{cincau} é a massa da cinza do resíduo de caulim na mistura;
- M_{ref} é o teor de hidróxido de cálcio da pasta de referência obtido por termogravimetria;
- $M_{\text{mistura_cincau}}$ é o teor de hidróxido de cálcio da pasta com pozolana obtido por análise termogravimétrica;
- f_{mistura} é a relação mássica de hidróxido de cálcio e pozolana presentes na mistura.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO OBJETIVA DOS RESULTADOS

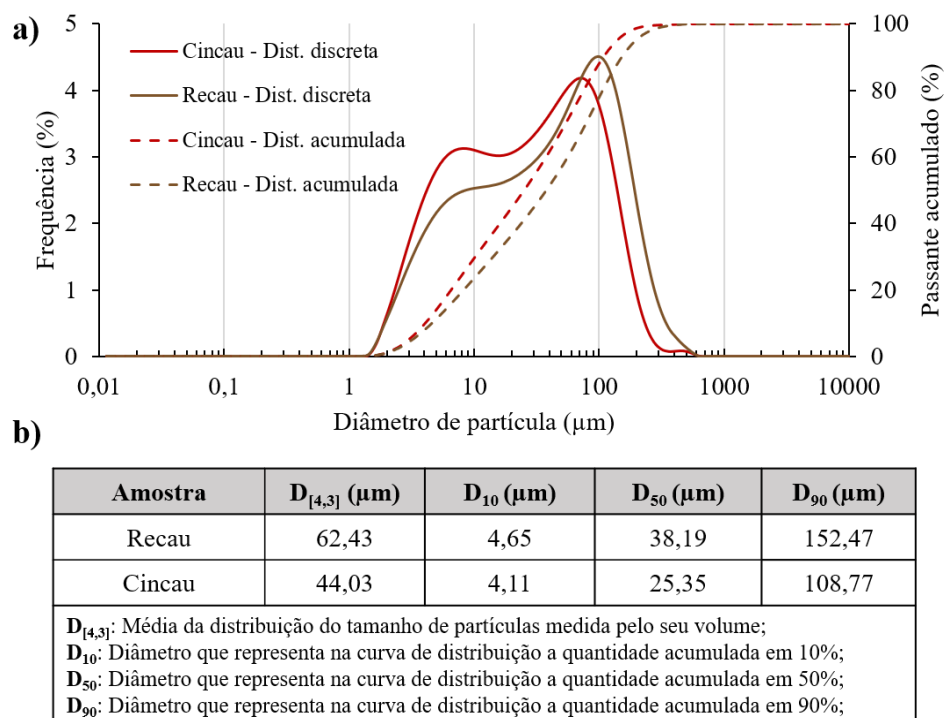
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os valores obtidos para massa específica e superfície específica do Recau *in natura*, foram de 2,56 g/cm³ e 935 m²/kg, respectivamente. Ao passo que Cincau, apresentou massa específica de 2,48 g/cm³ com uma superfície específica de 1178,88 m²/kg. Percebe-se que a massa específica das cinzas é menor em relação à *in natura*. Isso pode ter acontecido pelo fato da cinza ter uma finura mais elevada. A massa específica é determinada pela relação entre a massa e o volume, sendo este excluindo os vazios entre as partículas (Neville e Cremonini, 2016). Dessa forma, quanto menor o tamanho das partículas, maior o empacotamento, resultando em um menor volume de vazios. Assim, com menos vazios a serem desconsiderados, a massa específica é reduzida.

Também foram avaliadas as distribuições de tamanho de partículas por granulometria a laser. A Figura 4 (a) apresenta as curvas granulométricas discretas e acumuladas de ambas as amostras estudadas e a partir dos gráficos, verificou-se que as amostras apresentaram uma granulometria bem graduada, com todas as partículas possuindo tamanho entre 0,1 µm e 1 mm.

Ademais, os diâmetros característicos ($D_{[4,3]}$, D_{10} , D_{50} , D_{90}) estão indicados na Figura 4 (b). Como já era esperado, os valores de diâmetros obtidos para a cinza, que tem uma maior finura, são menores que os da amostra *in natura*. Nesse contexto, percebe-se que a cinza tende a apresentar uma distribuição granulométrica um pouco mais afastada para esquerda do que a amostra *in natura* como é claramente observado.

Figura 4 – Distribuição discreta e acumulada (a) e diâmetros característicos para o resíduo bruto e a cinza (b).



Fonte: Autor (2025).

5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Figura 5 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) tanto para o material *in natura* (Recau_IN) quanto calcinado (Cincau). A perda de massa da amostra bruta é bem maior, com um percentual de cerca de 13,44%, enquanto a perda de massa da cinza é muito pequena, apenas 2,48%.

Foi observado que existem duas etapas de perda de massa para o Recau_IN. A primeira está relacionada a umidade, em que a água é evaporada, representada por um pico pequeno nas temperaturas iniciais. A segunda, no intervalo que vai de cerca de 400°C a 680°C, está associada principalmente à desidroxilação de um mineral argiloso com uma estrutura cristalina bem definida, a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A perda constitucional de OH^- leva à destruição da estrutura da caulinita e à formação de metacaulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2)$), que, por sua vez, apresenta estrutura desordenada, amorfa (Medeiros, 2022).

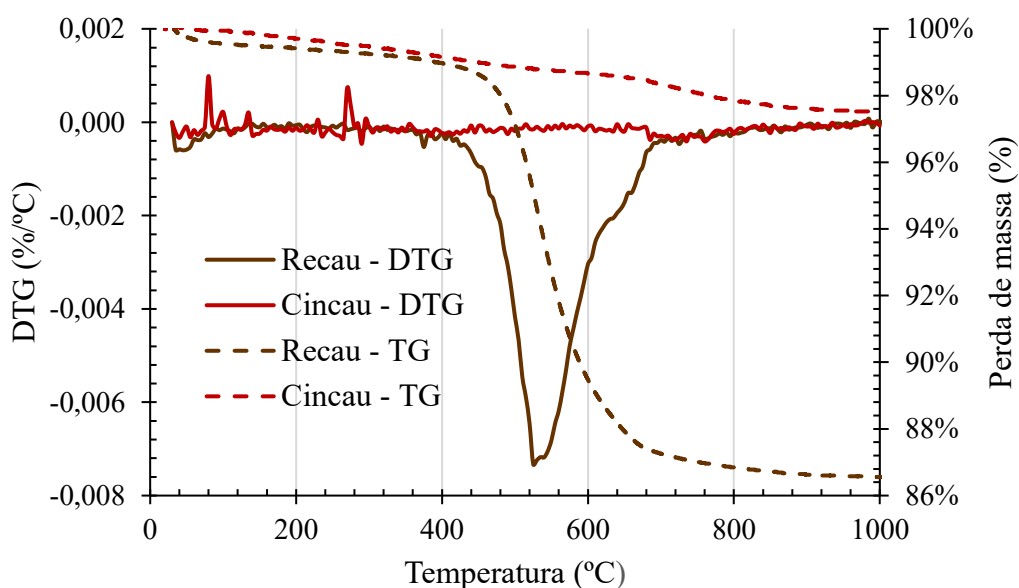
Nesse contexto, vale salientar que essa desidroxilação é a principal responsável por provocar maior reatividade do material, elevar a superfície específica e, conseqüentemente, conferir a ele maior potencial pozolânico. Portanto, quando se avalia a Cincau, que já passou pelo processo de desidroxilação durante sua calcinação, apresenta curvas que mostram que o

material permanece quase estável, praticamente sem nenhuma perda de massa significativa, pois os orgânicos, a água livre e a água de cristalização já foram removidas.

Como em valores teóricos, a desidroxilação da caulinita pura equivale a cerca de 13,95% (Rodrigues, 2019), o valor obtido neste estudo está condizente com o esperado. Contudo, a existência de impurezas, como o quartzo e a muscovita, que foram detectados no ensaio de DRX podem interferir no valor esperado da porcentagem mássica perdida na desidroxilação da caulinita.

Também é importante observar que em alguns trabalhos foi observado a formação de mulita em temperaturas elevadas graças a recristalização da caulinita. O estudo de Moraes (2008) verificou esse processo por volta de 1001°C. No caso deste estudo não foi observado pico de formação da mulita, porém poderia ter sido observado caso o ensaio fosse realizado até temperaturas um pouco maiores que 1000°C, o que não foi o caso.

Figura 5 – Distribuição granulométrica discreta e acumulada para o resíduo bruto (Recau_IN) e a cinza (Cincau).



Fonte: Autor (2025).

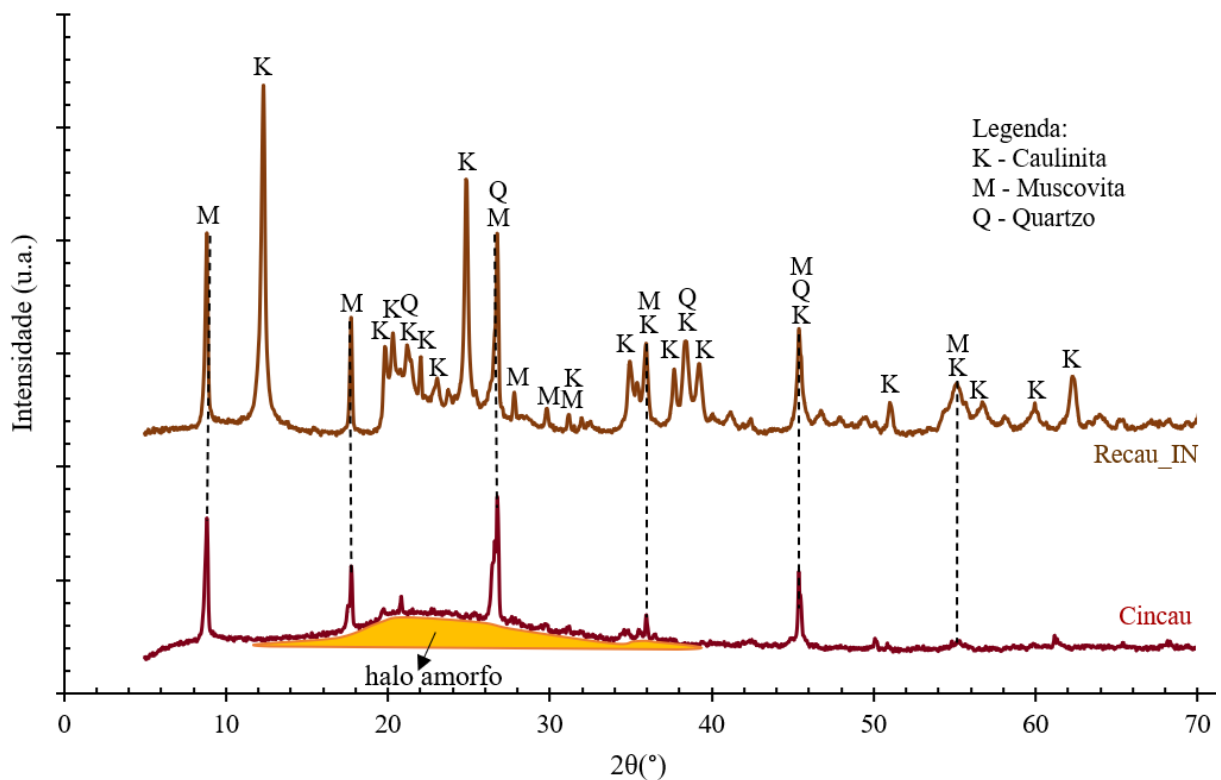
5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A Figura 6 apresenta os difratogramas do resíduo de caulim em seu estado bruto e após calcinação. Observa-se que a maioria dos picos é atribuída à fase caulinita, que é o principal mineral argiloso do caulim, formado a partir da alteração química de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares ricas em alumínio e sílica (USGS, 2023). Além disso, foram identificados picos de muscovita, que pode ter origem na ganga ou no próprio minério de

caulim. A muscovita é comumente encontrada em rochas metamórficas derivadas de rochas ígneas ou sedimentares ricas em micas (Melo e Dall'Agnol, 2015). Picos de quartzo também foram detectados.

Após a calcinação, os picos de caulinita desapareceram, o que pode ser atribuído à desidroxilação e desestruturação da estrutura cristalina da caulinita a altas temperaturas, conforme observado em estudos anteriores (Azeredo et al., 2015). Vale salientar que, como os picos de muscovita apresentaram redução de tamanho, também pode ter ocorrido desidroxilação parcial da mesma. Esses fenômenos provocam a desordem estrutural e aumentam a amorficidade. Esta facilita a difusão de reagentes e produtos no material, potencialmente acelerando suas reações químicas e favorecendo a reatividade pozolânica (SRMP, 1990). Com isso, foi observado um halo amorfo acentuado entre 15 e 35° (2 θ), sugerindo um aumento na reatividade.

Figura 6 – Difratomogramas do Recau_IN e do Cincau.



Fonte: Autor (2025).

5.4 CARACTERIZAÇÃO POZOLÂNICA

5.4.1 Ensaios indiretos de avaliação da pozolanicidade

A Tabela 5 e

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 exibem os resultados de resistência à compressão para os dois ensaios de avaliação da pozolanicidade padronizados neste estudo: Atividade pozolânica com cal aos 7 dias e o Índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias.

Tabela 5 – Resultado de resistência à compressão da NBR 5751.

Amostra	Recau in natura (MPa)	Cincau (MPa)
CP1	0.528	8.454
CP2	0.478	8.689
CP3	0.572	8.959
Média	0.526	8.701
DR1	0.38%	2.84%
DR2	9.13%	0.13%
DR3	8.75%	2.97%
Desvio Relativo Máximo	9.13%	2.97%
Desvio Padrão	0.047	0.253
Coefficiente de variação	0.089	0.029
Intervalo de confiança	0.117	0.628

Fonte: Autor (2025).

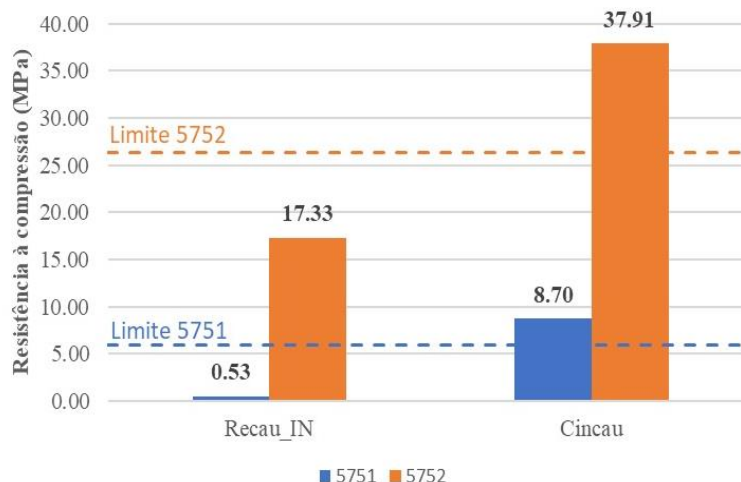
Tabela 6 – Resultados de resistência à compressão da NBR 5752.

Recau_IN	REF (MPa)	Recau in natura (MPa)	Cincau (MPa)
CP1	28.944	17.533	37.647
CP3	29.423	16.003	36.908
CP4	29.527	17.811	38.140
CP5	29.202	17.970	38.958
Média	29.274	17.329	37.913
DR1	1.13%	1.18%	0.70%
DR2	0.51%	7.65%	2.65%
DR3	0.86%	2.78%	0.60%
DR4	0.25%	3.70%	2.76%
Desvio Relativo Máximo	1.13%	7.65%	2.76%
Desvio Padrão	0.258	0.902	0.861
Coefficiente de variação	0.009	0.052	0.023
Intervalo de confiança	0.642	2.242	2.139

Fonte: Autor (2025).

Na Figura 7 também são mostrados os requisitos mínimos conforme a NBR 5751 (atingir pelo menos 6 MPa de resistência à compressão) e a NBR 5752 (alcançar no mínimo 90% da resistência de referência, que foi de 38,63 MPa, ou seja, 34,76 MPa).

Figura 7 – Resistência à compressão para misturas com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias.



Fonte: Autor (2025).

Foi observado que a amostra de Recau_IN tem reatividade muito baixa, pois não atingiu o requisito mínimo de nenhum dos ensaios de resistência à compressão. Por outro lado, o Cincau demonstrou um bom potencial pozolânico, superando os limites mínimos exigidos pelas normas NBR 5751 e NBR 5752 em 45% e 9.06%, respectivamente. Assim, enquanto a amostra bruta não é indicada para uso como adição de cimento, o material beneficiado pode ser utilizado como material pozolânico.

Ao analisar os resultados, percebe-se que a calcinação foi eficaz para potencializar a atividade pozolânica do material, pois a mesma apresentou resistência mecânica muito superior à amostra de Recau_IN para ambos os ensaios de avaliação da pozolanicidade. O papel positivo da calcinação está exatamente no fato de que ela provoca a remoção completa da água quimicamente ligada, resultando na perda de hidroxilas e na formação de uma estrutura amorfa colapsada e desarranjada, o que aumenta a reatividade do material calcinado (Mohammed, 2017).

Ademais, segundo estudiosos, quanto mais finamente moído o material com potencial pozolânico, maior tende a ser a sua reatividade (Neville e Cremonini, 2016). O material já se encontrava em uma granulometria muito baixa (passante na peneira de 200#) antes da

calcinação, e após a calcinação obteve uma granulometria ainda mais fina. Isso contribuiu para que resíduo beneficiado reagisse quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente.

Embora essas considerações se apliquem a ambos os ensaios de resistência, é importante destacar que, nas argamassas com hidróxido de cálcio, a resistência vem principalmente da reação pozolânica, enquanto nas argamassas com cimento, também há o efeito fíler. Isso ocorre porque o hidróxido de cálcio é o componente mais fino nessas misturas, enquanto nas misturas conforme a NBR 5752, o Cincau se torna o material mais fino, promovendo o preenchimento de vazios e a nucleação heterogênea (Snellings e Scrivener, 2015). Fatos que também contribuem para o aumento da resistência, justificando o valor de 29,52% mais alto do que o requisito mínimo.

Por fim, é importante discutir que a amostra in natura apresentou valores de resistência muito baixos em ambos os testes. Esse resultado era esperado devido ao elevado teor de matéria orgânica presente na amostra, o que, conforme relatado na literatura, interfere nas reações de hidratação. A matéria orgânica pode ser adsorvida tanto na superfície dos grãos de cimento não hidratados quanto nos produtos de hidratação, formando uma camada protetora temporária que retarda o processo de hidratação (Goyal et al., 2019).

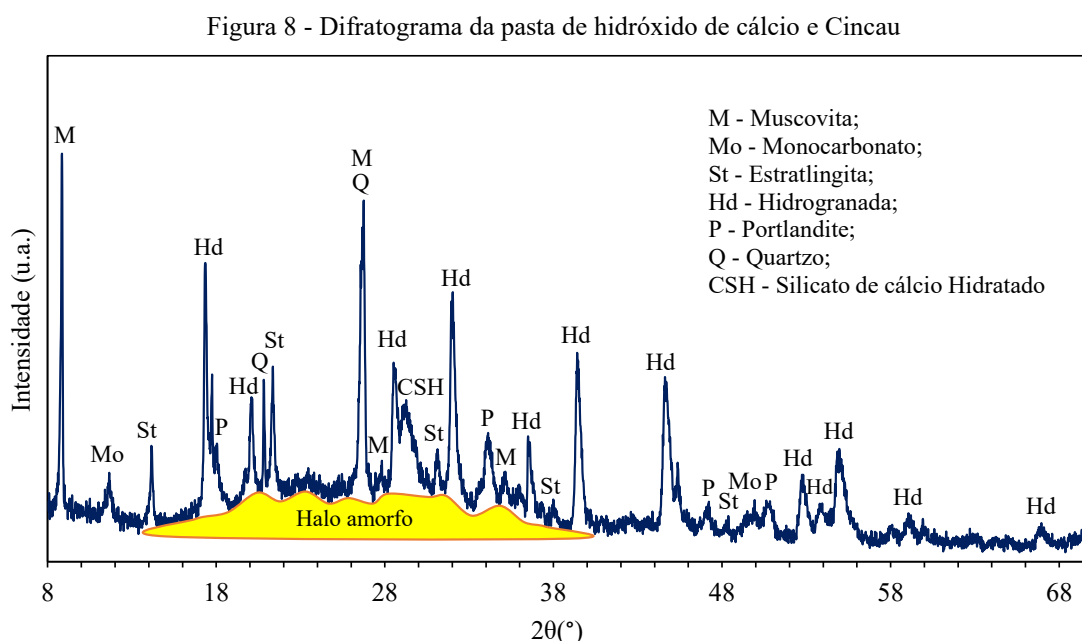
5.4.2 Testes indiretos de pozolanicidade em pastas de hidróxido de cálcio

Com o intuito de validar a reatividade da cinza do resíduo de caulim (Cincau) resultante do beneficiamento deste estudo e comprovar que os resultados mecânicos são coerentes, foi realizada a investigação da redução do teor de hidróxido de cálcio, oriunda da reação pozolânica, por ensaios microestruturais de pastas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e Cincau. Tanto a difração de raios-X (DRX) quanto a análise termogravimétrica (ATG) foram investigadas.

5.4.2.1 Difração de raios-X (DRX)

A Figura 8 apresenta o difratograma da pasta de hidróxido de cálcio e cinza de resíduo de caulim. O difratograma da pasta produzida pela mistura de hidróxido de cálcio e cinza de resíduo de caulim evidência tanto fases remanescentes dos materiais anidros quanto produtos típicos da reação pozolânica. Entre as fases herdadas, destacam-se o quartzo (Q) e a muscovita (M), minerais não reativos presentes na cinza de caulim, e a portlandita (P), proveniente do hidróxido de cálcio adicionado. Os principais produtos de hidratação identificados incluem:

hidrogranada (Hd), fase cristalina do grupo das garnetas de cálcio e alumínio formada em meios ricos em Ca(OH)_2 e alumina; silicato de cálcio hidratado (CSH), responsável pela maior parte do ganho de resistência mecânica, formado pela reação entre sílica reativa e cálcio; e estratlingita (St), hidrato cristalino estável típico de sistemas ricos em alumina, resultante da reação entre aluminatos e silicatos em presença de cálcio. Esses resultados são condizentes com os de outros estudos da literatura (Ibrahim et al., 2017; Weise et al., 2024).



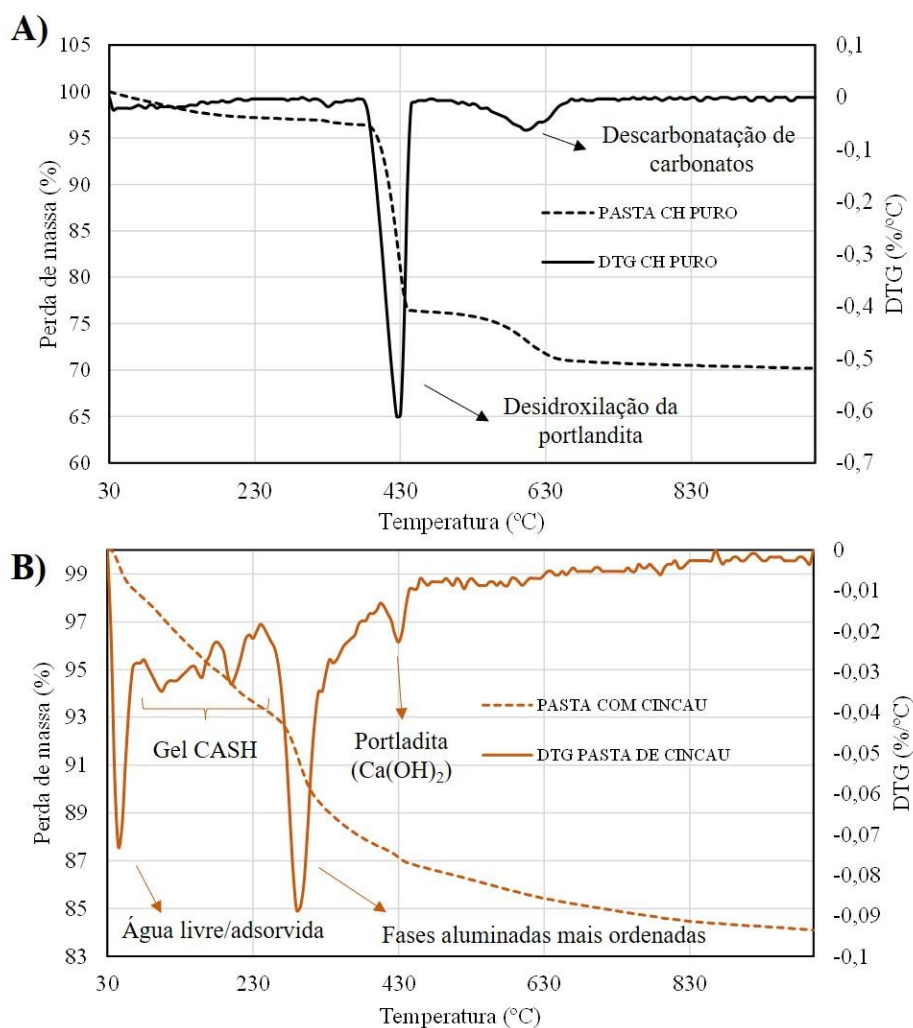
A presença dessas fases é coerente com o comportamento esperado para pozolanas caulínicas calcinadas ou ricas em minerais argilosos, nas quais a sílica e a alumina amorfas liberadas pela calcinação reagem rapidamente com a portlandita, gerando CSH como produto principal e, em condições favoráveis de relação Si/Al e disponibilidade de cálcio, formando também estratlingita e hidrogranada. O halo amorfo entre 20° e 35° (2θ) confirma a existência de fases mal cristalinas, principalmente géis de CSH, característica marcante de produtos de reação pozolânica (Lothenbach et al., 2011; Ribeiro et al., 2021).

Assim, mesmo pela simples indexação qualitativa das fases cristalinas, já é possível inferir que a cinza de resíduo de caulim reagiu com o hidróxido de cálcio, uma vez que foram identificados diversos produtos típicos da reação pozolânica. No entanto, para confirmar e quantificar essa interação, será necessário avaliar a evolução das fases pela análise termogravimétrica (TG), que permitirá estimar de forma mais precisa o consumo de portlandita e a formação dos produtos de hidratação.

5.4.2.2 Análise termogravimetria (ATG)

A fim de confirmar quantitativamente a reatividade da cinza do resíduo de caulim resultante do beneficiamento deste estudo, foi realizada a investigação da redução do teor de hidróxido de cálcio, oriunda da reação pozolânica, da pasta com esse material por análise termogravimétrica. A Figura 9 traz as curvas de termogravimetria, tanto de perda de massa como a curva de termogravimetria derivada, para a pasta de referência, unicamente com hidróxido de cálcio, e para a pasta de hidróxido de cálcio e o Cincau. O pico de desidratação do Ca(OH)_2 utilizado neste estudo foi identificado na faixa de 380 a 450°C, conforme apresentado na Figura 9 (A).

Figura 9 – Curvas de perda de massa e de termogravimetria derivada (DTG) para pasta de referência de hidróxido de cálcio (A) e para pasta de Ca(OH)_2 e cincau (B)



Na pasta de referência (Ca(OH)_2 puro), observa-se um evento térmico dominante entre 380-450 °C, correspondente à desidroxilação da portlandita ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$), seguido

de um evento discreto entre 600-800 °C atribuível à descarbonatação de carbonatos formados por leve carbonatação que pode acontecer mesmo com todos os cuidados tomados no período de cura das pastas.

Já na pasta de Ca(OH)_2 e cincau [Figura 9 (B)], há perdas iniciais entre 0-120 °C, referente a água livre e/ou adsorvida (Azizi et al., 2024). Entre 120-200 °C observa-se um evento amplo associado à remoção de água de gel C-S-H ou C-(A)-S-H (com a presença de alumínio na composição), que é menos cristalino, que é um evento amplo e pouco definido na curva de DTG (Wang et al., 2023). Já entre 200-300 °C surgem picos mais definidos atribuídos à desidroxilação de fases aluminadas mais ordenadas, como a strätlingite (C_2ASH_8) e a hidrogranada (C_3AH_6), o que é consistente com a formação de produtos de reação pozolânica em sistemas de cal e metacaulins típicos (Lothenbach et al., 2011; Ribeiro et al., 2021). Então, confirmamos com a coerência com os resultados obtidos pela difração de raios-X já apresentados no presente estudo.

Para a quantificação da portlandita restante, utilizou-se da estequiometria da reação de desidratação a partir da perda de massa em 380–450 °C. A Tabela 7 traz os dados referentes ao ensaio de termogravimetria.

Tabela 7 - Perda de massa obtida no ensaio de termogravimetria e dados obtidos por estequiometria.

Dados obtidos da Análise Termogravimétrica	
Massa utilizada no ensaio (mg)	11,5
Perda de massa entre 380 e 450 (%)	1,12
H ₂ O medido (mg)	2,3
Ca(OH) ₂ medido (mg)	0,53
Ca(OH) ₂ consumido (%)	83,2

Fonte: Autor (2025).

Foi possível ver que a perda de massa de água no estágio correspondente à desidroxilação do hidróxido de cálcio foi de 2,3 mg, o que é estequiometricamente equivalente a um teor de 0,53 mg de Ca(OH)_2 remanescentes na amostra. Sabendo que antes da reação pozolânica existia uma massa de 3,16 mg de hidróxido de cálcio, isso mostra que houve um consumo de 83,2% do mesmo.

Dessa forma, o ensaio de TGA confirma uma elevada reatividade pozolânica para esse resíduo beneficiado. Esse resultado demonstra que esse método direto de avaliação da pozolanicidade tem uma maior sensibilidade para evidenciar a reatividade do Cincau do que os

resultados mecânicos de compressão. Isso era esperado porque a TGA quantifica diretamente o consumo de portlandita — um indicador direto da reação pozolânica — ao passo que os ensaios de resistência à compressão refletem o desempenho macroestrutural do compósito, influenciado por porosidade, empacotamento de partículas, relação a/agl, adensamento e qualidade da zona de transição interfacial (Ribeiro et al., 2021; Scrivener et al., 2016).

Contudo, os ensaios normatizados de compressão (com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias) já indicavam reatividade satisfatória; DRX e TGA apenas a evidenciaram com maior sensibilidade, por quantificarem diretamente o consumo de portlandita e, assim, isolarem o sinal químico da reação, sem a influência de fatores microestruturais que modulam a resistência. São métodos complementares: DRX/TGA qualificam e quantificam a reatividade química intrínseca do material, enquanto os ensaios mecânicos traduzem como essa reatividade se converte em desempenho estrutural na matriz formulada.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu avaliar de forma abrangente o potencial de utilização do resíduo de caulim proveniente do beneficiamento mineral como material cimentício suplementar, com base em caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e ensaios padronizados de atividade pozolânica.

Os resultados evidenciaram que o resíduo de caulim in natura apresentou baixa reatividade pozolânica, não atingindo os requisitos mínimos estabelecidos pelas normas NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014), o que inviabilizou seu uso direto como material cimentício suplementar. Tal comportamento pode ser atribuído, entre outros fatores, à presença significativa de matéria orgânica e à estrutura cristalina ordenada da caulinita, que limita a interação com o hidróxido de cálcio.

Por outro lado, a calcinação a 600 °C por três horas promoveu transformações estruturais significativas, como a desidroxilação e a consequente amorfização da caulinita, convertendo-a em metacaulinita. Essa alteração, associada à maior finura do material após o tratamento térmico, resultou em um expressivo aumento da reatividade, com desempenho mecânico superior aos limites normativos: 45% acima do mínimo exigido pela NBR 5751 e 9,06% acima do estabelecido pela NBR 5752.

Com base nos resultados microestruturais, concluiu-se que a combinação de DRX e TGA forneceu evidências claras e complementares da elevada reatividade pozolânica da cinza de resíduo de caulim beneficiada. A análise qualitativa por DRX revelou a presença de múltiplos produtos típicos da reação entre a portlandita e as fases reativas da cinza, como CSH, estratlingita e hidrogranada, confirmando a ocorrência do processo pozolânico. Já a quantificação pela TGA demonstrou um consumo expressivo de 83,2% da portlandita inicialmente presente, valor que atesta a intensidade da reação.

Esses achados reforçam que o material possui potencial significativo como adição pozolânica, validando os resultados mecânicos prévios e evidenciando que a abordagem microestrutural é capaz de captar de forma mais direta e sensível o grau de reatividade química intrínseca da pozolana.

Dessa forma, conclui-se que a calcinação é fundamental para tornar o resíduo de caulim tecnicamente viável como adição mineral reativa. Essa transformação agrega benefícios técnicos, econômicos e ambientais, ao mesmo tempo em que contribui para a redução de impactos ambientais e da pegada de carbono, alinhando-se à economia circular. Embora o resíduo in natura não apresente viabilidade, sua forma calcinada mostra-se promissora, e

estudos futuros devem avaliar diferentes condições de calcinação e aplicações em concretos e argamassas, inclusive em escala de campo, para aprofundar o conhecimento sobre seu desempenho a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABNT, NBR 12653. Materiais pozolânicos - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 5, 2014a.

ABNT, NBR 5751. **Pozzolan materials — Determination of pozzolanic activity with lime after seven days Pozzolan**. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards. , 2015

ABNT, NBR 5752. **Pozzolan materials — Determination of the performance index with Portland cement at 28 days Pozzolan**. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards. , 2014b

ABNT NBR 7214. Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2015. , p. 4.

ABNT, NBR 16605. **Cimento portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. [s. l.], p. 4, 2017.

AGRA, Tiago Manoel da Silva. **Avaliação da pozolanicidade da cinza de lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA)**. 2022. 82 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2022.

AGRA, T M S et al. Characterizing and Processing a Kaolinite-Rich Water Treatment Sludge for Use as High-Reactivity Pozzolan in Cement Manufacturing. **Applied Clay Science**, Times Cited in Web of Science Core Collection: 6Total Times Cited: 6Cited Reference Count: 50, v. 236, 2023.

AZIZI, K. et al. Thermal Transformation of Kaolinite Clays: Analyzing Dehydroxylation and Amorphization for Improved Pozzolan Performance. **International journal of chemical and biochemical science**, v. 25, n. 19, 22 jul. 2024. Disponível em: <<https://scispace.com/papers/thermal-transformation-of-kaolinite-clays-analyzing-2tvhzp7hwoy2>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

BASTO, Priscilla Elisa de Azevedo. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland**. [s. l.], p. 1–100, 2018. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/handle/123456789/29683>.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção**. Volume 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BRITO, Bruna Luiza Ferreira; DWECK, Jo. Reuse of kaolinitic waste as a precursor of pozzolan material. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 11, p. 6087–6097, 1 jun. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-021-10957-2>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

DE ALMEIDA, K. M. **Estudo de beneficiamento do caulim do Seridó com a utilização de hidrociclone**. Relatório PIBITI. Espírito Santo, IFES, 2018.

DE AZEREDO, Aline F.Nóbrega; STRUBLE, Leslie J.; CARNEIRO, Arnaldo M.P.

Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 7, p. 2123–2132, 18 jul. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0297-4>>. Acesso em: 3 jun. 2024.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de Diferentes Metodologias para a Avaliação de Atividade Pozolânica**. 1999. 118 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 1999.

GONZAGA, Nathália Lins. **Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação da pozolacidade de materiais cimentícios suplementares com base na nbr 5751**. 2022. 104 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2022.

FERNANDES, Igor V. et al. Valorization of textile sludge for use as supplementary cementitious material – Benefiting processes, pozzolanic activity, and application in no-slump concrete. **Construction and Building Materials**, v. 458, p. 139619, 10 jan. 2025. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061824047615>>. Acesso em: 25 dez. 2024.

FERREIRA DO NASCIMENTO, Raquel et al. ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CAULIM EM ARGAMASSA ALTERNATIVA. **Congresso Sul-Americano de Resíduos sólidos e Sustentabilidade**, v. 2, p. 6, 2019.

GONZAGA, Nathália Lins. **DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO ACELERADO PARA AVALIAÇÃO DA POZOLICIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES COM BASE NA NBR 5751**. 2022. 104 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2022.

GOYAL, S *et al.* Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, Thapar Inst Engn & Technol, Dept Civil Engn, Patiala, Punjab, India NR - 32 PU - ELSEVIER SCI LTD PI - OXFORD PA - THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 214, p. 169–177, 2019.

IBRAHIM, Suzan S. et al. Metakaolin as an Active Pozzolan for Cement That Improves Its Properties and Reduces Its Pollution Hazard. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 6, n. 1, p. 86–104, 25 dez. 2017. Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=82101>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

KASANIYA, M.; THOMAS, M.; MOFFATT, E. G. Development of a rapid and reliable Pozzolan reactivity test method. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 116, n. 4, p. 145–154, 2019.

LIMA, Jefferson Maia. **Estudo de aproveitamento do resíduo do beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de pozolanas para cimentos compostos e pozolânicos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

LOTHENBACH, B; SCRIVENER, K. L., HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>>.

MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. **Pozolanas de elevada**

reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. Ambiente Construído, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 19–29, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials.** 4ª edição ed. [S.l.]: MC Graw Hill Education, 2014.

MELO, João Carlos de; DALL'AGNOL, Renato. **Geologia e Recursos Minerais do Brasil.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2015. 704 p. ISBN: 978-85-7592-222-1.

MENEZES, Romualdo R. et al. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 795–801, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/YQHvLqQF6p4DH66R7YDgVtf/?lang=pt>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MOHAMMED, Siline. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 140, p. 10–19, 2017.

MORAES, M. C. **Adsorção de cromato em materiais sintetizados a partir de rejeito de caulim do rio Capim.** 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

NEVILLE, A. M.; CREMONINI, R. **Propriedades do Concreto.** 5ª edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PRASHAR, Rahul. A comprehensive review of the formation, properties, and applications of limestone calcined clay cement (LC3). **IJFMR - International Journal For Multidisciplinary Research**, v. 6, n. 6, 16 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.ijfmr.com/research-paper.php?id=30804>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

PRIVITERA, A. D. **Exploração mineral no Seridó Paraibano: a desigualdade e as relações de trabalho por trás da exploração do Caulim em Junco do Seridó (PB).** 2017. 71 f. TCC (Graduação) -Curso de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

REZENDE, M. L. S. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade, Campina Grande-PB,** 2013. Tese de doutorado. UFCG.

RIBEIRO, D. V.; SANTOS, B. S.; DIAS, C. M. R.; SANTANA, H. A.; AMARAL, I. B. C.; NETO, J. S. A.; CILLA, M. S.; JÚNIOR, N. S. A.; LIMA, P. R. L.; PINTO, S. A.; SIQUEIRA, T. P. L.; SANTOS, T. A. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos.** 1. ed. Curitiba: Appris, 2021.

RODRIGUES, E. C. **Produção de material zeolítico a partir de caulim da Amazônia em escala semi piloto: aplicação na adsorção de cobre.** 2019. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

ROJAS, Moisés Frías et al. Future Eco-Efficient Cements Prepared With Kaolinite-Based Industrial Wastes. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials: Volume 1-5**, v. 1–5, p. 398–404, 1 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128035818114365?via%3Dihub>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

_____. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49–56, 1 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617302454>>. Acesso em: 13 ago. 2025.

SOUSA, A.P.F., SILVA, V.F., LIMA, R.R. **O Extensionismo Mineral no Aproveitamento do Caulim no Equador (RN) e o Caminho da Sustentabilidade**. Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea. XI, 2023. Belo Horizonte. Mineração e Sustentabilidade (Biodiversidade e Comunidades) – IBRAM.

SOUZA, Thyago Lima et al. Study of the use of kaolin waste as a partial substitute for fine aggregate in the production of concrete for pavers. **South Florida Journal of Development**, v. 2, n. 2, p. 2474–2489, 26 maio 2021.

SRMP, Yveslimoge. **Diffusion in Amorphous Materials**. Diffusion in Materials, p. 601–624, 1990. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-1976-1_31>. Acesso em: 3 jun. 2024.

U.S. Geological Survey [USGS]. **Mineral Commodity Summaries 2023: Kaolin**. [Online]. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/clays-statistics-and-information>. Acesso em: 3 jun. 2024.

TORRES, S. M.; LIMA, V. M. E.; BASTO, P. E. A.; JÚNIOR, N. T. A.; NETO, A. A. M. Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120684, 2020.

TORRES, Sara Martins. **Aplicação da difração de raios X na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para adição ao cimento Portland**. 2019. 102 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

WANG, Hui et al. A dehydration kinetic model of calcium silicate hydrates at high temperature. **Structural Concrete**, v. 24, n. 2, p. 1997–2008, 1 abr. 2023. Disponível em: <[doi/10.1002/suco.202200038](https://doi.org/10.1002/suco.202200038)>. Acesso em: 16 ago. 2025.

WEISE, Kira et al. Pozzolanic Metakaolin Reactivity: Time-Dependent Influence of Calcium Hydroxide, Alkali Hydroxides, and Sulfates. 2024. Disponível em: <<https://papers.ssrn.com/abstract=4693425>>. Acesso em: 15 ago. 2025.