



SÍNTESE DE MATERIAIS ATIVADOS EM MEIO ALCALINO PARA DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA VERSÁTIL

Ana Gabriela Fernandes Pereira, Daniela da Silva dos Reis, Luan Bruno Mafra Dias

(gabifernandesfp@hotmail.com, luanmafra21@gmail.com, danyshadowoat@hotmail.com)

Professor orientador: Denílson de Jesus Assis

Coordenação de curso de Engenharia Química

Resumo

O cimento Portland desempenha um papel crucial na construção civil, sendo essencial na formação de concreto utilizado em diversas aplicações construtivas. Contudo, sua produção gera desafios ambientais, como emissões de CO₂ e consumo significativo de energia. Este estudo aborda a busca por soluções sustentáveis na indústria da construção, destacando inovações como cimentos geopoliméricos e de baixo carbono, além da incorporação de materiais reciclados. Os geopolímeros, resultantes de ativação alcalina, surgem como alternativa mais sustentável, reduzindo consideravelmente as emissões de dióxido de carbono na produção de materiais de construção. Este trabalho propõe uma abordagem inovadora ao desenvolver uma argamassa versátil, utilizando matérias-primas alternativas como escória de alto forno, argila industrial e caulim. A síntese de materiais ativados em meio alcalino busca não apenas uma nova abordagem para a construção civil, mas também promove uma mudança estrutural em práticas construtivas, visando a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável e social. As matérias-primas aluminossilicatos possuem propriedades que favorecem a ativação alcalina, conferindo à argamassa características favoráveis para diversas aplicações. A ativação dos materiais ocorreu mediante o uso de uma solução de hidróxido de sódio com uma concentração de 10 mol/L, associada ao silicato de sódio alcalino comercial e sílica ativa. A pesquisa em formulações de argamassas ativadas alcalinamente destaca as corridas G12 e G30 como promissoras para futuras aplicações. A G12 se destaca pela resistência à compressão e absorção de água, sendo uma candidata sólida para formulações geopoliméricas futuras. Essa abordagem não se limita apenas a oferecer uma solução para a gestão de rejeitos, mas também contribui significativamente para a redução da emissão de carbono associada à produção de materiais de construção convencionais.

Palavras-chave: Ativação alcalina. Geopolímero. Construção civil. Argamassa.

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é crucial na construção civil por ser o principal componente do concreto, desempenhando papel fundamental na formação da estrutura e resistência do material. Sua importância decorre da capacidade de unir agregados, como areia e brita, por meio de reações químicas que resultam em um material durável e resistente, amplamente utilizado em diversas aplicações, desde fundações até estruturas de edifícios. Milhões de toneladas de cimento Portland são produzidas anualmente, atendendo à demanda global por materiais de construção. Segundo o SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), em 2022, foram produzidas 63,5 milhões de toneladas de cimento e consumidas 62,8 milhões de toneladas no

Brasil. Isso se deve ao crescimento rápido de áreas urbanas, especialmente em países em desenvolvimento, impulsionando a demanda por cimento para novas construções e infraestrutura.

Embora sua produção seja essencial, surgem alguns desafios e impactos negativos, como, por exemplo, a emissão de CO₂, sendo responsável por 8% das emissões globais; o consumo considerável de energia durante a sua produção; impactos ambientais locais devido à extração de matérias-primas; e resíduos gerados, que se tornam subprodutos e possível esgotamento de recursos naturais. (BBC NEWS BRASIL, 2018). A produção do clínquer na fabricação do cimento Portland envolve a calcinação da rocha calcária, sendo esse processo responsável por consideráveis emissões de dióxido de carbono (COSTA, 2020).

Na busca por soluções sustentáveis, a indústria da construção civil tem explorado alternativas para reduzir o consumo do cimento Portland, conhecido por seus impactos ambientais significativos. Tecnologias inovadoras, como o desenvolvimento de cimentos geopoliméricos e cimentos de baixo carbono, têm ganhado destaque. Além disso, a incorporação de materiais reciclados, como cinzas volantes e escória de alto-forno, tem sido uma prática adotada para minimizar a dependência de recursos naturais.

Os geopolímeros, resultados de uma ativação alcalina, envolvendo a reação química entre materiais alcalinos e silicoaluminosos, representam uma opção mais sustentável, capaz de reduzir significativamente a emissão de carbono na produção de materiais de construção. A aplicação prática desses geopolímeros na construção civil promete revolucionar práticas tradicionais, oferecendo uma solução ambientalmente responsável para o resíduo da mineração de ferro, além de possibilitar estruturas mais resilientes e eficientes (BORGES *et al.*, 2014).

Este trabalho visa, não apenas delinear uma nova abordagem para a síntese de materiais na construção civil, mas também fornecer alternativas para uma mudança estrutural na forma como encaramos e implementamos nossas práticas construtivas, com olhos voltados para a preservação do meio ambiente, o desenvolvimento sustentável e social. Assim, o objetivo foi desenvolver uma argamassa versátil, empregando matérias-primas alternativas, tais como escória de alto forno, resultante do processo de fusão ou refino de metais, especialmente durante a produção de ferro e aço, argila industrial e caulim, para sintetizar materiais ativados em meio alcalino.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

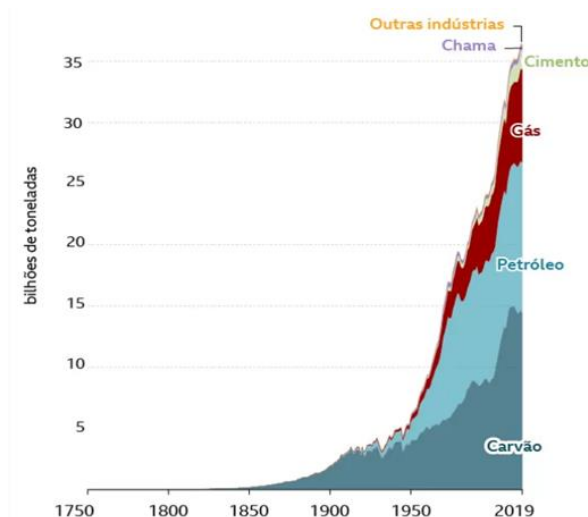
2.1. Construção civil e sustentabilidade

A construção civil, como alicerce do desenvolvimento urbano, confronta desafios significativos no século XXI, com a sustentabilidade e eficiência energética emergindo como pilares fundamentais dessas preocupações (RÖDEL, 2005). A crescente conscientização global sobre as implicações ambientais da construção civil impulsiona a necessidade de repensar métodos e materiais utilizados no processo construtivo.

A abordagem inovadora da construção civil sustentável se fundamenta na minimização do consumo de recursos, na redução de resíduos e na promoção da eficiência energética ao longo do ciclo de vida das edificações. Princípios como a redução da emissão de carbono, o uso responsável de recursos naturais e a consideração do bem-estar humano permeiam esse paradigma fundamental na contemporaneidade. (SEBRAE, 2022).

A crescente consciência das emissões globais de CO₂, especialmente no setor da construção civil, destaca a urgência de medidas específicas. De acordo com o SEBRAE (2022), a construção civil contribui significativamente para as emissões globais de dióxido de carbono, principalmente devido ao uso intensivo de materiais convencionais e métodos tradicionais. A Figura 1 apresenta dados sobre as emissões de CO₂ durante a fabricação de cimento no Brasil e em outros países.

Figura 1. Emissões CO₂ em toneladas.



Fonte: BBC (2021)

A escolha de materiais sustentáveis emerge como um fator determinante na redução do impacto ambiental da construção. Materiais reciclados, madeira certificada, concretos de baixo teor de carbono e produtos de origem local figuram como opções sustentáveis que contribuem significativamente para a diminuição da intensidade de carbono na construção (SEBRAE, 2022).

2.2. Materiais cimentícios

Os materiais cimentícios constituem um pilar fundamental na compreensão dos avanços tecnológicos e das práticas sustentáveis na construção civil. Este tópico abrange uma série de materiais utilizados na indústria da construção, explorando suas propriedades, aplicações e o impacto ambiental associado.

2.2.1. Cimento Portland

Ao longo do século XIX, o avanço acelerado da industrialização trouxe consigo uma crescente conscientização sobre os desafios ambientais inerentes a esse processo. A partir da década de 1970, destacou-se a percepção do agravamento dos danos provocados pela produção industrial, incluindo a emissão de gases poluentes e a acumulação de resíduos, conforme analisado por estudiosos como Maury e Blumenschein (2012). Este cenário atingiu um ponto crítico na construção civil, onde o concreto emergiu como o material predominante globalmente, desempenhando um papel significativo nos dilemas ambientais em escala planetária.

Nesse contexto, o cimento Portland ganhou proeminência, como enfatizado por especialistas como Martins e Medeiros (2018). Sendo o principal aglomerante utilizado na produção de compósitos cimentícios em escala global, o cimento Portland ocupou uma posição central na construção. O cimento Portland é um material hidráulico que, ao entrar em contato com a água, endurece e desenvolve resistência mecânica ao longo do tempo. Sua composição principal inclui clínquer, resultante da calcinação de calcário e argila a altas temperaturas, conforme Tabela 3.

Contudo, a urgência em conciliar as demandas ambientais, econômicas e sociais impulsionou a busca por alternativas ao uso convencional do cimento Portland. No âmbito normativo brasileiro, a ABNT NBR 12653 e a ABNT NBR 7211 surgem como referências cruciais. A primeira estabelece diretrizes para a avaliação do impacto ambiental de atividades industriais, enquanto a segunda regulamenta as características exigíveis na recepção e produção de agregados para a construção civil. Ambas as normativas proporcionam um arcabouço regulatório direcionado não apenas ao uso sustentável de materiais, mas também à implementação de práticas voltadas à preservação ambiental.

A seguir, na Tabela 1 apresentamos algumas características físicas e químicas do cimento Portland, considerando as normas da ABNT:

Tabela 1: Características físicas e químicas do cimento Portland

Característica	Descrição
Composição	Clínquer, calcário, argila e outros componentes.
Finura	Tamanho médio das partículas, geralmente expresso como a porcentagem que passa através de uma peneira padrão.
Resistência à Compressão	Capacidade de suportar cargas compressivas, medida em megapascal (MPa).
Tempo de Pega	Intervalo de tempo entre a adição da água e o início do endurecimento.
Retração	Contração volumétrica durante o processo de endurecimento.
Cor	Variações de cor de acordo com a composição e processo de fabricação.
Calor de Hidratação	Liberação de calor durante a reação de hidratação do cimento com água.
Estabilidade	Resistência à segregação e sedimentação durante o manuseio e mistura.

Fonte: Elaborado pelos autores

Diante desse cenário desafiador, a abordagem sustentável emerge como crucial. A busca por alternativas ao cimento Portland não é apenas uma resposta às demandas ambientais emergentes, mas uma jornada em direção a uma construção civil mais resiliente e comprometida com a preservação ambiental. Já na tabela 2, citaremos as propriedades gerais do Cimento Portland:

Tabela 2: Propriedades do Cimento Portland

Propriedade	Detalhes
Impacto Ambiental	A produção de cimento Portland tem um impacto ambiental significativo devido às emissões de dióxido de carbono durante a produção do clínquer. Estratégias sustentáveis, como a utilização de materiais alternativos, têm sido implementadas para minimizar esse impacto.
Custo	O cimento Portland é amplamente utilizado devido à sua disponibilidade e custo relativamente baixo. No entanto, os custos ambientais associados à sua produção estão levando a um aumento do interesse em cimentos alternativos e práticas mais sustentáveis.
Resistência Mecânica	Quanto à resistência mecânica, o cimento Portland é conhecido por sua excelente capacidade nesse aspecto, tornando-o um material preferido em muitas aplicações estruturais.
Durabilidade	Além disso, concretos feitos com cimento Portland geralmente exibem boa durabilidade, resistindo eficazmente a condições ambientais adversas.

Fonte: Elaborado pelos autores

Em resumo, o cimento Portland é geralmente visto como uma escolha sólida em muitas situações devido à sua capacidade de se adaptar a diferentes necessidades, apresentar um desempenho confiável e ser mais amigável ao orçamento quando comparado a cimentos mais personalizados. No entanto, em circunstâncias particulares que requerem propriedades especiais, pode ser mais sensato considerar outros tipos de cimento, como o cimento Portland composto. Decidir qual usar deve levar em conta as características únicas do projeto e as condições do ambiente em que o concreto será utilizado.

Tabela 3 Materiais compostos

Produto	Descrição	Benefícios
Clínquer	Resultante da calcinação de calcário e argila a altas temperaturas.	Concede resistência mecânica ao cimento ao longo do tempo.
Calcário	Material carbonático utilizado na produção de clínquer.	Contribui para as propriedades hidráulicas do cimento. Reduz custos de produção. Exemplo: Calcário dolomítico.
Argila	Material silicatado utilizado na produção de clínquer.	Melhora a durabilidade e resistência à corrosão. Exemplo: Argila caulim.
Outros Componentes	Adições específicas conforme o tipo de cimento.	Varia de acordo com adições específicas, proporcionando características distintas. Exemplo: Escória de alto-forno.

Fonte: Elaborado pelos autores

Em síntese, a tabela oferece uma visão detalhada dos ingredientes-chave do cimento Portland, revelando o processo delicado de preparação por meio de moagem e mistura. É como desvendar os segredos de uma receita especializada na construção. Ajustando a quantidade e qualidade desses componentes, obtemos diferentes tipos de cimento Portland, cada um projetado para atender necessidades específicas na construção.

Essa flexibilidade destaca a importância contínua do cimento Portland na indústria da construção. Aprofundar-se nesses componentes fornece uma compreensão mais rica sobre as propriedades do cimento, essencial para seu papel vital na engenharia civil.

2.2.2. Cimento de base alcalina

A evolução da construção civil busca incessantemente soluções inovadoras para equilibrar as demandas estruturais e as responsabilidades ambientais. Nesse contexto, o cimento de base alcalina (CBAI) surge como um protagonista, oferecendo uma resposta promissora para mitigar os impactos da produção convencional de cimento Portland.

Diferentemente do tradicional cimento Portland, o CBAI utiliza álcalis, como o hidróxido de sódio, para ativar materiais pozolânicos, proporcionando produtos com menor pegada de carbono (PALOMO et al., 2014). Essa abordagem inovadora não é apenas uma mudança de ingredientes; é um passo corajoso em direção à sustentabilidade na indústria da construção.

O CBAI é cuidadosamente formulado com materiais como escória de alto forno, metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa (Quadro 1). Cada componente é escolhido não apenas pela sua contribuição para a resistência estrutural, mas também por suas características ecológicas. É uma sinfonia de materiais que redefine o conceito de construção sustentável.

Quadro 1: Composição Percentual do Cimento de Base Alcalina (CBAI)

Componente	Percentual na Composição
Escória de Alto Forno	30%
Metacaulim	20%
Cinzas Volantes	25%
Silica Ativa	15%
Hidróxido de Sódio	10%

Fonte: Adaptado de análises laboratoriais realizadas por centros de pesquisa em materiais cimentícios.

A transição para o CBAI não é apenas uma mudança técnica; é um compromisso com o futuro do nosso planeta. A redução significativa das emissões de carbono (Quadro 2) e o uso eficiente de materiais pozolânicos não apenas atendem às preocupações ambientais urgentes, mas também traçam um caminho sustentável para a construção civil.

Quadro 2: Comparação de Emissões de Carbono - Cimento Portland vs. Cimento de Base Alcalina

Tipo de Cimento	Emissões de Carbono (kg CO2 por tonelada)
Cimento Portland	800 - 1.000
Cimento de Base Alcalina (CBAI)	400 - 600

Fonte: IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

2.2.3. Argamassa

A argamassa, definida pela norma NBR 13281:2005 como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, desempenha um papel crucial na construção civil. Essa composição, composta por cimento, areia e água, não apenas adere elementos estruturais, mas confere solidez e durabilidade às edificações.

A norma NBR 13281 atua como uma diretriz essencial, delineando padrões e garantindo a qualidade na produção e aplicação da argamassa. Seu papel é crucial, assegurando uma mistura balanceada que resulta em propriedades mecânicas adequadas, resistência e durabilidade nas estruturas.

A composição da argamassa, uma sinfonia de cimento, areia e água, é regulamentada pelas normas, garantindo proporções adequadas e eficiência técnica. A dosagem precisa, orientada por parâmetros normativos, é a chave para a obtenção de resultados satisfatórios.

Diferentes tipos de argamassa, como a de assentamento, revestimento e regularização, são abordados pelas normativas, cada um desempenhando um papel específico em projetos de construção. Essa diversidade permite a adaptação da argamassa às exigências específicas de cada aplicação.

Em consonância com as demandas contemporâneas de sustentabilidade, as normas orientam o uso de aditivos inteligentes e práticas eficientes na aplicação de argamassa. Essa abordagem não apenas atende a requisitos técnicos, mas também promove a responsabilidade ambiental na construção civil. Michelle Daiany da Conceição Trajano (2016) destaca a aplicabilidade, habitabilidade e sustentabilidade da alvenaria com bloco de concreto aparente em instituições de ensino.

Em síntese, a argamassa, regulamentada por normas como a NBR 13281, é mais do que

uma mistura; é um elemento estrutural e normativo na construção civil. Compreender e aplicar essas normas é essencial para garantir a consistência, durabilidade e eficiência das estruturas construídas, representando um compromisso com a qualidade técnica e responsabilidade ambiental. Carina Mariane Stolz (2011) destaca a influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento.

2.3. Ativação alcalina

A ativação alcalina fundamenta-se na capacidade de ativadores alcalinos, como hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), desencadear reações químicas complexas em materiais pozolânicos. Para que ocorra a ativação é necessário material sólido rico em sílica e alumina, denominados silicoaluminosos, em conjunto com uma solução com média ou alta alcalinidade, sendo que essa última depende da composição química do mineral pulverulento.

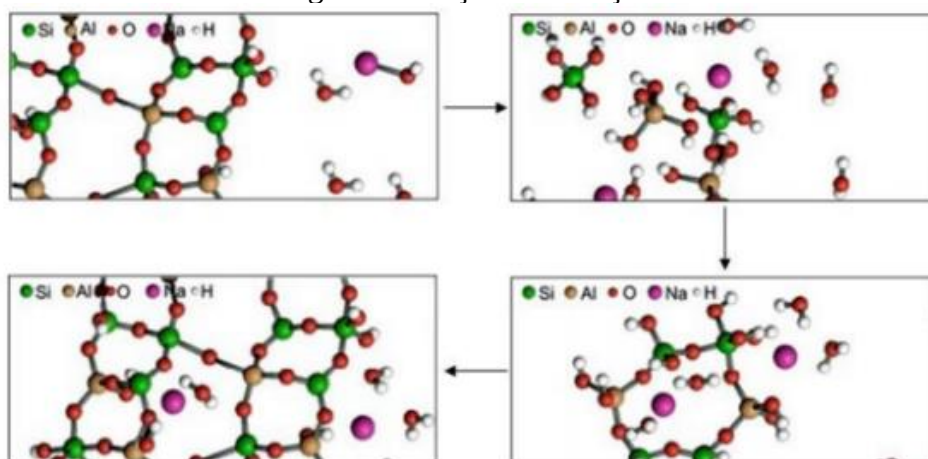
A ativação alcalina é um processo químico que transforma materiais aluminossilicatos em materiais cimentícios (PROVIS et al., 2010). A reação entre o precursor aluminossilicato e a solução alcalina resulta na formação de um produto sólido e resistente à água, semelhante às zeólitas naturais (ROY, 1999). O teor de alumínio e a reatividade das matérias-primas influenciam diretamente na velocidade das reações, na estrutura e nas propriedades finais obtidas (GHARZOUNI et al., 2016).

Materiais contendo teores elevados de cálcio e silício, superiores a 70%, como nas escórias de alto-forno, podem passar por um fenômeno semelhante ao processo de hidratação do cimento Portland, resultando na ativação alcalina. Por outro lado, em materiais com altos teores de silício e alumínio e baixo ou nenhum teor de cálcio, como é o caso do metacaulim, a formação de geopolímeros pode ocorrer (Figura 2).

Para otimizar os resultados, é essencial que os aluminossilicatos passem por um tratamento térmico inicial, envolvendo a perda de água e a alteração na coordenação do íon alumínio com o oxigênio. Como resultado dessas mudanças, o material perde grande parte de sua estrutura cristalina, adquirindo um estado praticamente amorfo, caracterizado por uma elevada entropia, indicando a ausência de uma estrutura cristalina regular.

A elevada entropia implica em uma maior dispersão de energia, liberdade de movimento e uma variedade de configurações possíveis. Esses fatores aumentam a probabilidade de reações químicas, facilitando interações com outros materiais. Em resumo, a alta entropia torna o material mais propenso a combinações químicas devido à maior aleatoriedade e acessibilidade energética das partículas.

Figura 2: Reação da ativação alcalina



Fonte: Adaptado de Severo, 2013

A ativação alcalina destaca-se por sua versatilidade, oferecendo materiais de construção sustentáveis e inovadores em várias aplicações. O concreto ativado alcalinamente, por exemplo, apresenta resistências mecânicas equivalentes ou superiores ao concreto convencional, destacando-se pela redução da emissão de carbono associada à sua produção (DAVIDOVITS, 2014). No entanto, a Tabela 1 destaca que outros precursores também podem ser utilizados para esse fim.

Tabela 4. Precursores.

Classes	Exemplos
Subprodutos de outras indústrias	Resíduos de mineração, escórias com baixo teor de cálcio, sílica de fumo, resíduos da indústria extrativa, cinzas volantes e alguns resíduos agroindustriais como cinzas de casca de arroz e bagaço de cana.
Pós naturais de aluminossilicatos reativos	Solo diatomáceo sedimentar formado a partir de esqueleto de microrganismos, vidro e tufos vulcânicos, gel de sílica de fontes termais ou ambiente ácido e argilas não ativadas termicamente.
Aluminossilicatos ativados	Argilas calcinadas em especial o metacaulim

Fonte: GONÇALVES (2016)

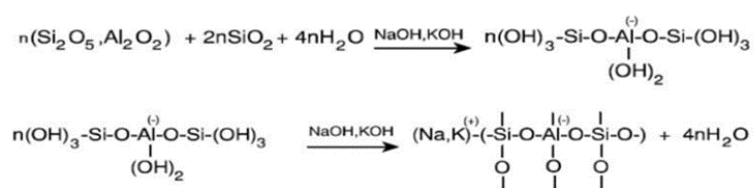
2.4. Geopolímeros

O geopolímero é obtido a partir da reação de policondensação, denominada geopolimerização. A policondensação, é a dissolução da sílica e alumina por um meio alcalino, quebrando assim as ligações originais da matéria-prima, formando um gel, que é convertido numa malha tridimensional de sílico-aluminato, processo esse, com uma evolução acelerada. Após a formação do gel, ocorre a reorganização e conseqüentemente a polimerização e endurecimento da argamassa (CESARI, 2015).

Os estudos sobre a substituição do cimento Portland foram iniciados nas décadas de 1940-50 pelos pesquisadores ucranianos Glukhovsky e Krivenko. Eles deram início às pesquisas que seguem até hoje sobre a substituição do cimento Portland por materiais obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos (KRIVENKO, 2008). O cimento geopolimérico foi patenteado nos Estados Unidos no ano de 1976 por Joseph Davidovits e na década de 90, ele começou a publicar seus primeiros resultados com ativação de diferentes tipos aluminossilicatos em uma série de produtos que denominou de geopolímeros (DAVIDOVITS, 1994).

De acordo com Pinto (2006) o desenvolvimento de geopolímeros é caracterizado por um fenômeno exotérmico, conforme ilustrado pela Figura 3. Notavelmente, a segunda equação da Figura 3 destaca que a água, embora não participe diretamente na reação química, desempenha um papel crucial ao conferir plasticidade à mistura, sendo posteriormente expelida durante o processo de cura e secagem da matriz.

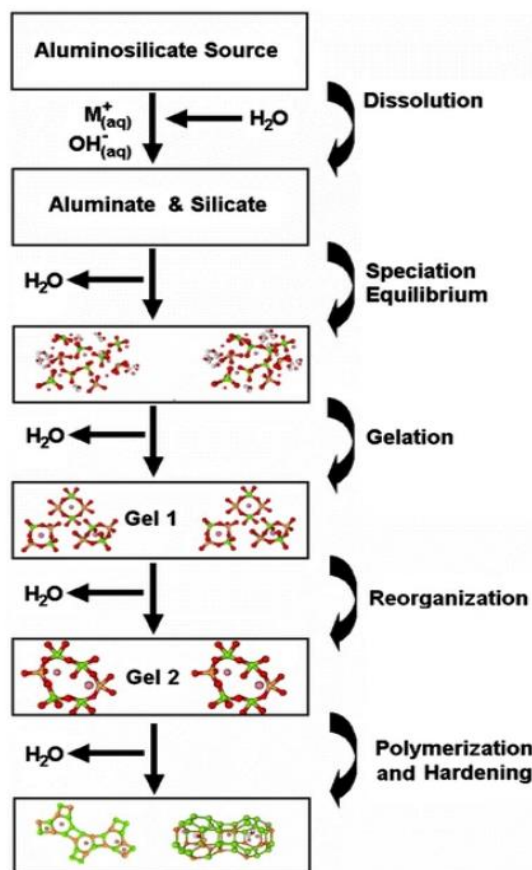
Figura 3. Equações que acontecem no desenvolvimento do geopolímero.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A ativação alcalina de geopolímeros é um processo químico que transforma materiais aluminossilicatos em materiais cimentícios. De acordo com Duxson (2007) o processo ocorre em algumas etapas conforme demonstra a Figura 4.

Figura 4. Modelo de Duxson (2007) para a reação de ativação alcalina de geopolímeros (baixo em cálcio)



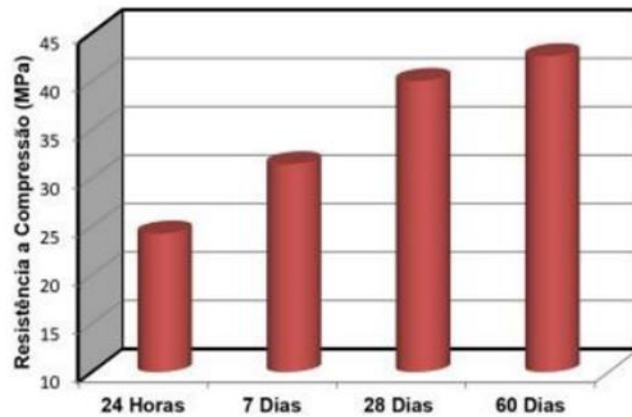
Fonte: DUXSON et al., (2007)

No processo de formação de geopolímeros, os materiais aluminossilicatos passam por várias etapas. Inicialmente, ocorre a dissolução, na qual esses materiais são dissolvidos em uma solução alcalina com um pH superior a 14, liberando monômeros reativos de silicato e alumínio. Em seguida, ocorre a condensação, na qual os monômeros reativos se combinam, formando compostos intermediários e liberando água. Posteriormente, ocorre a policondensação, em que os compostos intermediários se unem para formar géis, acompanhada pela liberação adicional de água. Finalmente, na etapa de cristalização, os géis podem ou não cristalizar, podendo formar zeólitas.

O tempo de cura em geopolímeros refere-se ao período necessário para que o material atinja sua resistência e propriedades desejadas após a mistura dos precursores e a moldagem da peça. Durante o processo de cura, ocorrem reações químicas que levam à formação da matriz sólida do geopolímero. Esse tempo pode variar com base na composição dos precursores, nas condições ambientais e no método de cura escolhido.

A variação do tempo de cura pode impactar as propriedades físicas, como a resistência à flexão, compressão e a densidade aparente (WANG, 2005). A Figura 5 exibe a resistência à compressão em diferentes intervalos de tempo de cura.

Figura 5. Resistência à compressão de geopolímeros em relação ao tempo de cura



Fonte: Brito *et al.* (2019)

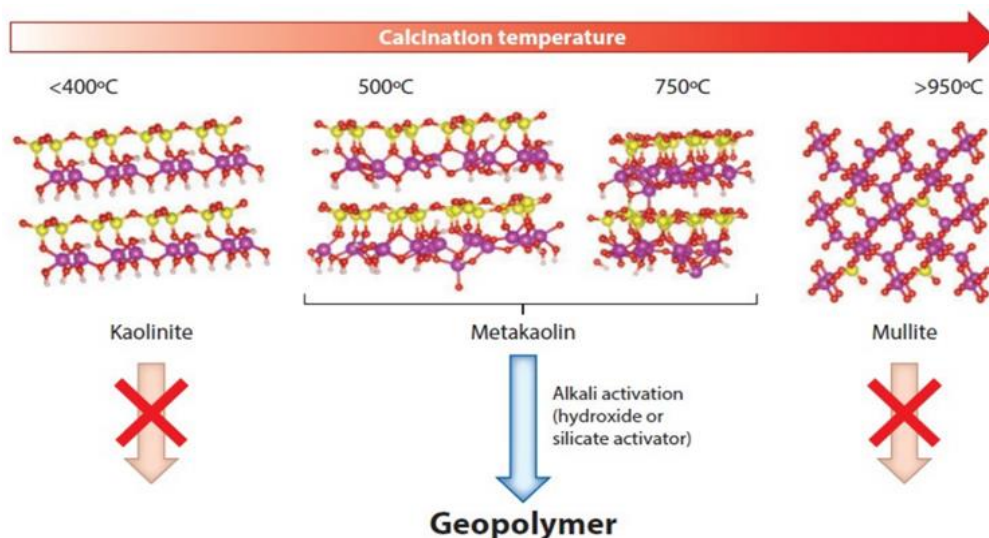
2.5. Precursores

2.5.1. Caulim e metacaulim

O caulim, uma argila de alumínio hidratada de baixa reatividade, ocorre naturalmente, exibindo composição química complexa, predominantemente composta por silicatos de alumínio (VASSALO, 2013). Suas propriedades incluem alta plasticidade, resistência mecânica moderada e estabilidade térmica.

O metacaulim, por sua vez, é obtido pela calcinação controlada do caulim em temperaturas que variam de 500 a 800°C, resultando em modificações cristalinas e químicas (FERNANDEZ-JIMENEZ, 2008). A Figura 6 esquematiza o processo de produção de metacaulim a partir do caulim convencional.

Figura 6. Processo de produção de metacaulim a partir do caulim convencional.



Fonte: White *et al.* (2010)

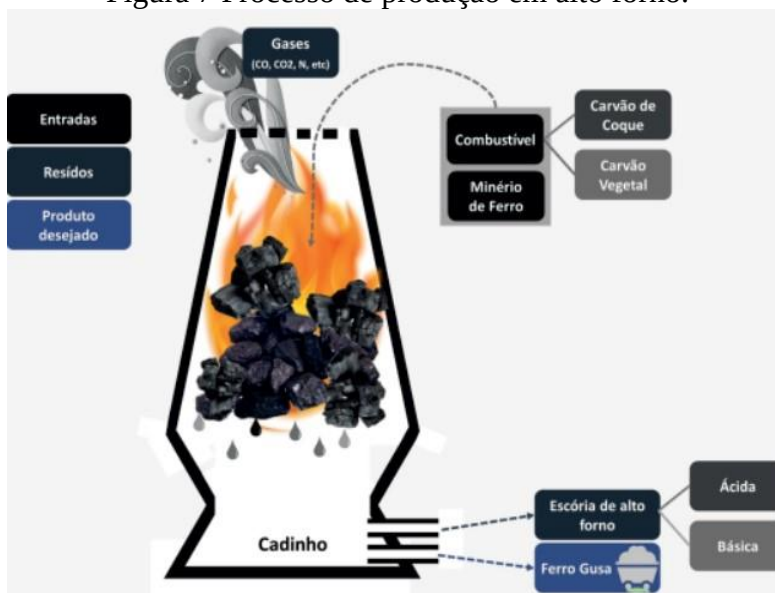
A inclusão de caulim e metacaulim em concretos e argamassas visa aprimorar características como trabalhabilidade, resistência à compressão e durabilidade, sendo evidenciado que a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim pode resultar em ganhos significativos de resistência (BARATA, 2007).

2.5.2. Escória de alto forno

A incorporação da escória de alto forno no cenário da construção civil constitui uma prática consolidada de notável relevância no âmbito da sustentabilidade e eficiência de materiais. Este embasamento teórico se propõe a examinar minuciosamente as propriedades, características e aplicações da escória de alto forno, proporcionando uma compreensão abrangente de seu papel na indústria da construção (OLIVEIRA, 2009).

A escória de alto forno desempenha um papel significativo na indústria da construção civil, especialmente quando incorporada como adição mineral no Cimento Portland, resultando na produção do Cimento Portland Composto (CP II). Esse método não apenas visa melhorar características como resistência e durabilidade dos materiais, mas também desempenha um papel crucial na redução das emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento (GEYER, 2001). A produção da escória de alto forno é intrinsecamente ligada ao processo de obtenção do ferro gusa em altos-fornos. Esse método, altamente sistemático, envolve diversas etapas precisas que garantem a eficácia do processo e a qualidade dos produtos resultantes. (SERRADOR, 2011). Na Figura 7 temos a ilustração do processo de produção em alto forno.

Figura 7 Processo de produção em alto forno.



Fonte: NEHRING, VICTOR. *et al.* (2021).

O processo para obtenção de minério de ferro é iniciado por meio de extração de hematita ou magnetita em locais apropriados. O material é submetido a processos de trituração e moagem, resultando em uma mistura fina conhecida como sinter feed. Em seguida o sinter feed é aglomerado em pequenos pedaços chamados sinter, por meio de processo de sintetização em alta temperatura. O sinter é introduzido no alto-forno, juntamente com coque (carvão metalúrgico) e calcário. O coque, ao ser queimado, gera calor suficiente para reduzir o minério a ferro metálico líquido.

A formação da escória ocorre durante o processo de fusão. As impurezas presentes no minério e no coque se combinam para formar a escória de alto forno, que flutua sobre o ferro líquido devido à sua menor densidade. Posteriormente a escória é coletada e resfriada rapidamente, muitas vezes por meio de jatos de água, resultando em sua granulação. Após ser formado os granulos da escória de alto forno, o material é armazenado para ser utilizado na construção civil como adição mineral ao cimento Portland. Durante a produção de EAF, para cada tonelada de ferro gusa produzida são geradas entre 200 a 300 kg de escória. Em 2022, o

Brasil produziu cerca de 32,4 milhões de toneladas de ferro gusa e aproximadamente 41% desta produção foi realizada no Estado de Minas Gerais (SINDIFER, 2022).

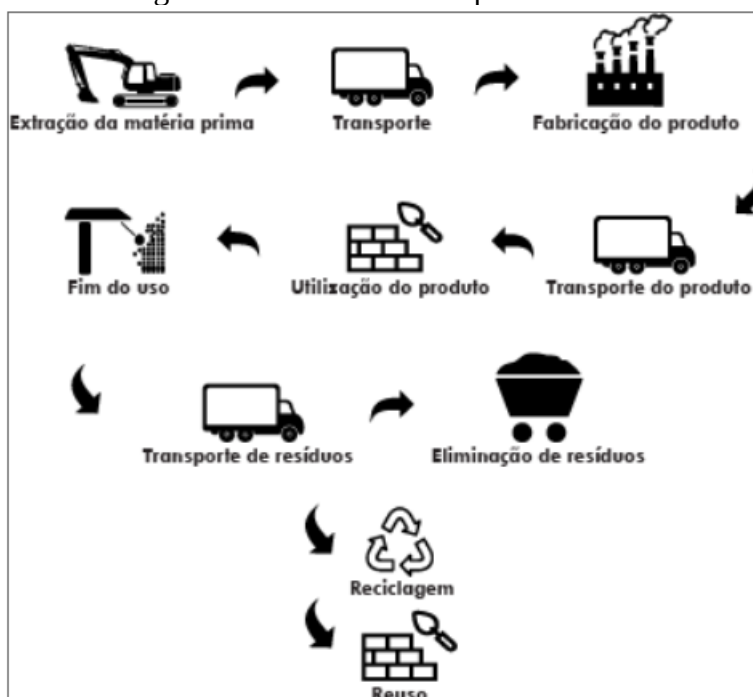
2.5.3. Resíduo argila industrial

O resíduo de argila industrial, oriundo dos processos da indústria cerâmica, surge como uma matéria-prima alternativa de notável potencial em várias aplicações construtivas. Estes resíduos podem surgir de várias etapas, como a extração de argila para a produção de cerâmica, tijolos, telhas, porcelana ou outros produtos cerâmicos. A composição dos resíduos dependerá da aplicação específica da argila na indústria. Pode incluir partículas de argila não utilizadas, fragmentos de produtos cerâmicos que não atenderam aos padrões de qualidade, entre outros.

Sua aplicação não só atende às demandas ambientais, fomentando a sustentabilidade, mas também favorece a otimização de recursos e a redução de custos na construção civil. Neste contexto teórico, abordaremos aspectos cruciais relacionados a essa matéria-prima, destacando características, benefícios e desafios associados à sua integração em diferentes contextos construtivos, conforme observado por Nagalli (2016).

A incorporação do resíduo de argila industrial em matrizes cimentícias impacta diretamente as propriedades técnicas dos materiais resultantes. Estudos indicam que a adição controlada desse resíduo pode aprimorar características como resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade (LOPES et al., 2019). A análise das propriedades físico-químicas é crucial para compreender o comportamento do material em diferentes contextos construtivos (REIS, 2019). A gestão inadequada dos resíduos de argila industrial pode resultar em impactos negativos no solo, na água e na qualidade do ar. É essencial adotar práticas responsáveis para minimizar esses impactos. O diagrama abaixo (Figura 8) apresenta o ciclo de vida dos produtos cerâmicos, sua utilização e reciclagem:

Figura 8 Ciclo de vida dos produtos cerâmicos



Fonte: MARIOTECA SUSTENTÁVEL

2.5.4. Sílica ativa

A sílica ativa, também conhecida como microsílica, é uma adição pozolânica cujo elevado teor de sílica reativa confere melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na

durabilidade dos materiais cimentícios. Amplamente estudada, sua incorporação em concretos e argamassas tem revelado benefícios notáveis na redução da permeabilidade e no aumento da resistência (SILVA, 2022).

Além de contribuir para a formação de uma estrutura mais compacta e reduzir a permeabilidade do concreto, a sílica ativa atua como agente compensador, minimizando a retração do concreto e prevenindo a formação de fissuras (PILAR, 2017). Seu papel é igualmente significativo em sistemas de ativação alcalina, influenciando a formação de geles de sílica alcalina.

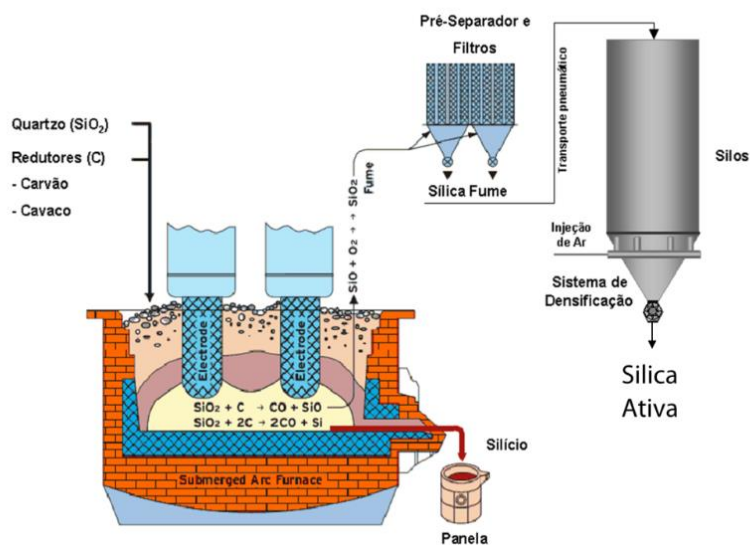
A utilização da sílica permite a redução do teor de cimento Portland em misturas de concreto, contribuindo para a diminuição da emissão de carbono associada à produção de cimento (LOPES, 2019).

No âmbito das propriedades e comportamento da sílica ativa em concretos e argamassas, é crucial mencionar a obra seminal de Marlova Piva Kulakowski, intitulada "Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa" (2002). Esta obra representa um marco distintivo na compreensão dos efeitos da carbonatação em materiais que incorporam sílica ativa, oferecendo uma análise minuciosa e detalhada sobre a influência desse aditivo na durabilidade e desempenho dessas estruturas sob condições ambientais diversas.

A pesquisa de Kulakowski, ao explorar os desdobramentos da carbonatação em materiais de construção contendo sílica ativa, fornece uma visão aprofundada dos mecanismos envolvidos e das implicações práticas para a vida útil desses materiais. Seu estudo, fundamentado em uma abordagem científica rigorosa, contribui substancialmente para o corpo de conhecimento existente sobre a sílica ativa, orientando a prática e promovendo avanços no campo da engenharia civil.

Na Figura 9, enfatiza-se o processo de interação entre quartzo e redutores, como carvão e cavaco, marcando o início da produção de silício e culminando na geração da sílica ativa como um subproduto vital. A representação visual abrange desde o processo de fusão inicial até a etapa subsequente, na qual são empregados dispositivos específicos para otimizar a eficiência da obtenção da sílica ativa.

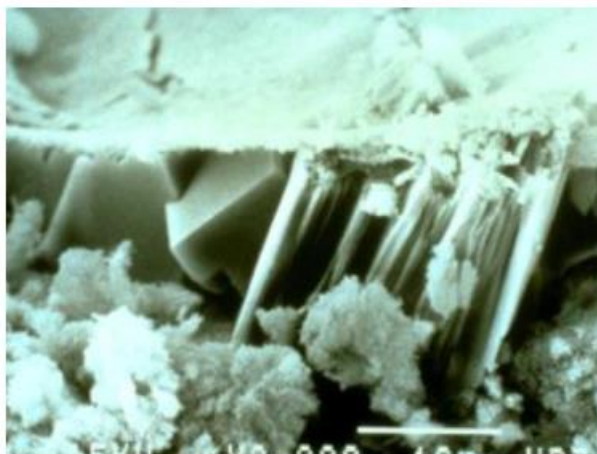
Figura 9 Fusão de Quartzo e Redutores



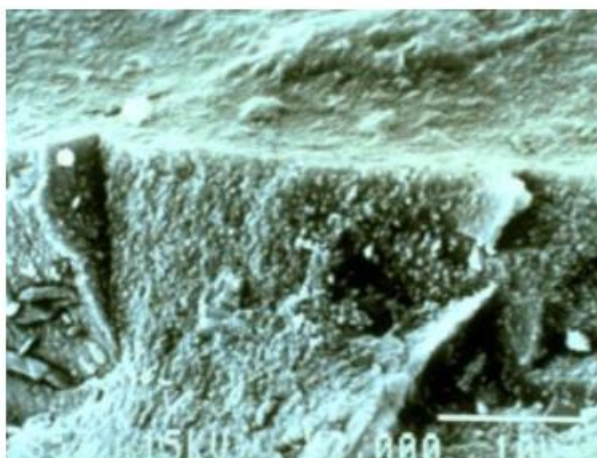
Fonte: SENSAL, 2000

Na Figura 10, destaca-se a diferença marcante na porosidade entre dois tipos de concreto: um enriquecido com sílica ativa e outro sem essa adição. A análise visual dessas imagens evidencia a notável redução na porosidade do concreto com sílica ativa, demonstrando sua eficácia em preencher espaços vazios e aprimorar a coesão da matriz. A presente comparação visual enfatiza as potenciais vantagens nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto quando a sílica ativa é incorporada.

Figura 10 Comparação da Porosidade entre Concretos com e sem Sílica Ativa



Sem sílica ativa.



Com sílica ativa.

Fonte: SENSALE, 2000

3 METODOLOGIA

Os elementos empregados na fabricação do material compreendem metacaulim, resíduo de argila industrial e escória de alto forno. Através de distintas razões de massa para cada componente, foram investigadas diversas formulações com o objetivo de desenvolver argamassas geopoliméricas que apresentem propriedades e características específicas. A ativação alcalina foi conduzida por meio da combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio, podendo ser misturados ou não com sílica ativa.

O processo de produção das argamassas ocorreu nos laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) em Belo Horizonte – Minas Gerais. Os testes

realizados nos materiais precursores, ativadores alcalinos e nos corpos de provas foram feitos nos seguintes laboratórios do CDTN: laboratório de cimentação, ensaios mecânicos, combustível nuclear, fluorescência de raios X, difração de raios X, caracterização de materiais estruturados e concentração hidrogravimetria e moagem.

3.1. Material

- **Caulim** - O caulim utilizado na pesquisa foi o de grau técnico fornecido pela empresa Sulfal.
- **Escória** - A escória de alto-forno envelhecida utilizada no estudo foi fornecida pela CMD Group, uma empresa especializada em beneficiamento de escória para cimenteiras. A CMD realizou a amostragem em vários pontos de um monte em seu estoque antes de disponibilizar o material para a pesquisa.
- **Resíduo de argila industrial** - A empresa Minerações Gerais, envolvida em prospecção, extração, processamento e comércio de substâncias minerais, forneceu o resíduo de argila industrial utilizado neste estudo.
- **Reagentes** – Foram utilizados como reagentes silicato de sódio (Na_2SiO_3), solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sílica ativa.

3.2 Equipamentos

A seguir são apresentados, na Tabela 5 e 6, os principais equipamentos utilizados para produção das amostras geopoliméricas:

Tabela 5. Equipamentos utilizados na preparação das amostras

Forno	Papel manteiga
Estufa	Espátulas
Capela	Erlenmeyers
Peneiras granulométricas	Béquers
Formas de PVC	Pipetas volumétricas

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 6. Aparelhos utilizados na preparação das amostras.

Equipamentos utilizados	Marca/Modelo
Granululômetro a Laser	Cilas, modelo Particle Size Analyser.
Difratômetro de raios X	Rigaku, modelo D/MAX Ultima PLUS automático.
Espectrômetro de raios X	Rigaku, modelo ZSX Primus II.
Autosorb	Quantachrome Corporation.
Argamassadeira	Pavitest.
Orbital Shaker	IKA KS, modelo 130 Control.
Máquina EMIC	Modelo PCI 150/200.

Fonte: Elaborado pelos autores

3.3 Métodos

Em todas as formulações mencionadas na literatura, os geopolímeros são originados a partir de aluminossilicatos amorfos, podendo ser derivados do reuso de resíduos industriais ou de matérias-primas naturais. Esses aluminossilicatos são então ativados por reagentes alcalinos. Os tópicos seguintes abordarão as metodologias empregadas no processamento das matérias-primas e na formulação das amostras de geopolímeros.

3.3.1. Preparação dos precursores

Neste estudo, a metodologia de preparação dos precursores incluiu a calcinação do caulim a 800 °C para desidroxilação e formação de metacaulim, essencial na produção de geopolímeros. Simultaneamente, o resíduo da argila industrial passou por calcinação a 750 °C, removendo água e decompondo minerais, resultando em um resíduo calcinado mais puro e reativo. Quanto à escória de alto forno, foi moída em um moinho de bolas (Figura 11) e selecionada para obter uma granulometria específica, preparando-a para as fases subsequentes no desenvolvimento de materiais geopoliméricos.

Figura 11 Moinho de bolas (escória de alto forno sendo moída)

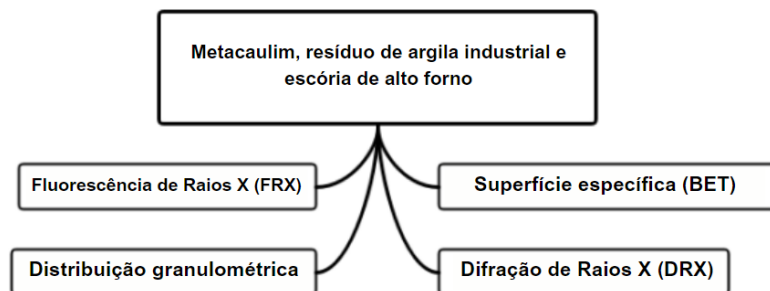


Fonte: Elaborado pelos autores

3.3.2. Caracterização dos precursores

Na caracterização dos materiais precursores utilizados neste trabalho, foram realizadas quatro análises fundamentais para compreender suas propriedades (Figura 12). Os procedimentos incluíram análise granulométrica para avaliar a distribuição do tamanho de partículas, difração de raios X (DRX) para identificar a composição cristalina, fluorescência de raios X (FRX) para determinar a composição elementar, e a medição da superfície específica para analisar a área superficial disponível.

Figura 12. Caracterizações realizadas nos precursores.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3.2.1 Análise granulométrica

Neste estudo, empregou-se a análise granulométrica como parte da metodologia para avaliação das características físicas dos materiais em questão. A análise granulométrica é uma técnica fundamental que proporciona informações detalhadas sobre a distribuição de tamanhos de partículas presentes em uma amostra.

A análise granulométrica desempenha um papel crucial na caracterização dos precursores, pois fornece informações sobre a distribuição do tamanho de partículas nos materiais. A caracterização granulométrica foi realizada por meio de um granulômetro a laser (Figura 13) da *marca Cilas, modelo 1190 Particle Size Analyser*, com uma faixa de tamanho que abrange de 0,04 a 2500 μm .

O processo teve início com a coleta representativa das amostras de interesse, as quais foram devidamente preparadas através da limpeza e secagem. Posteriormente, a amostra foi submetida ao procedimento de peneiramento, no qual um conjunto de peneiras com aberturas graduadas foi utilizado. Cada peneira retinha partículas de tamanho específico, permitindo a classificação das partículas de acordo com seus diâmetros.

A pesagem cuidadosa das frações retidas em cada peneira foi realizada, possibilitando o cálculo da percentagem em peso de cada fração em relação ao peso total da amostra. Com base nos dados obtidos, foi construído um gráfico de distribuição granulométrica, apresentando a percentagem acumulada de material retido em cada faixa de tamanho de partícula.

A análise granulométrica desempenha um papel crucial na compreensão das propriedades físicas dos materiais, impactando diretamente em seu comportamento mecânico, como compactação, permeabilidade e resistência. Além disso, ela é essencial na classificação de solos e no design de misturas em diversas áreas, fornecendo informações valiosas para a interpretação e aplicação prática dos resultados obtidos.

Figura 13: Granulômetro a laser.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3.2.2 Difração de raios X (DRX)

A investigação das propriedades cristalinas dos materiais em questão foi realizada por meio da incorporação da análise de difração de raios X como componente essencial da metodologia deste estudo.

A técnica de DRX permite identificar os minerais presentes nos precursores, analisando como a radiação X interage com as estruturas cristalinas. As amostras foram analisadas por meio da técnica de difratometria de raios X (DRX), utilizando o método do pó. A análise foi conduzida por meio de um difratômetro de raios X da *marca Rigaku, modelo D/MAX Ultima PLUS automático*.

O procedimento teve início com a preparação de amostras adequadas, garantindo a representatividade do material em análise. Posteriormente, as amostras foram expostas a feixes de raios X monocromáticos em um difratômetro, onde ocorre a difração pelos planos cristalinos presentes na amostra.

Os raios X difratados foram então capturados por um detector, gerando um padrão de difração. Esse padrão, composto por picos característicos, é interpretado para identificar os arranjos espaciais dos átomos na estrutura cristalina. A posição, intensidade e largura desses picos são indicativos das características cristalinas do material.

A análise de difração de raios X permite determinar parâmetros como tamanho dos cristalitos, orientação, fases cristalinas presentes, e até mesmo a presença de possíveis defeitos na estrutura cristalina. Essa técnica é amplamente utilizada em diversos campos, como química, física, geologia e ciência dos materiais, devido à sua sensibilidade para revelar informações cruciais sobre a organização atômica dos materiais em estudo.

3.3.2.3 Fluorescência de raios X (FRX)

Na condução deste estudo, a análise de fluorescência de raios X foi empregada como uma técnica fundamental para a caracterização dos elementos presentes nos materiais investigados. Essa abordagem oferece insights valiosos sobre a composição química das amostras, sendo uma ferramenta eficaz em estudos de caracterização de materiais.

A análise foi realizada utilizando um espectrômetro de raios X *da marca Rigaku, específico do modelo ZSX Primus II*. Durante a operação, o equipamento foi ajustado para uma tensão de 60kV e uma corrente de 110mA, apresentando uma fonte munida de filamento de tungstênio e uma janela de berílio.

A metodologia teve início com a preparação cuidadosa das amostras, assegurando sua representatividade. Em seguida, as amostras foram expostas a radiação de raios X de alta energia, o que resulta na excitação dos elétrons nas camadas internas dos átomos presentes nas amostras. Durante esse processo, os elétrons excitados retornam aos seus estados fundamentais, emitindo raios X característicos no processo, conhecido como fluorescência.

A coleta dos raios X emitidos foi realizada por um detector apropriado, permitindo a identificação e quantificação dos elementos presentes nas amostras. Os padrões de fluorescência obtidos foram então analisados para determinar a composição elementar, possibilitando a caracterização qualitativa e quantitativa dos materiais estudados.

A análise de fluorescência de raios X destaca-se por sua capacidade de identificar uma ampla gama de elementos, proporcionando uma visão abrangente da composição química das amostras. Sua aplicação é comum em diversas áreas, incluindo ciência dos materiais, geologia, arqueologia e análise de amostras ambientais, devido à sua sensibilidade e versatilidade na determinação da composição elementar de materiais diversos.

3.3.2.4 Superfície específica

A superfície específica refere-se à extensão da área de contato entre as partículas do material e é crucial para entender a reatividade e a capacidade de adsorção. Em termos de geopolímeros, uma superfície específica adequada é fundamental para promover interações eficientes durante o processo de formação do material, influenciando diretamente suas propriedades finais, como resistência e durabilidade. Essa técnica é amplamente empregada para determinar a área superficial específica de sólidos porosos e por sua eficácia na análise de adsorção de gases.

A análise da área superficial BET e da distribuição de tamanho dos poros nas amostras dos precursores foi realizada por meio do equipamento *Autosorb*, da *Quantachrome Corporation*, que emprega a técnica de adsorção de nitrogênio a 77 K.

Durante a análise BET, diferentes pressões de adsorção são aplicadas, e a quantidade de gás adsorvido é registrada. A isoterma resultante é analisada utilizando a equação de Brunauer-Emmett-Teller (BET), que é um modelo matemático utilizado para calcular a área superficial específica.

O método é baseado na teoria de multicamadas de adsorção, na qual as moléculas de gás são adsorvidas em camadas sucessivas na superfície do material poroso. A partir dos dados obtidos, é possível calcular a área superficial específica do material, fornecendo informações precisas sobre a extensão das superfícies disponíveis para interações químicas e físicas.

3.3.3. Preparação do ativador alcalino

O ativador alcalino empregado consiste em uma combinação da solução de hidróxido de sódio (NaOH) com silicato de sódio (Na_2SiO_3) e sílica ativa. Essa mistura de ativadores alcalinos é crucial para acelerar a reação de síntese do geopolímero. A concentração da solução de NaOH empregada na formulação do ativador alcalino foi de 10 mol/L.

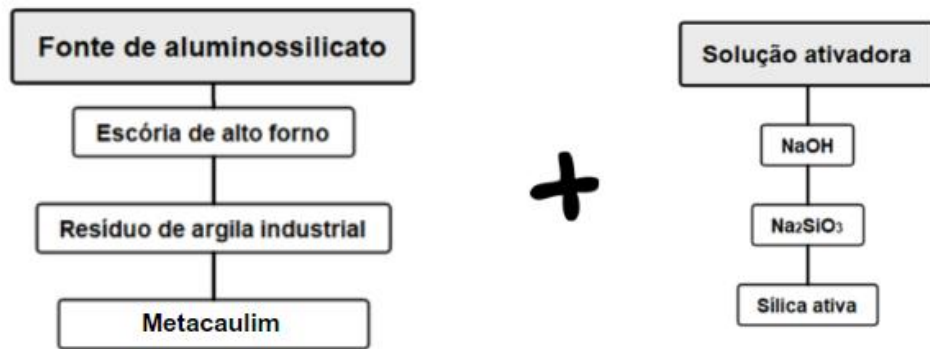
3.3.4. Planejamento de preparação dos corpos de prova

Corpos de teste foram preparados com três fontes de aluminossilicato e ativadores, usando planejamento experimental em rede simplex para avaliar as combinações. O método reduz experimentos, maximizando o significado estatístico. Aluminossilicatos foram usados isoladamente e em mistura (0-100% em massa), escolhendo sete pontos em vértices, centros e ponto central. Para ativadores, a sílica ativa teve limite de 10%, escolhendo quatro extremos e ponto central. Matrizes codificadas foram geradas pelo software Minitab®17. Foram combinadas duas matrizes, resultando em 35.

3.3.5. Produção dos corpos de prova

O processo de fabricação do geopolímero se inicia com a calcinação do caulim e da argila paralelamente a moagem e peneiramento da escória de alto-forno. Esses ligantes, também denominados precursores, são submetidos ao processo de ativação alcalina com uma solução de NaOH e silicato de sódio (Figura 14)

Figura 14 Precursores e ativadores utilizados na produção dos corpos de prova de geopolímero.



Fonte: Elaborado pelos autores

Em algumas amostras, a inclusão de água foi necessária para aprimorar a maleabilidade do material e facilitar a moldagem dos corpos de prova (Figura 15).

Figura 15. Homogeneização dos precursores e ativadores alcalinos para formação de geopolímero.

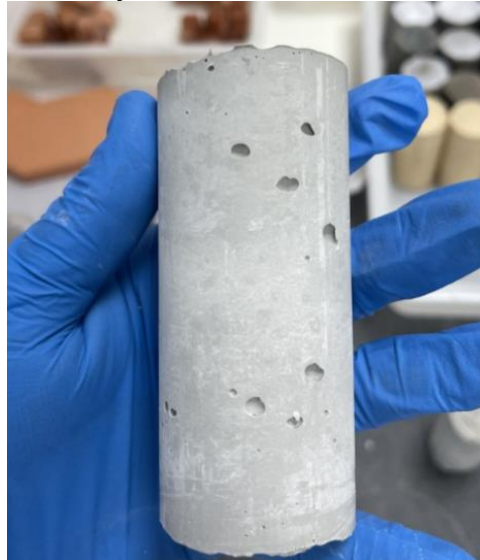


Fonte: Elaborado pelos autores

Durante esse processo, utilizou-se uma argamassadeira da marca *Pavitest*, com capacidade de 5 litros para laboratório, equipada com pá em aço inoxidável e sistema de engate rápido. Após a etapa de homogeneização e moldagem das argamassas nos cilindros de PVC, as amostras passam por um processo de agitação utilizando o *agitador Orbital Shaker IKA KS 130 Control*. Essa fase é crucial para assegurar a homogeneidade e qualidade do material moldado. O agitador orbital é selecionado pela sua capacidade de proporcionar uma agitação suave e controlada, evitando danos à integridade do material.

Durante a agitação, realizada de forma padronizada e controlada, o *agitador Orbital Shaker* desempenha um papel fundamental na remoção de bolhas que podem ter se formado durante o processo de moldagem. A ação orbital permite que essas bolhas migrem para a superfície da amostra de maneira gradual e controlada, sem comprometer a resistência ou a estrutura interna do material (Figura 16).

Figura 16 O corpo de prova de argamassa exibe imperfeições, revelando a presença de espaços irregulares causados pela formação de bolhas de ar durante o processo de preparação.



Fonte: Elaborado pelos autores

As argamassas formadas nesse método são moldadas manualmente em cilindros de PVC (Figura 17), com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, destinados ao ensaio de compressão, absorção e densidade.

Figura 17. Geopolímeros moldados manualmente nos cilindros de PVC.



Fonte: Elaborado pelos autores

Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a preparação, e o processo de cura foi realizado à temperatura ambiente por 7 e 28 dias (Figura 18).

Figura 18. Corpos de prova desmoldados e no processo de cura.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3.6. Caracterização dos corpos de prova

3.3.6.1. Resistência à compressão

Para a condução do ensaio de compressão, é imperativo que os corpos de prova estejam nivelados. Nesse sentido, suas superfícies planas foram adequadamente preparadas, passando por um processo de lixamento com uma lixa de granulação nº 80 além do processo de capeamento com enxofre fundido a 139°C (Figura 19)

Figura 19 Corpos de prova capeados



Fonte: Elaborado pelos autores

Conforme a Figura 20, os corpos de prova, apresentando uma relação comprimento/diâmetro de 2, foram submetidos aos ensaios de compressão utilizando a *máquina Instron, modelo 5882*, após períodos de cura de 7 e 28 dias. Esse procedimento experimental está em conformidade com as orientações estabelecidas na norma NBR 7215:2019 - Cimento Portland, que aborda a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e estabelece requisitos específicos para a máquina de ensaio de compressão.

Cada corpo de prova foi devidamente posicionado na máquina de ensaio de compressão, garantindo uma distribuição uniforme da carga ao longo de sua superfície superior. A aplicação da carga foi conduzida de forma gradual e registrada em intervalos regulares, simultaneamente à mensuração da deformação do corpo de prova. O ensaio foi continuado até a observação da falha ou ruptura do material.

Figura 20. Ensaio de compressão.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3.6.2. Absorção de água

A massa do corpo de prova foi avaliada em condições normais e, posteriormente, foi mensurada após secagem em estufa a 105°C por 72 horas. Após a fase de secagem, o corpo de prova ficou submerso em água por 72 horas.

Após a saturação em água à temperatura ambiente, o corpo de prova foi imerso em água, sendo aquecida gradualmente até atingir o ponto de ebulição ao longo de cinco horas (Figura 21). Após esse período, a água foi resfriada naturalmente, seca e pesada para análise.

Figura 21. Corpo de prova submerso em água aquecida.



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3.6.3. Densidade

A determinação da densidade proporciona *insights* sobre a relação entre a massa de um material e o volume que ocupa. O processo teve início com a medição da massa de 500 mL de água contida na proveta, visando calcular a densidade com base na relação entre massa e volume. A massa registrada foi de 496 g, resultando em uma densidade de 0,992 g/cm³.

Posteriormente, o corpo de prova foi inserido, cujo peso já havia sido registrado previamente, dentro da proveta. O volume foi completado com água até atingir os 500 mL, e a massa da água utilizada foi devidamente registrada. Esse procedimento foi feito em triplicata para cada composição do experimento. A densidade foi, então, calculada levando em consideração tanto a massa da água quanto a massa do corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

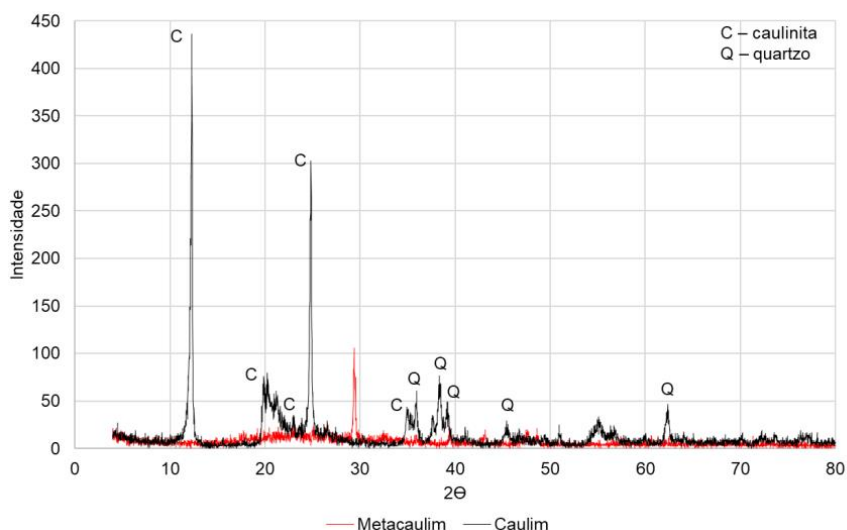
5.1. Difração de raios x (DRX)

5.1.1. Caulim e metacaulim

A calcinação do caulim para produzir metacaulim tem como objetivo principal transformar a estrutura cristalina do caulim em uma forma amorfa, tornando o material mais reativo quando combinado com um ativador alcalino.

Na Figura 22, é possível observar que os picos proeminentes no difratograma de raios X são majoritariamente atribuídos ao quartzo e à caulinita. Entretanto, no que diz respeito ao metacaulim, os padrões de ruído presentes no gráfico indicam a natureza amorfa da estrutura, evidenciando a transformação ocorrida durante o tratamento térmico. Essa alteração facilita a liberação de alumínio (Al) e silício (Si), conferindo ao metacaulim uma maior propensão à reação de geopolimerização.

Figura 22. Difratograma de identificação da estrutura cristalina do caulim e amorfa do metacaulim



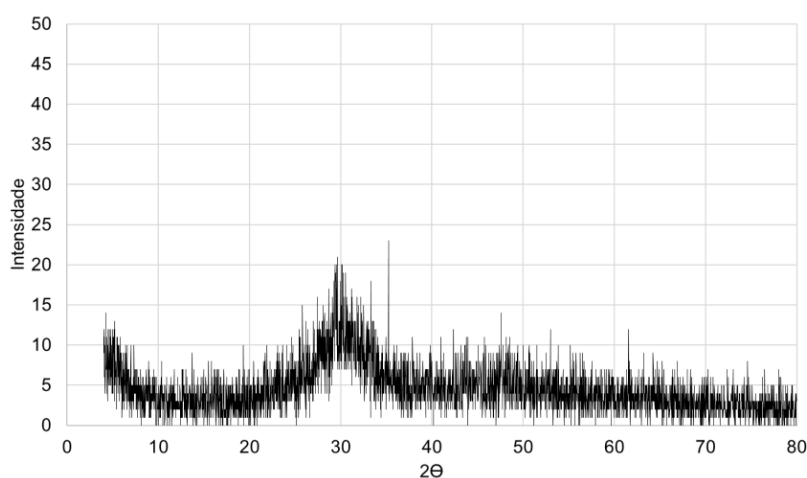
Fonte: Elaborado pelos autores.

5.1.2. Escória de alto forno

A escória de alto forno, formada em temperaturas extremas durante o processo siderúrgico, atinge aproximadamente 1500 °C. Sua estrutura amorfa, ausente de organização cristalina regular, resulta da fusão rápida de componentes diversos. Essa natureza amorfa

confere à escória propriedades específicas, como maior reatividade (Figura 23).

Figura 23. Difratoograma da escória de alto forno.



Fonte: Elaborado pelos autores

A difração de raios X da escória de alto forno resultando em ruídos indica a ausência de uma estrutura cristalina regular. Essa estrutura amorfa é consequência da fusão rápida de componentes diversos durante a formação da escória. Ao contrário de materiais cristalinos que exibem padrões claros de difração, a escória amorfa não apresenta uma organização atômica periódica que seria detectável por essa técnica.

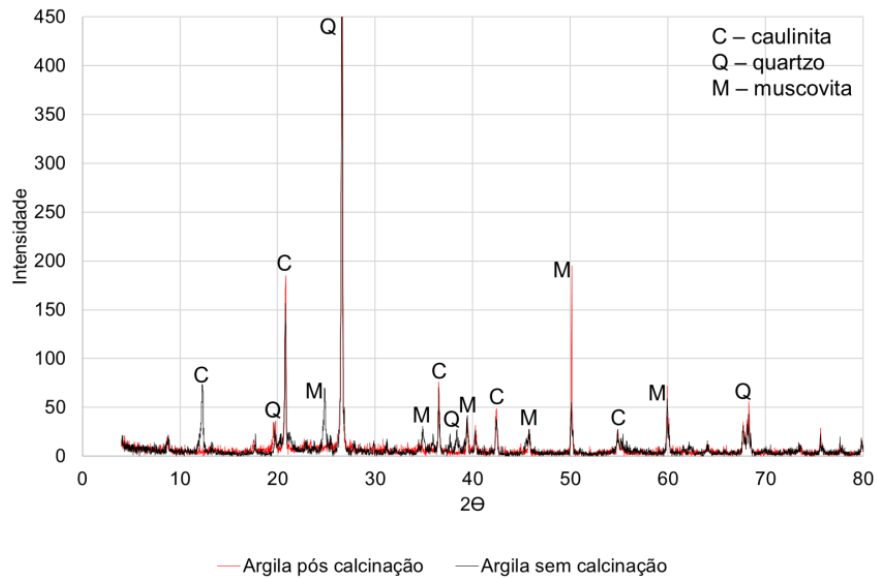
A natureza amorfa da escória confere-lhe propriedades específicas, como maior reatividade, devido à falta de ordem estrutural. Isso significa que a escória amorfa é mais propensa a interagir e reagir com outros materiais, o que é desejável em alguns contextos, como em processos de ativação alcalina.

Quando se considera a ativação alcalina da escória, apenas a moagem e o peneiramento são processos adequados para esse fim. A natureza amorfa da escória significa que ela não precisa passar por um tratamento térmico prévio. Em materiais cristalinos, o tratamento térmico muitas vezes é necessário para quebrar as ligações e rearranjar os átomos, permitindo a formação de novas estruturas cristalinas. No entanto, na escória amorfa, a ausência de uma estrutura cristalina já atende aos requisitos necessários para a ativação alcalina. Assim, a moagem e o peneiramento são suficientes para aumentar a reatividade da escória, facilitando a sua utilização em processos específicos, como na indústria da construção.

5.1.3. Resíduo de argila calcinada

O difratograma de raios X (DRX) fornece informações valiosas sobre a estrutura cristalina dos materiais analisados (Figura 24). No caso da argila calcinada, os resultados indicam a presença de picos característicos de caulinita, quartzo e muscovita, tanto antes quanto após o processo de calcinação.

Figura 24 Difrátograma do resíduo da argila calcinada.



Fonte: Elaborado pelos autores

A presença de picos característicos de caulinita sugere que esse argilomineral manteve sua estrutura cristalina durante o processo de calcinação. A caulinita é um mineral comum em argilas e é amplamente utilizado na indústria cerâmica devido às suas propriedades favoráveis.

Os picos de quartzo indicam a presença dessa forma cristalina de SiO_2 na argila, e é interessante notar que o quartzo também manteve sua estrutura cristalina após a calcinação. Isso pode ser importante para entender as propriedades do material e seus potenciais aplicações.

A detecção de picos de muscovita sugere a presença deste filossilicato comum em granitos. Assim como a caulinita e o quartzo, a muscovita parece não ter sido significativamente afetada pela calcinação em termos de sua estrutura cristalina.

A observação de que a calcinação da argila não foi eficaz em converter a estrutura cristalina em amorfa é um resultado importante. Indica que, apesar do processo térmico, os minerais presentes na argila mantiveram suas estruturas cristalinas distintas. Esse resultado pode ter implicações significativas em termos de propriedades físicas e químicas do material, influenciando suas possíveis aplicações industriais, especialmente na cerâmica, onde a estrutura cristalina desempenha um papel fundamental nas propriedades finais do produto.

5.2. Fluorescência de raios x (FRX)

As características mecânicas do material ativado alcalinamente são impactadas pela relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em sua composição. Essa relação foi determinada usando os dados fornecidos pela fluorescência de raios X, conforme apresentado nas Tabelas 7, 8 e 9 para cada um dos precursores.

A relação molar do metacaulim utilizado foi de 1,98:1, enquanto a escória e a argila apresentam 3,57:1 e 3,17:1, respectivamente. Um maior teor de sílica favorece a formação de tetraedros de sílica, proporcionando maior estabilidade e contribuindo para o aumento da resistência mecânica.

No entanto, a disponibilidade limitada de SiO_2 nos precursores para reação e a dificuldade em quantificar precisamente essa proporção são desafios, especialmente quando o tratamento térmico não é suficiente para amorfizar completamente a estrutura. (DUARTE, 2024).

Tabela 7. Proporção molar do metacaulim

Metacaulim				
Composição	(%)	Massa molar (g/mol)	Quantidade (g)	Quantidade (mol)
SiO ₂	43,340	60,080	43,340	0,721
Na ₂ O	0,000	61,980	0,000	0,000
Al ₂ O ₃	37,300	101,960	37,300	0,366
MgO	1,970	40,304	1,970	0,049
Fe ₂ O ₃	0,700	159,690	0,700	0,004
K ₂ O	0,280	94,200	0,280	0,003
CaO	11,650	56,077	11,650	0,208
Outros	4,760			
Total	100,000		100,000	

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 8. Proporção molar da escória

Escória				
Composição	(%)	Massa molar (g/mol)	Quantidade (g)	Quantidade (mol)
CaO	38,990	56,080	38,990	0,695
SiO ₂	30,650	60,080	30,650	0,510
Al ₂ O ₃	14,620	101,960	14,620	0,143
K ₂ O	0,180	94,200	0,180	0,002
TiO ₂	0,280	79,866	0,280	0,004
Fe ₂ O ₃	0,980	159,690	0,980	0,006
MgO	5,800	40,300	5,800	0,144
Outros	8,500			
Total	100,000		100,000	

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 9. Proporção molar da argila

Argila calcinada				
Composição	(%)	Massa molar (g/mol)	Quantidade (g)	Quantidade (mol)
SiO ₂	60,910	60,080	60,910	1,014
Al ₂ O ₃	32,600	101,960	32,600	0,320
MgO	1,370	40,304	1,370	0,034
Fe ₂ O ₃	2,270	159,690	2,270	0,014
K ₂ O	2,530	94,200	2,530	0,027
Outros	0,320			
Total	100,000		100,000	

Fonte: Elaborado pelos autores

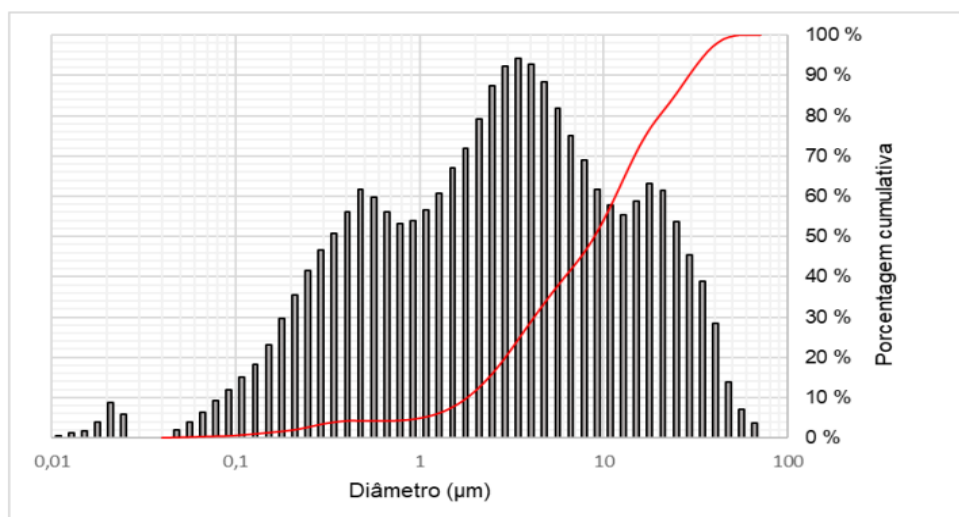
5.3. Análise granulométrica

A seguir serão exibidas as distribuições granulométricas do metacaulim e escória de alto forno, onde as porcentagens individuais de cada diâmetro são representadas pelo histograma, enquanto a curva ilustra a distribuição pela porcentagem cumulativa nos respectivos diâmetros de partícula.

5.3.1. Metacaulim

O diâmetro médio das partículas de metacaulim é registrado em 11,41 μm , com 10% das partículas apresentando diâmetro inferior a 1,96 μm , 50% com diâmetro abaixo de 9,73 μm e 90% com diâmetro inferior a 24,08 μm (Figura 25).

Figura 25. Histograma e porcentagem acumulada da distribuição granulométrica do metacaulim



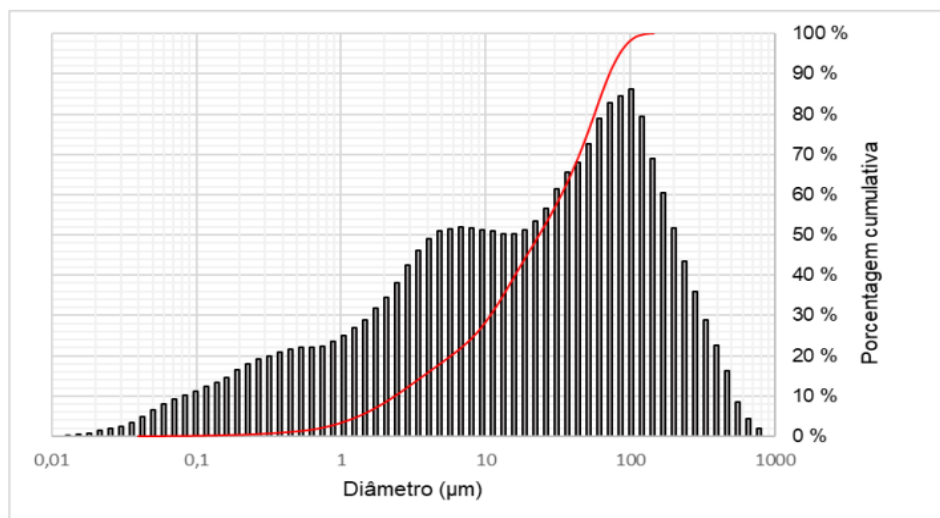
Fonte: Elaborado pelos autores

A distribuição granulométrica do metacaulim, evidenciada na Figura 25 por meio de um histograma e da porcentagem acumulada, revela que a curva granulométrica exibe algumas interrupções. Este fenômeno é comum quando o material possui uma quantidade substancial de espaços vazios. O metacaulim, por sua natureza fina, proporciona uma ampla superfície de contato, favorecendo as reações. A maior área superficial das partículas menores contribui para uma resistência à compressão mais elevada (ponto 82), disponibilizando quantidades ampliadas de alumínio e silício para reagir com o ativador alcalino.

5.3.2 Escória

O tamanho médio das partículas de escória é de 31,56 μm , onde 10% delas têm um diâmetro menor que 2,36 μm , 50% possuem diâmetro inferior a 23,44 μm , e 90% apresentam diâmetro abaixo de 71,75 μm , conforme demonstrado na Figura 26.

Figura 26 Gráfico de frequência e porcentagem cumulativa referente à distribuição granulométrica da escória de alto forno



Fonte: Elaborado pelo autores

Por motivos técnicos o ensaio de análise granulométrica da argila não foi possível ser realizado. O trabalho segue sendo desenvolvido por pesquisadores CDTN que continuarão os testes que não foram realizados.

5.5. Superfície específica

As áreas superficiais de cada precursor foram determinadas usando o método BET, enquanto os volumes de poros foram calculados com base no método BJH.

Na Tabela 10, encontram-se os resumos dos resultados da caracterização para os três precursores investigados.

Tabela 10 Área, volume e diâmetro médio dos poros para o Caulim e Metacaulim

Precursor	Área superficial específica (m ² /g)	Volume de poros (cm ³ /g)	Diâmetro médio dos poros (Å)
Caulim	15,0804	0,03716	132,083
Metacaulim	13,3307	0,04842	181,371
Escória	2,8109	0,00735	66,141

Fonte: Elaborado pelos autores

A reatividade do precursor em relação ao ativador alcalino está diretamente associada à sua área superficial, que proporciona uma maior superfície de contato para a reação química. Além disso, materiais com alta superfície específica têm propensão a se agregar em solução aquosa.

A área superficial do metacaulim apresentou valores similares aos da escória, sendo que esta última demonstrou um desempenho inferior. A análise dos volumes e diâmetros dos poros destaca o metacaulim como o precursor com os maiores valores, teoricamente prejudicando o produto cimentício final, com aproximadamente 0,05 cm³/g e 181,37 Å, respectivamente. Embora a escória apresente valores inferiores em comparação ao metacaulim, ainda exibe características favoráveis quando comparada a outros precursores.

É importante observar que, por razões técnicas, a análise da argila calcinada não foi realizada. O caulim, por sua vez, mostrou menor porosidade em comparação ao metacaulim, aumentando após a calcinação, de $39,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ para $50,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$. O volume dos poros também aumentou após o tratamento térmico, possivelmente devido ao processo de desidroxilação, que retira hidroxila da estrutura para tornar o material amorfo. O comportamento do caulim sugere uma resposta significativa ao tratamento térmico.

5.6. Compressão e absorção

Na Tabela 11 encontra-se os valores obtidos para absorção de água de 7 e 28 dias (AbÁgua) e resistência à compressão de 7 e 28 dias (RC). Os valores de escória de alto forno (EAF), argila calcinada (AC), metacaulim (M), silicato de sódio (SS), sílica ativa (SA) e hidróxido de sódio (NaOH) também estão listados na Tabela 8. No geral, Os materiais apresentaram um ganho de resistência mecânica dependente do tempo de cura e atingiu os maiores valores aos 28 dias.

Tabela 11 Resultados de compressão e absorção dos corpos de prova de 7 e 28 dias.

Amostr a	AC	M	EAF	SS	AS	NaO H	AbÁgua- 7dias	AbÁgua- 28dias	RC- 7dias	RC- 28dias
3	0,00	0,500	0,000	0,450	0,05	0,000	24,885	23,355	29,06	23,47
4	0,00	0,500	0,000	0,500	0,00	0,000	33,092	18,106	32,54	22,51
5	0,00	0,700	0,000	0,125	0,05	0,125	41,079	37,809	0,98	3,98
6	0,85	0,000	0,000	0,000	0,00	0,150	38,394	36,428	2,27	0,06
7	0,80	0,000	0,000	0,000	0,02	0,180	38,396	35,350	0,84	1,09
8	0,60	0,000	0,000	0,350	0,05	0,000	9,169	16,136	0,97	7,99
9	0,60	0,000	0,000	0,400	0,00	0,000	15,996	22,383	0,47	11,82
10	0,70	0,000	0,000	0,125	0,05	0,125	30,396	28,842	4,68	9,89
11	0,00	0,000	0,800	0,000	0,00	0,200	11,516	10,880	38,91	41,41
12	0,00	0,000	0,830	0,000	0,02	0,150	10,469	8,063	15,60	51,09
13	0,00	0,000	0,700	0,250	0,05	0,000	8,290	7,721	17,54	45,45
14	0,00	0,000	0,750	0,250	0,00	0,000	7,438	11,119	41,18	23,87
15	0,00	0,000	0,800	0,075	0,05	0,075	13,450	14,200	21,18	17,95
16	0,30	0,300	0,000	0,000	0,00	0,400	30,185	31,715	10,02	5,60
17	0,35	0,350	0,000	0,000	0,02	0,280	28,574	31,594	4,00	7,02
18	0,27	0,275	0,000	0,400	0,05	0,000	49,380	33,198	2,42	6,87
19	0,30	0,300	0,000	0,400	0,00	0,000	19,750	14,346	3,34	32,91
21	0,00	0,450	0,450	0,000	0,00	0,100	17,719	18,241	27,66	32,20
22	0,00	0,410	0,410	0,000	0,02	0,160	18,516	18,531	14,30	22,71
23	0,00	0,300	0,300	0,350	0,05	0,000	11,162	8,428	26,50	44,07
24	0,00	0,325	0,325	0,350	0,00	0,000	9,487	9,577	15,31	25,44
26	0,35	0,000	0,350	0,000	0,00	0,300	20,941	20,173	11,28	23,07
28	0,31	0,000	0,310	0,330	0,05	0,000	16,471	14,960	50,84	45,45
29	0,45	0,000	0,450	0,100	0,00	0,000	28,159	27,219	5,59	9,49
30	0,37	0,000	0,375	0,100	0,05	0,100	16,388	19,229	47,22	39,79
33	0,16	0,166	0,167	0,450	0,05	0,000	22,195	16,051	24,92	29,20
34	0,16	0,167	0,166	0,500	0,00	0,000	10,882	9,697	20,54	23,82

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados obtidos nas compressões dos 27 corpos de prova de argamassas geopoliméricas revelam insights significativos sobre o desempenho mecânico dessas formulações. Notavelmente, os testes destacaram a influência positiva da escória de alto forno

moída, evidenciando seu papel crucial na melhoria das propriedades de resistência à compressão.

Foi identificado padrões consistentes interessantes nas amostras que incorporaram escória de alto forno moída, indicando que este componente desempenha um papel fundamental na otimização das características mecânicas das argamassas geopoliméricas. Sua presença parece contribuir para uma matriz mais robusta e coesa, resultando em valores superiores nos testes de compressão.

Além disso, nota-se resultados promissores em amostras que continham uma combinação de sílica e silicato. Essa sinergia entre os materiais revela-se benéfica, sugerindo que a incorporação desses componentes pode ser uma estratégia eficaz para aprimorar as propriedades mecânicas das argamassas geopoliméricas.

A observação de resultados menos satisfatórios nos testes de compressão e absorção das amostras que incluíam argila levanta questões importantes sobre o impacto desse componente nas propriedades das argamassas geopoliméricas. Cientificamente, a argila pode apresentar desafios significativos devido à sua reatividade limitada durante a geopolimerização. Enquanto componentes como escória de alto forno moída demonstraram melhorar a resistência à compressão, a argila parece não contribuir efetivamente para a formação de uma matriz coesa.

A porosidade adicionada pela argila pode comprometer a densidade da matriz geopolimérica, influenciando diretamente na resistência à compressão. Além disso, a natureza higroscópica da argila pode explicar os resultados baixos nos testes de absorção, uma vez que a absorção de água pode aumentar a permeabilidade da matriz, prejudicando suas propriedades.

Esses achados sugerem a necessidade de uma abordagem mais cuidadosa ao incorporar argila em formulações geopoliméricas, considerando fatores como a reatividade específica do tipo de argila e estratégias para mitigar seus efeitos adversos.

Do conjunto inicial de 27 amostras de argamassas geopoliméricas, seis destacaram-se nas análises finais: G11, G12, G13, G23, G28 e G30. No entanto, após uma avaliação criteriosa, optamos por excluir três delas – G13, G23 e G28 – devido à presença de uma quantidade significativamente maior de silicato de sódio. Essa decisão foi orientada pela consideração econômica, dado que o silicato de sódio é um insumo mais dispendioso, e em contextos nos quais o custo é um fator preponderante, a eficiência econômica torna-se crucial.

Em seguida, a corrida G11 foi eliminada devido à observação de uma eflorescência excessiva. Ela se manifesta como a formação de depósitos brancos ou eflorescentes na superfície do material. No contexto dos geopolímeros, esse processo geralmente resulta da reação dos álcalis lixiviados com o dióxido de carbono presente no ambiente. Essa reação forma sais solúveis que migram para a superfície do material, onde a água subsequente dissolve esses sais, deixando para trás os depósitos brancos característicos, conforme Figura 27.

Figura 27. Formação de eflorescência na amostra G11 com 28 dias de cura.



Fonte: Elaborado pelos autores

A eflorescência em geopolímeros pode ser considerada uma manifestação patológica, pois pode comprometer não apenas a estética do material, mas também suas propriedades mecânicas e durabilidade. Ela é o produto de reações químicas que acontecem da seguinte maneira: alguns materiais, como a cal, podem ter alto teor de hidróxido de cálcio. Esse hidróxido, em presença de água, é dissolvido. Quando a água evapora, ele vai para a superfície do material e reage com o dióxido de carbono do ar. Com essa reação, surgem as manchas (Figura 28)

Figura 28 Formação de eflorescência.



Fonte: Elaborado pela autores

Esse fenômeno ocorre devido à coexistência de umidade, sais solúveis, porosidade dos materiais e possibilidade de evaporação. É considerado um dano, por alterar a aparência do elemento onde se deposita, mas há casos em que os sais constituintes podem ser agressivos e causar degradação profunda, principalmente quando ficam no interior das peças, exercendo

expansão.

Figura 29 eflorescência no interior do geopolímero.



Fonte: Elaborado pelos autores

Ao final do processo de seleção, duas corridas, G12 (Figura 30) e G30 (Figura 31), emergiram como as mais promissoras. A análise aprofundada revelou que a corrida G12 se destacou com um resultado de compressão notavelmente superior em comparação às demais amostras. Esse desempenho excepcional torna a G12 uma candidata promissora para formulações geopoliméricas futuras. A capacidade de suportar cargas de compressão mais elevadas a posiciona como uma base sólida para pesquisas subsequentes.

Figura 30 Corpo de prova da corrida G12 com 28 dias de cura.



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 30 Corpo de prova da corrida G12 com 28 dias de cura.



Fonte: Elaborado pelos autores

CONCLUSÕES

Fica evidente que a investigação em formulações de argamassas ativadas alcalinamente ofereceu insights valiosos e promissores para futuras aplicações, especialmente considerando a potencial adição de rejeitos da mineração. Dos 27 corpos de prova analisados, destacaram-se as corridas G12 e G30, com a G12 exibindo uma notável resistência à compressão e absorção de água, consolidando-se como uma candidata promissora para formulações geopoliméricas futuras.

A exclusão das amostras G13, G23 e G28, devido ao custo mais elevado do silicato de sódio, destaca a importância de considerações econômicas na elaboração de formulações geopoliméricas, ressaltando a necessidade de equilibrar eficiência técnica com viabilidade financeira. Além disso, a eliminação da G11 devido à eflorescência excessiva enfatiza a necessidade de controlar essa formação de eflorescência a fim de garantir o desempenho adequado dos geopolímeros em aplicações práticas.

A escolha da G12 como potencial formulação base para futuras investigações, incluindo a adição de rejeitos da mineração, representa um avanço significativo, não apenas em termos de desempenho técnico, mas também rumo a práticas sustentáveis na construção civil. Este estudo estabelece uma base sólida para pesquisas subsequentes, visando otimizar as propriedades dos geopolímeros, explorando a aplicação de rejeitos da mineração como agregados, e contribuindo para o desenvolvimento de materiais de construção mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. R. F. V. (2003). **Reciclagem de borra oleosa: uma contribuição para a gestão sustentável dos resíduos da indústria de petróleo em Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Determinação do módulo de finura. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. (2005) NBR 13281:2005:Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto- Requisitos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. (1991) NBR 5732: **Fixa condições exigíveis no recebimento dos** cimentos Portland comuns (CPI e CPI-S), de classes 25, 32 e 4.

BARATA, M. S., ANGÉLICA, R. S. (2011). Atividade pozolânica dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia. **Matéria**, v. 16, p. 797–810. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000300007>

Cerâmica Vermelha. (2023). MARIOTECA SUSTENTÁVEL-UFSC. Disponível em: <https://materioteca.paginas.ufsc.br/ceramica-vermelha/>. Acesso em:10/12/2023.

CESARI, V. F. (2015). **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil, 128 f.

DAVIDOVITS, J. (1991). Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p.1633–1656.<https://doi.org/10.1007/BF01912193>

DUARTE, G. M. C. (2024). **Investigação sobre matérias-primas alternativas para a síntese de materiais ativados em meio alcalino**. Tese (Doutorado Em Engenharia de Materiais) - Centro de Desenvolvimento Da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte

DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., PALOMO, A., &

VAN DEVENTER, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42(9), p. 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., MONZÓ, M., VICENT, M., BARBA, A., & PALOMO, A.

(2008). Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 108, p. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.03.024>

GHARZOUNI, A., SOBRADOS, I., JOUSSEIN, E., BAKLOUTI, S., & ROSSIGNOL, S. (2016). Predictive tools to control the structure and the properties of metakaolin based geopolymer materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 511, p. 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa>

GEYER, A. L. B. (2001). **Contribuição do estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 238f.

LOPES, H. M. T. (2019). **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de são Carlos. <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-04072019-123140>

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. (2012) **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. Arizona: John Wiley & Sons.

NAGALLI, A. (2016). **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. Ed. 1. São Paulo: Oficina de Textos. 175 p.

NEHRING, VICTOR. *et al.* (2021). Utilização da escória de alto forno em materiais cimentícios. Publicado no livro: **CONSTRUÇÃO CIVIL: EM UMA PERSPECTIVA ECONÔMICA, AMBIENTAL E SOCIAL**. cap. 21.

OLIVEIRA, C. N. de (2009). **O paradigma da sustentabilidade na seleção de materiais e componentes para edificações**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação Em Arquitetura e Urbanismo, 197 f.

OLIVEIRA, G. C. (2016). **Desenvolvimento de Argamassa Colante Utilizando Resíduo de Caulim**. Tese de Doutorado em Engenharia Química - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Brasil, 16 p.

OLIVEIRA, M. F. DE., MALUTTA, S., KRAUSE, V. R., GENTIL, B. B., & SENFF, L. (2023). Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso do lodo da estação de tratamento de água. **Brazilian Journal of Development**, 9(8), 23496–23511. <https://doi.org/10.34117/bjdvn8-027>

PALOMO, A., KRIVENKO, P., GARCIA-LODEIRO, I., KAVALEROVA, E., MALTSEVA, O., & FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives. **Materiales de Construcción**, v. 64, p. e022. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>

PAULA, V. V. de. (2017). **Comportamento de tijolos de solo-cimento com adição de escória de alto-forno a esforços de compressão**. Dissertação (Bacharel Em Engenharia de Materiais) -Faculdade de Engenharia Do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP.

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

PROVIS, J. L., DUXSON, P., VAN DEVENTER, J. S. J. (2010). The role of particle technology in developing sustainable construction materials. **Advanced Powder Technology**, v. 21, p. 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2009.10.006>

Reis, M. C. dos. (2019). **Incorporação de resíduos de carvão vegetal em argamassas cimentícias**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. <https://Repositorio.Ufscar.Br/Handle/Ufscar/11428>.

ROCHA, S. D. F., LINS, V. DE F. C., SANTO, B. C. DO E. (2011). Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, p. 1–10. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000100003>

ROY, D. M. (1999). Alkali-activated cements Opportunities and challenges. **Cement and Concrete Research**, 29(2), 249–254. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00093-3)

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. (2001) **Estudo Comparativo entre as Propriedades Mecânicas e Durabilidade de Concretos de Alta Resistência e Convencionais com Cinza de Casca de Arroz**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. Anais... São Paulo: Ibracon.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS-SEBRAE. (2022) **Guia de Sustentabilidade na Construção Civil**. Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais-SINDIFER. (2023). **Anuário Estatístico**. Disponível em: sindifer.com.br. Acesso dia:04/11/2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO-SNIC. (2022). **Relatório Anual**, 2022.

SILVA A. de O. (2019). **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de auto cicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS).

SILVA, W. G. DA. (2020). **Concreto autoadensável com substituição parcial de cimento por finos menores que 75 µm de resíduo de telha cerâmica vermelha: aspectos reológicos e físicos**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.102.2020.tde-30012020-120424>

SOUSA, J. L., SILVA, R. F. G., BRITO, W. S., SILVA, A. L. M. F., SOUZA, J. A. S. (2018). Influência da concentração de NaOH na síntese de geopolímeros a base de lama

vermelha a temperatura ambiente. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, 3104–3107. <https://doi.org/10.5151/cobeq2018-PT.0822>

SPECKHAHN, EDUARDA *et al.*(2023). **Desenvolvimento de argamassas com resíduo de construção civil utilizando o método do triângulo de misturas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

STOLZ, CARINA MARIANE. (2011). **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS.

TRAJANO, MICHELLE DAIANY DA CONCEIÇÃO.(2016). **Aplicabilidade, habitabilidade e sustentabilidade da alvenaria com bloco de concreto aparente em instituições de ensino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8293>.

VASSALO, E. A. S. (2013). **Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado**. Dissertação (Mestrado Em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

WANG, F.; HANNAFIN, M. J.(2005). **Design-based research and technology-enhanced learning environments**. Educational Technology Research & Development.

WHITE, C. E., PROVIS, J. L., PROFFEN, T., RILEY, D. P., VAN DEVENTER, J. S. J. (2010). Density Functional Modeling of the Local Structure of Kaolinite Subjected to Thermal Dehydroxylation. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 114, p. 4988–4996. <https://doi.org/10.1021/jp911108d>

WBCSD, World Business Council for Sustainable Development (2016). Cement Industry energy and CO2 Performance: Getting the Numbers Right (GNR) <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Cement-Industry-Energy-and-CO2-Performan>

¹ Graduação em Engenharia Química – Centro Universitário UNA.