FACULDADE IMED

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA CIVIL

TAÍS DAMIAN COMPARSI

(Engenheira Civil)

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS FINOS DA AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS

PASSO FUNDO

2021

TAÍS DAMIAN COMPARSI

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS FINOS DA AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, na área de concentração de tecnologia no ambiente construído e na linha de pesquisa de desenvolvimento de produtos e tecnologias de processos para a construção, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade IMED.

Orientador: Prof. Dr. Richard Thomas Lermen

PASSO FUNDO

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada POR UM profissional bibliotecário com registro no CRB.

TAÍS DAMIAN COMPARSI

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS FINOS DA AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO NA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS

Dissertação apresentada ao Programa de pós-Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia Civil – da IMED, como requisito para obtenção do grau de Mestre no curso de Engenharia Civil, Escola de Mestre em Engenharia Civil.

Passo Fundo, 04 de outubro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Richard Thomas Lermen (Orientador) – IMED

_____

Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva – IMED

_____

Profa. Dra. Aline Zanchet – SENAI de inovação em engenharia de polímeros

_____

Profa. Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante- IMED

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar essa experiência e todo o conhecimento adquirido até aqui.

A minha família, meus pais, minha irmã e meu cunhado que sempre me incentivaram a fazer mestrado. Enfim, agradeço a todos os familiares que me auxiliaram e apoiaram durante esse período.

Agradeço ao meu namorado Felipe Scolari, pelo apoio nos dias mais difíceis e por sempre me incentivar a dar o meu melhor.

Agradeço também aos meus amigos, que estiveram sempre presentes me incentivando nas minhas batalhas e vibrando minhas conquistas.

Agradeço também ao grupo de amigas que fiz no mestrado, que compartilharam comigo os momentos bons e ruins dessa trajetória.

Agradeço aos professores da Faculdade IMED, em especial ao meu orientador Professor Dr. Richard Thomas Lermen. Obrigado por todo o aprendizado, oportunidades e conhecimento compartilhado.

Agradeço imensamente aos funcionários Rafael Kaiser e Rafael Passos dos laboratórios de Engenharia e Arquitetura e aos demais professores da Faculdade IMED.

RESUMO

A utilização de resíduos do processo de fundição para o desenvolvimento de materiais aplicado à construção civil vem sendo realizada a bastante tempo. Porém, a aplicação em geopolímero é recente e pouco explorada, quando trata-se do uso dos finos desse resíduo. Desta forma, o presente trabalho teve como principal objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de um material geopolimérico desenvolvido com a substituição do precursor convencional (metacaulim) por resíduos finos da areia verde de fundição. Cinco proporções de substituição foram utilizadas nesse trabalho, sendo 0% (corpo de prova referência), 5%, 10%, 15% e 20%. Além disso, diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 e 3,5 foram avaliadas. Os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente em 3 idades (7, 14 e 28 dias) e foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e densidades (seca e saturada). O material também foi submetido à difração de raio-x (DRX) e macrografias, visando a avaliação do material geopolimérico. Como resultados obteve-se que a substituição de RFAVF causou formação de geopolímeros amorfos, com presença do halo amorfo característico no difratograma de raios-x. Entretanto, houve uma redução das resistências mecânicas à compressão com o aumento de substituição, sendo que as maiores perdas ocorreram para o teor de substituição de 20 %, que apresentaram redução em comparação à referência de 11 % e 24 %, para razões molares SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 e 3,5, respectivamente. Além disso, houve o aumento da porosidade e a diminuição da densidade com o aumento do teor de substituição, independente da razão molar SiO_2/Al_2O_3 utilizada. O aumento da porosidade e a heterogeneização da matriz do geopolímero devido a presença de grãos de RFAVF, que não participaram da reação de geopolimerização e possuem baixa densidade, são prováveis causas da diminuição de resistência mecânica à compressão. Entretanto, salienta-se que mesmo que haja a diminuição da resistência à compressão dos geopolímeros devido a substituição de RFAVF, os resultados obtidos se assemelham aos encontrados na literatura. Devido a isso e ao fato que a incorporação do resíduo na produção de geopolímeros tem benefícios ambientais, a utilização de RFAVF é benéfica e pode ser utilizada.

Palavras-chave: Geopolímeros. Resíduos finos de areia da fundição. Propriedades Físicas/Mecânicas.

ABSTRACT

The use of waste from the foundry process for the development of materials applied to civil construction has been made for a long time. However, the application in geopolymer is recent and little explored when it comes to the use of fines from this residue. Thus, the main objective of this paper was to evaluate the physical and mechanical properties of a geopolymeric material, developed with the replacement of the conventional precursor (metakaolin) by fine residues of the foundry green sand. Five substitution proportions had been used in this work, being 0% (reference specimen), 5%, 10%, 15% and 20%. Furthermore different SiO_2/Al_2O_3 molar ratios of 3.0 and 3.5 were evaluated. The specimens were cured at room temperature at 3 ages (7, 14 and 28 days) and were subjected to compressive strength, water absorption, void index and density tests (dry and saturated). The material was also submitted to X-ray diffraction (XRD) and macrographs, in order to evaluate the geopolymer material. As a result, it was found that the replacement of FGSFW caused the formation of amorphous geopolymers, with the presence of the characteristic amorphous halo in the x-ray diffractogram. However, there was a decrease in the mechanical resistance to compression with the increase in replacement, with the greatest losses occurring for the substitution content of 20%, which presented a reduction compared to the reference of 11% and 24%, for molar ratios SiO_2/Al_2O_3 of 3.0 and 3.5, respectively. Furthermore, there was an increase in porosity and a decrease in density with the increase in the replacement content, regardless of the SiO_2/Al_2O_3 molar ratio used. The increase of porosity and the heterogenization of the geopolymer matrix due to the presence of FGSFW grains, which did not participate in the geopolymerization reaction and have low density, are likely causes of the decrease in mechanical strength to compression. However, it is noteworthy that even if there is a decrease in the compressive strength of geopolymers due to the replacement of FGSFW, the results obtained are similar to those found in the literature. Due to this and the fact that the incorporation of waste in the production of geopolymers has environmental benefits, the use of FGSFW is beneficial and can be used.

Keywords: Geopolymers. Foundry green sand fine waste. Physical/Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de formação das cinzas durante a combustão do carvão mineral. 19
Figura 2 - Fases da geopolimerização. 21
Figura 3 - Aplicações dos geopolímeros. 27
Figura 4 - Fluxograma do processo de fundição. 28
Figura 5 - Micrografia de um geopolímero com substituição de 70% de resíduos de areia de fundição.....34
Figura 6 - Fluxograma do programa experimental 36
Figura 7 - Dispositivo utilizado para o processamento do RAVF.....37
Figura 8 - Granulometria metacaulim 38
Figura 9 - Granulometria dos resíduos finos da areia verde de fundição 39
Figura 10 - Difratograma do Metacaulim 40
Figura 11 - Difratograma dos resíduos finos da areia verde de fundição 40
Figura 12 - Análise TGA dos resíduos finos da areia verde de fundição.....42
Figura 13 - MEV dos resíduos finos da areia verde de fundição. 43
Figura 14 – Corpos de prova moldados. 46
Figura 15 - Diagrama ternário relacionado ao conteúdo de Na_2O, SiO_2 e Al_2O_3.....48
Figura 16 - Resistência à compressão em relação ao percentual de substituição para diferentes tempos de cura e razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 49
Figura 17 - Resistência à compressão em relação ao percentual de substituição para diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura de 28 dias.....50
Figura 18 - Índice de vazios em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.....53
Figura 19 - Absorção de água em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.....53
Figura 20 - Densidade saturada em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.....56
Figura 21 - Densidade seca em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.....56
Figura 22 - Difratogramas dos materiais geopoliméricos com razão molar SiO_2/Al_2O_3 igual a 3.....57

Figura 23 - Difratogramas dos materiais geopoliméricos com razão molar SiO_2/Al_2O_3 igual a 3,5.....57
Figura 24 - Macrografias das amostras de geopolímeros com escala de 5 mm. (a) Geo 1, (b) Geo 2, (c) Geo 3, (d) Geo 4, (e) Geo 5, (f) Geo 6, (g) Geo 7, (h) Geo 8, (i) Geo 9 e (j) Geo 10. 58
Figura 25 - Macrografias das amostras de geopolímeros com escala de 1 mm. (a) Geo 1, (b) Geo 2, (c) Geo 3, (d) Geo 4, (e) Geo 5, (f) Geo 6, (g) Geo 7, (h) Geo 8, (i) Geo 9 e (j) Geo 10. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição escória de alto-forno.....18
Tabela 2 - Composição química da Cinza Volante.....20
Tabela 3 - Razões molares com maior desempenho para geopolímeros. 23
Tabela 4 - Impacto de altas temperaturas na resistência à compressão (F_{cm}) de geopolímeros.....24
Tabela 5 - Resultados de resistência mecânica à compressão de pesquisas relacionadas a utilização de resíduos de areia de fundição na produção de geopolímeros.....35
Tabela 6 - Características físicas do Metacaulim 39
Tabela 7 - Características físicas dos resíduos finos da areia de fundição 39
Tabela 8 - Composição química do metacaulim e dos resíduos finos da areia verde fundição.....41
Tabela 9 - Características físicas e químicas do silicato de sódio.....44
Tabela 10 - Matriz experimental. 45
Tabela 11 - Análise de variância para a resistência à compressão com razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 50
Tabela 12 - Análise de variância para a resistência à compressão e tempo de cura de 28 dias.....51
Tabela 13 - Análise de variância para o índice de vazios 54
Tabela 14 - Análise de variância para a absorção de água 54
Tabela 15 - Análise de variância para a densidade saturada.....55
Tabela 16 - Análise de variância para a densidade seca 55

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Al_2O_{3-} Óxido de alumínio

ASTM - American Society for Testing and Materials.

CO_2 - Dióxido de carbono

CV- Cinza Volante

DRX – Difração de raio-X

EAF- Escória de alto forno

EGAF- Escória granulada de alto forno

FRX- Fluorescência de raio-X

MK- Metacaulim

MEV – Microscopia eletrônica de varredura.

MPa – Mega Pascal.

Ms- Módulo de sílica

NaOH- Hidróxido de sódio

$NaSiO_3$- Silicato de sódio

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

RFAVF – Resíduo Fino da Areia Verde de Fundição

SiO_{2-} Dióxido de silício

SS- silicato de sódio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 14
2 REVISÃO DA LITERATURA 16
2.1 GEOPOLÍMEROS 16
2.1.1 Matérias-primas 16
2.1.1.1 Precursores 17
2.1.1.2 Ativadores 20
2.1.2 Processo de geopolimerização 21
2.1.3 Fatores que influenciam no processo de geopolimerização 22
2.1.3.1 Dosagem 22
2.1.3.2 Tamanho das partículas do material sólido 23
2.1.3.3 Temperatura de cura 24
2.1.3.4 Quantidade de água 25
2.1.4 Vantagens e desvantagens dos geopolímeros 25
2.1.5 Aplicações dos geopolímeros 26
2.2 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO 28
2.2.1 Processo de fundição 28
2.2.2 Areia de fundição 29
2.2.2.1 Tipos de areia de fundição 29
2.2.2.2 *Resíduo fino da Areia Verde de Fundição* 30
2.2.3 Aplicação do resíduo de areia de fundição na construção civil 31
2.2.4 Aplicação do resíduo de areia de fundição em geopolímeros 33
2.2.4.1 Microestrutura 33
2.2.4.2 Propriedades mecânicas 34
2.3 LACUNA DO CONHECIMENTO 35
3 MATERIAIS E MÉTODOS 36
3.1 MATERIAIS 37
3.1.1 Precursores 37
3.1.2 Ativadores 43
3.2 MÉTODOS 44
3.2.1 Projeto de experimentos 44

3.2.2 Sintetização dos materiais geopoliméricos 45
3.2.3 Caracterização dos geopolímeros 46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 48
4.1 FORMAÇÃO DO GEOPOLÍMERO 48
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 48
4.3 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA E DENSIDADES 52
4.4 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X 57
4.5 CARACTERIZAÇÃO POR IMAGEM 58
5 CONCLUSÕES 60
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 61
REFERÊNCIAS 62

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de fundição, a moldagem em areia é o processo mais utilizado. No processo, a areia silicosa é misturada a um aglomerante (argila, resina) e água. A moldagem em areia é bastante utilizada por ser mais econômica em relação a outros processos de produção de moldes e por permitir uma produção de qualidade. Para a realização do seu processo, as fundições utilizam toneladas de areia por ano, estima-se que para cada tonelada de metal fundido obtenha-se por volta de uma tonelada de areia descartada (KLINSKY, 2008). No cenário mundial, o Brasil é o 10º produtor de fundidos, produzindo cerca de 2,3 milhões de toneladas, ou seja, 2,3 milhões de toneladas de areia descartada (ABIFA, 2019).

Existem dois tipos de areias de moldagem: “areia verde” e a “areia fenólica”, que são definidas conforme o ligante empregado. Para confeccionar os moldes, que dão forma às superfícies externas da peça a ser fundida, é utilizado a areia aglomerada com argila (areia verde), já para confeccionar os machos, que formam as superfícies internas das peças, é utilizada as areias aglomeradas com resinas sintéticas, que geralmente são de origem fenólica (areia fenólica) (COUTINHO, 2004).

Atualmente, a areia verde é descartada em aterros. Há muitos casos nos quais as empresas geradoras não utilizam esse meio apropriado, descartando os resíduos em locais como, por exemplo, lixões e aterros clandestinos, o que ocasiona graves impactos ambientais. Assim, faz-se necessário a obtenção de técnicas para reaproveitamento desse resíduo e a indústria da construção civil possui potencial na solução desta problemática.

Existem diversas abordagens sobre o reuso desse resíduo, sendo os principais na utilização do resíduo no desenvolvimento de concretos, argamassas (MONOSI; SANI; TITTARELLI, 2010; SEBKI; SAFI; CHAHOUR, 2019; SRIVASTAVA; SINGH, 2020), materiais para rodovias (PARTRIDGE et al., 1999), misturas asfálticas densas (COUTINHO, 2004), pisos intertravados (PATEL; PITRODA, 2013; THEJAS; HOSSINEY, 2020), entre outros.

Outra possibilidade de aplicação dos resíduos da areia de fundição é a fabricação de materiais geopoliméricos. Os geopolímeros são agentes ligantes produzidos a partir de um aluminossilicato reativo, que endurecem à temperatura ambiente ou às vezes é necessário incremento de temperatura, em um período curto de tempo (2 a 48 horas) (DAVIDOVITS, 1994). Os geopolímeros são, normalmente,

produzidos pela combinação de um material precursor como o metacaulim, cinza volante ou escória de alto forno e com um ativador, que deve ser um reagente químico altamente alcalino (BELL; DRIEMEYER; KRIVEN, 2009).

Quando em comparação ao cimento Portland, os geopolímeros diminuem as taxas de emissão de CO_2, pois não utilizam do processo de clinquerização, reduzindo ainda o consumo de energia (DUXSON *et al.*, 2007). Segundo a pesquisa realizada por Borges *et al*. (2014), o emprego de concretos geopoliméricos ao invés do concreto de cimento Portland pode possibilitar a redução de cerca de 72,4% da emissão de CO_2, além de diminuir a quantidade de energia necessária na fabricação do concreto em 45,8%.

Vargas *et al*. (2015) utilizaram o resíduo de areia verde de fundição em substituição a mistura de precursores (cinza volante e metacaulim). Nesse estudo, os melhores resultados de resistência à compressão ocorreram com percentual de 25% de substituição dos precursores (mistura de cinza volante com metacaulim) por resíduo de areia verde da fundição. Os mesmos autores sugerem estudos com menores percentuais de substituição para encontrar um valor otimizado.

Venkatesan *et al.* (2019) utilizaram os resíduos de areia de fundição e cinzas volantes para síntese de materiais geopolimérico e concluíram que o estudo realizado pode ser útil para otimizar a utilização de materiais residuais em produtos úteis.

Bhardwaj e Kumar (2019) avaliaram a influência da inclusão de resíduos de areia de fundição em concretos geopolimérico (material álcali-ativado). A adição do resíduo de areia de fundição em substituição a areia natural reduziu a trabalhabilidade dos concretos geopolímeros, porém aumentou em, aproximadamente, 43% a resistência mecânica à compressão quando utilizado 60% de substituição da areia natural pelo resíduo de areia de fundição. Acima de 60% de substituição observou-se diminuição da resistência à compressão.

Patiyal, Kumar e Sharma (2016) verificaram a eficácia da areia de fundição utilizada como substituto parcial do agregado fino no concreto geopolimérico e concluíram ser um possível material para minimizar custos na construção, pois a areia de fundição é um resíduo disponível e mais barato. Elakyah *et al*. (2019) também analisaram alguns parâmetros como resistência à compressão dos concretos geopoliméricos com adição de areia de fundição e chegaram à conclusão que a substituição do agregado fino do concreto geopolimérico por areia de fundição é promissor.

Thaarrini e Ramasamy (2016) estudaram as propriedades dos geopolímeros realizados à base de areia de fundição e os resultados mostraram que a resistência é satisfatória, pois apresentaram resultados acima da resistência desejada de 30MPa.

Apithanyasai, Supakata e Papong (2020) estudaram a produção de tijolos geopoliméricos com areia de fundição e concluíram que a produção de tijolos geopoliméricos pode diminuir o impacto ambiental, podendo ser um uso para os resíduos industriais.

Doğan-Sağlamtimur (2018) estudou a reutilização da areia de fundição em geopolímero e concluiu que o uso é adequado como revestimento de parede.

Muitos estudos de aplicabilidade dos resíduos da fundição foram e estão sendo realizados por vários pesquisadores como descrito anteriormente. Porém, no quesito de uso do resíduo da areia verde de fundição no desenvolvimento de materiais geopoliméricos as pesquisas ainda são consideradas preliminares, principalmente quando utilizado apenas os resíduos finos da areia verde de fundição. A diminuição do tamanho médio da partícula pode gerar o aumento da área superficial e de contato de modo a acelerar o processo de geopolimerização e, consequentemente, o aumento da resistência mecânica do material. O tamanho da partícula influencia significativamente a cinética de geopolimerização e, portanto, nas propriedades mecânicas dos geopolímeros (ZHANG *et al*., 2020). Diante desse contexto, o presente estudo propõe-se a avaliar o comportamento de um geopolímero desenvolvido com substituição de metacaulim por resíduo fino de areia verde de fundição.

1.1 Objetivos

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de um geopolímero desenvolvido com resíduos finos da areia verde de fundição (RFAVF) em substituição ao precursor base (metacaulim). Para atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram aderidos:

- Caracterizar os precursores (RFAVF, metacaulim) quanto a características químicas, físicas e mineralógicas (massa específica, granulometria a laser, DRX, FRX, TGA e MEV);
- Determinar as características físicas e comportamento dos geopolímeros desenvolvidos com diferentes teores de RFAVF (Resistência à

compressão, densidade seca e saturada, absorção de água, índices de vazios, DRX e macrografias).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GEOPOLÍMEROS

O termo geopolímero refere-se a um produto originado de uma reação específica entre aluminossilicato sólido e uma solução aquosa de um silicato ou hidróxido alcalino (DAVIDOVITS, 1994). Davidovits, em 1979, criou e introduziu o termo geopolímero, tendo patenteado o produto das suas investigações sobre a polimerização do metacaulim. Segundo Pinto (2006) é possível dizer que o desenvolvimento deste novo material possui duas grandes linhas de atuação:

- Uma dirigida à obtenção de materiais de baixo custo, para utilização em grandes quantidades, como materiais de construção. Neste tipo de materiais as matérias-primas de base podem ser, além dos metacaulins, as escórias granuladas, as cinzas volantes e, em termos gerais, todos os aluminossilicatos em que a razão molar Si/Al varie de 1 a 3.
- Uma segunda linha dirigida à obtenção de materiais mais sofisticados, ainda que mais caros, podendo inclusivamente admitir-se a incorporação de fibras de vários tipos (amianto, carbono, vidro, etc.). Estes materiais poderão, de acordo com Davidovits, substituir os plásticos, certos metais e mesmo os produtos cerâmicos. Nesta linha de atuação, o material básico é o metacaulim, que sofrerá as correções do teor em sílica que cada tipo de material pode implicar.

2.1.1 Matérias-primas

Os ligantes geopoliméricos podem usar como matéria-prima qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina e que tenha sido realizado um tratamento térmico que torne o material amorfo (GEO-POL, 2019).

A seguir, os três principais materiais precursores foram referenciados (escória de alto forno, cinza volante e metacaulim), com ênfase no metacaulim, por se tratar do material escolhido como precursor base nesse trabalho. Também foi apresentada a descrição dos principais ativadores.

2.1.1.1 Precursores

Dá-se o nome de precursor à matéria-prima fonte de silicato ou aluminossilicato, tais como metacaulim, escória de alto forno e cinza volante.

O metacaulim é um material pozolânico amorfo obtido por método industrial de ativação térmica, que ocorre entre as temperaturas de 600 ºC e 850 ºC, e moagem de argilas caulinitas e caulins. Essas matérias primas são compostas principalmente por silicato de alumínio hidratado [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$], que perdem os íons hidroxilas de sua estrutura cristalina com a calcinação, transformando-se em metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$), composto constituído por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina e com alta finura (CUNHA; FORTI; SILVA, 2010).

O caulim é um minério a base de aluminossilicato hidratado com suas jazidas localizadas próximas a superfície terrestre. Tem alta importância em diferentes setores da indústria. No Brasil, os principais consumidores são os setores de produção de papel e cerâmicas, representando 6,4% da produção mundial, ficando na quinta posição mundial entre os produtores do material. A produção nacional é de, aproximadamente, 2 milhões de toneladas por ano.

O metacaulim é um dos precursores mais utilizados para a produção de geopolímeros, devido à sua alta reatividade que está relacionada ao tamanho da partícula, pureza e cristalinidade do caulim utilizado (PROVIS; BERNAL, 2014). Na composição do metacaulim, é possível encontrar compostos eficazes para a fabricação de geopolímeros, contendo, aproximadamente, 52% e 40% de SiO_2 e Al_2O_3, respectivamente. Os outros 8% são considerados impurezas, compostas por quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006).

A escória de alto forno é um subproduto do processo metalúrgico (com geração estimada entre 70 a 170 kg/t de aço bruto), sendo obtida durante a redução do minério de ferro. A sua constituição química corresponde a uma mistura de óxidos, silicatos metálicos, metais nas suas formas elementares, tendo como componentes básicos os óxidos de Ca, Fe, Mg e Al. A mesma possui uma composição química parecida com a do clínquer de cimento Portland (ROSSA JR.; PORTELLA, 2012). A composição química das Escórias de Alto-Forno depende das matérias-primas e do tipo de gusa fabricado. O teor de cada composto encontrado na escória de alto-forno está exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição escória de alto-forno

Composto	Teor (%)
CaO	41,60
SiO_2	33,65
Al_2O_3	12,42
MgO	7,95
TiO	0,73
FeO	0,45

Fonte: ArcelorMittal (2021)

A grande responsável pela reutilização desse resíduo, é a indústria cimenteira, como adição na fabricação de cimentos, mais especificamente os cimentos CPII-E (Cimento Portland Composto, que pode conter até 35% de EAF) e CPIII (Cimento Portland de Alto Forno, que contém até 70% de EAF), de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018).

Rossa e Portella (2012) investigaram o uso da adição da escória de forno em argamassa colante tipo ACI, em substituição ao cimento Portland, os resultados indicaram a potencialidade do seu uso, com resistência de aderência à tração similar às amostras de referência e mais altas do que as recomendações normativas.

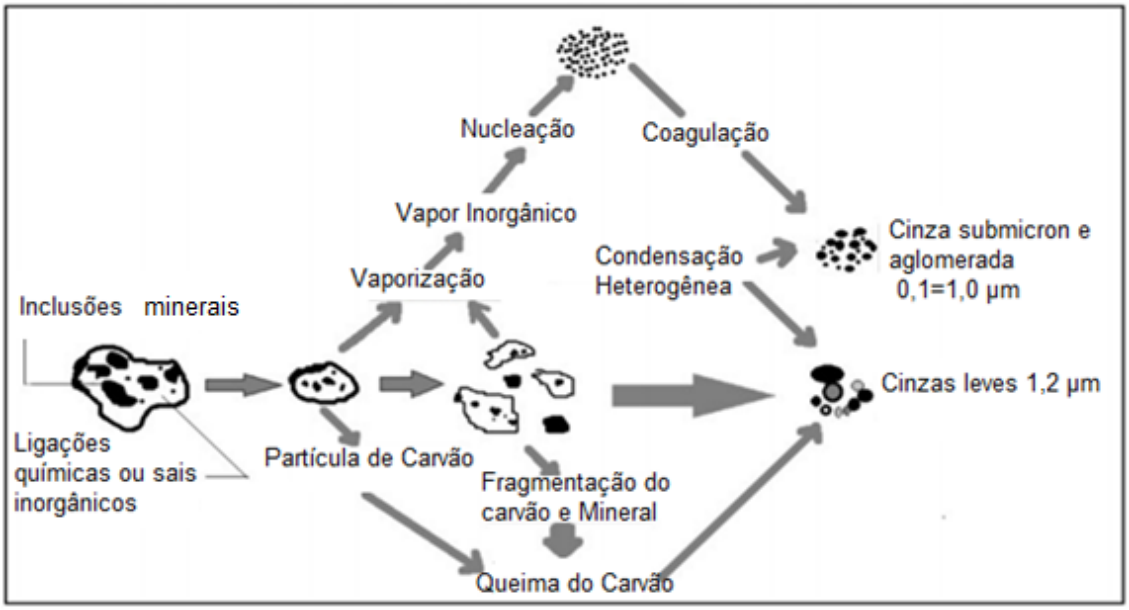
Pimentel (2018) investigou a caracterização física, química, mineralógica e as propriedades pozolânicas da EAF e conclui que a mesma possui uma massa específica semelhante à dos cimentos devido a sua composição química e mineralógica, além disso a EAF apresentou-se como um material inerte, podendo ser utilizado dessa forma, como material suplementar ao agregado natural para a produção de concretos e argamassas.

A cinza volante (CV) também é um material amplamente estudado como precursor para produção de geopolímeros. A geração da cinza volante ocorre pela queima do carvão mineral em usinas termelétricas, a mesma contém elevado teor de sílica e alumina. A sua formação ocorre durante a fase de combustão do carvão pulverizado, quando o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno. A matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maior parte das impurezas minerais (argilas, o quartzo, e o feldspato) fundem-se a elevada temperatura. O material fundido é ligeiramente transportado para zonas de mais baixa temperatura, onde se materializa em partículas esféricas. Parte da matéria mineral acumula formando cinza

de fundo, mas a maior parte dela é arrastada pela corrente de exaustão do gás e é chamada de cinza volante (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A formação das cinzas está relacionada com uma sequência complexa de mecanismos desencadeados pela combustão do carvão, conforme Figura 1.

Figura 1 - Processo de formação das cinzas durante a combustão do carvão mineral.



Fonte: KNUDSEN (2010)

As propriedades químicas de cinzas volantes são determinadas pela composição do carvão mineral e pelas técnicas utilizadas para manuseio e armazenamento. Existem basicamente quatro estágios de formação dos carvões minerais (antracito, betuminoso, sub-betuminoso e linhito), que mudam de acordo com o seu poder calorífico, a sua composição química, teor de cinzas geradas e origem geológica (AHMARUZZAMAN, 2010).

As cinzas volantes podem ser classificadas em duas categorias: classe C e F. Quando a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro for superior a 70%, a cinza volante é classificada como de Classe F. Na cinza volante de Classe C esta soma precisa ser superior a 50%. A cinza volante é um material formado pela combinação de fases amorfas ou vítreas (60-90%) e fases cristalinas. As quais são compostas principalmente por silicatos (SiO_2, 35- 60%), alumina (Al_2O_3, 10-30%), óxidos de ferro (Fe_2O_3, 4-20%) e de cálcio (CaO, 1- 35%) (ASTM, C618).

A CV é muito empregada pela indústria de cimento Portland como adição mineral, pois o seu custo é menor quando comparado com outros materiais pozolânicos. No Brasil, a CV é utilizada em dois tipos de cimento Portland, CP II-Z pode conter até 25% de CV e CP IV até 50% da adição, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Na Tabela 2 é possível observar a composição química da Cinza Volante.

Tabela 2 - Composição química da Cinza Volante.

Composto	Teor (%)
Na_2O	0,94
MgO	1,84
Al_2O_3	16,39
SiO_2	42,53
P_2O_5	0,19
K_2O	1,61
CaO	19,01
TiO_2	0,89
MnO	0,07
Fe_2O_3	7,08
SO_3	9,20
ZnO	0,01
Rb_2O	0,01
SrO	0,04
BaO	0,09

Fonte: FERREIRA *et al.* (2014)

2.1.1.2 Ativadores

A natureza e a concentração dos ativadores influenciam diretamente na estrutura e nas propriedades mecânicas dos produtos originados na geopolimerização. A escolha do ativador deve basear-se nas características dos precursores de origem (BEZERRA *et al*., 2013).

No entanto, tanto a falta ou o excesso de ativadores na solução pode gerar perda de resistência e patologias. Também, a quantidade de ativadores pode influenciar no tempo para a evaporação da água existente em excesso na mistura. Os ativadores mais utilizado na fabricação de geopolímeros são os hidróxidos e silicatos a base de sódio (LIVI, 2013).

A utilização de hidróxido de sódio (NaOH) como ativador em pastas geopoliméricas é vastamente empregada, pois é barato e possui uma maior disponibilidade no comércio (PROVIS, 2009). No entanto, o uso de NaOH apresenta algumas desvantagens como, por exemplo, ser altamente corrosivo, o que requer equipamentos apropriados para sua mistura. Além disso, há uma tendência de

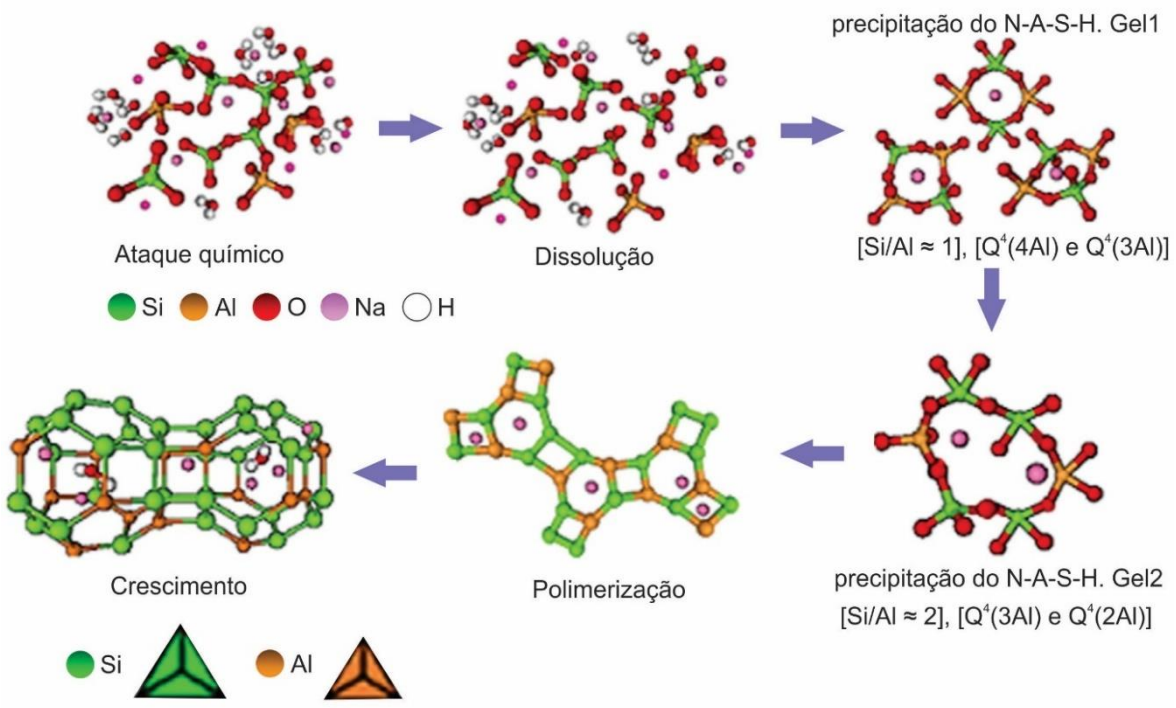
formação de eflorescência devido à baixa reatividade antes do endurecimento, o que leva a formação de uma solução rica em álcalis. Dessa forma, é importante encontrar a concentração ideal de ativação, evitando o excesso de álcalis na mistura (PROVIS; BERNAL, 2014).

O silicato de sódio é um ativador muito empregado em geopolímeros, por possuir processo de produção simples, tornando seu preço mais acessível. Esse ativador é, geralmente, produzido a partir da calcinação de um carbonato de sódio (Na_2CO_3) com areia natural de quartzo (SiO_2) em uma temperatura entre 1400 e 1500 °C (FOLETTO *et al.*, 2006).

2.1.2 Processo de geopolimerização

O processo de formação dos geopolímeros, também conhecido como geopolimerização, ocorre em diferentes passos. Primeiramente, ocorre a dissolução dos precursores em uma solução alcalina, liberando os aluminatos e silicatos na forma de monômeros, como exemplificado na Figura 2 (ALVARENGA, 2018; SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

Figura 2 - Fases da geopolimerização.



Fonte: ADAPTADO DE SHI, JIMÉNEZ E PALOMO (2011)

Em seguida, as moléculas começam se aglutinar e formar moléculas que irão se precipitar e formar um gel com pequeno grau de ordem estrutural rico em Al. Esse gel é formado por anéis oriundos da ligação dos tetraedros de Si e Al, sendo que os cátions neutralizadores das cargas elétricas se posicionam nas aberturas da estrutura,

Conforme a reação da geopolimerização ocorre, a dissolução de SiO_2 avança, fornecendo Si para o meio e favorecendo a formação de um novo gel em que que a razão de Si para Al é quase o dobro.

Por fim, ocorre a polimerização e o crescimento, como salientado por Alvarenga (2018), essa estrutura é observável na escala nanométrica e atômica, o que de fato é observado em escala microestrutural é um gel aluminossilicato amorfo (N-A-S-H) com composição química variada dependendo dos materiais utilizados na fabricação dos geopolímeros.

2.1.3 Fatores que influenciam no processo de geopolimerização

2.1.3.1 Dosagem

A dosagem dos geopolímeros ainda não está bem estabelecida, uma vez que diversos fatores podem interferir e alterar a formação das características desejáveis. Alguns dos fatores são: o material precursor, os ativadores, as condições de cura, o grau de reatividade dos precursores e o índice de amorfismo. Devido às diferentes composições químicas e estruturas físicas dos materiais utilizados e às diversas condições de ativação, são encontradas na literatura diferentes relações utilizadas para produzir geopolímeros. Contudo, por ser uma tecnologia nova, não existem padronizações nos parâmetros de dosagem.

O tipo, a dosagem e a concentração do ativador devem ser estudados em função do precursor, pois a composição química e o grau de finura condicionam a reação de ativação. Assim, em função das matérias-primas disponíveis, é imprescindível proceder a um estudo de composição que conduza à otimização dos resultados através da modificação da constituição química de partida (PINTO, 2006).

A dosagem de geopolímeros tem um nível de detalhamento e controle muito alto, tornando-a complexa. Os parâmetros mais utilizados para o controle da dosagem são: as relações molares entre os componentes e fator liquido sólido. Além disso,

existem parâmetros de mistura e cura, os quais dependem principalmente do tipo de precursor utilizado (NG *et al*., 2018).

A determinação de um bom precursor inicia com sua quantidade de sílica e alumina, estes valores são obtidos através da análise de fluorescência de raios X (FRX), podendo obter a quantidade de óxidos que existem no precursor. Entretanto, é indispensável conhecer outras características do precursor como a sua cristalinidade e as suas fases reativas (DUXSON; PROVIS, 2008).

O módulo de sílica, normalmente é alterado de acordo com o precursor utilizado. Usualmente quanto menor a reatividade do precursor, maior a alcalinidade necessária para dissolvê-lo. Por isso, para a produção de geopolímeros a partir de materiais pouco reativos é necessário maior teor de sódio na solução de ativação, ou seja, valores de módulo de sílica (MS) baixos. Porém, valores elevados para o MS indicam maior quantidade de sílica, o que favorece elevadas resistências mecânicas iniciais (FOSCARINI, 2019).

Outro fator que deve ser levado em consideração, são as razões molares e as mais importantes na dosagem de um geopolímero são: SiO_2/Al_2O_3; Na_2O/Al_2O_3; H_2O/Na_2O; Na_2O/SiO_2. Para determinar a dosagem dos geopolímeros no presente trabalho, os intervalos das razões molares encontradas na Tabela 3 foram consideradas.

Tabela 3 - Razões molares com maior desempenho para geopolímeros.

Razão molar dos óxidos	**Intervalo**
SiO_2/Al_2O_3	3,50 - 4,50
Na_2O/Al_2O_3	0,80 - 1,20
H_2O/Na_2O	15 - 17,50
Na_2O/SiO_2	0,20 - 0,28

Fonte: adaptado de Davidovits (1989, apud LIEW *et al.* (2016), p. 616).

2.1.3.2 Tamanho das partículas do material sólido

Matérias-primas com partículas menores geram ganhos de resistência mecânica, pois tem-se uma maior área de contato para que ocorra a geopolimerização. Conforme os estudos realizados por Boschi, Lot e Melchiades (2016) foi possível afirmar que quando existe o aumento de área superficial do metacaulim, existe um impacto bastante positivo na qualidade do produto final.

Pacheco-Torgal e Labrincha (2013) concluíram que o uso de partículas em escala nanométricas, melhoram o desempenho mecânico e na durabilidade.

Zhang *et al*. (2020) investigaram os efeitos do tamanho da partícula em geopolímeros a base de escória de vidro residual e de cinza volante de vidro residual e concluíram que o tamanho da partícula influencia significativamente na cinética de geopolimerização e, portanto, nas propriedades mecânicas dos geopolímeros. Pois, quanto menor as partículas, mais fácil e mais rápida se torna a reação com o ativador alcalino e a geopolimerização.

2.1.3.3 Temperatura de cura

Conforme o estudo realizado por Neto e Godinho (2017), que visava avaliar o comportamento do concreto geopolimérico com adição de óxido de alumínio, quando submetido à altas temperaturas. Ao avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais, foi possível observar que, ambos os concretos apresentaram alterações na resistência à compressão axial após exposição à altas temperaturas. Porém, o geopolímero sem adição apresenta um aumento de resistência até a temperatura de 100 ºC, já o geopolímero com adição de óxido de alumínio melhorou suas características até a temperatura de 400 ºC. Os resultados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Impacto de altas temperaturas na resistência à compressão (F_{cm}) de geopolímeros.

Concreto	Temperatura (°C)	Fcm (MPa)
Geopolimérico sem Adição	23	16,27
	100	24,73
	400	12,50
	800	6,60
Geopolimérico com Adição	23	5,30
	100	7,53
	400	9,53
	800	3,90

Fonte: Adaptado de Neto e Godinho, 2017.

Zhang *et al.* (2020) investigou o efeito da temperatura de cura em geopolímeros com as seguintes temperaturas: 20°C, 50°C, 80°C, 100°C. As temperaturas de cura de 80°C e 100°C foram as que obtiveram melhores resultados de resistência à compressão.

Entretanto, Vaidya, Diaz e Allouche (2011) verificaram que mesmo quando curados pelo calor gerado através da própria reação de polimerização, os produtos geopoliméricos podem atingir resistências superiores a 40 MPa.

Segundo a pesquisa realizada por Pinheiro (2017), é possível afirmar que, em geral, a temperatura de cura tem influência na resistência à compressão dos geopolímeros à base de metacaulim. Observou-se que a resistência à compressão final dos corpos de prova curados em condições adiabáticas é inferior à apurada para os corpos de prova curados em condições ambientais.

2.1.3.4 Quantidade de água

No processo de geopolimerização, a água confere plasticidade à mistura e é essencial para o processo de dissolução dos compostos, além de ser o meio onde acontece a policondensação.

Quanto a resistência à compressão, a água desempenha fator importante. Para que as reações de geopolimerização possam acontecer, é necessário a presença da água. Entretanto, a água em excesso na dosagem pode afetar a durabilidade dos geopolímeros devido a um aumento na porosidade. Isso ocorre devido a água tornar o pH da solução ativadora mais alcalino, o que reduz a dissolução do metacaulim e como consequência pode-se ter um material mais poroso no estado endurecido (FOSCARINI, 2019). Por outro lado, quando o teor de água é elevado, existe a tendência de formação de cristais maiores, diminuindo a área de superfície específica, levando a diminuição na resistência do material sintetizado (OLIVIA; SARKER; NIKRAZ, 2008).

Wei *et al*. (2019) estudou a influência do teor de água na resistência mecânica de geopolímeros em regiões frias e polares. Os resultados mostraram que o menor teor de água é benéfico para melhorar a resistência inicial da argamassa geopolimérica em condições de cura de −5 °C, embora tenha pouco impacto na resistência a longo prazo.

2.1.4 Vantagens e desvantagens dos geopolímeros

Diferente do cimento Portland comum, como citado anteriormente, a produção de geopolímeros são menos agressivos ao meio ambiente, pois não emitem CO_2 para atmosfera. Além da vantagem ecológica, os geopolímeros possuem características físico-químicas que garantem um rápido desenvolvimento mecânico, 20 MPa em até

4 horas à temperatura ambiente, e excelente resistência química (BORGES *et al*., 2014; DAVIDOVITS, 1994).

Outros pontos que podem ser destacados sobre as vantagens da utilização dos geopolímeros: não há susceptibilidade a ocorrência de manifestações patológicas comuns aos materiais produzidos com cimento Portland como, por exemplo, reação alcáli-agregado (DAVIDOVITS, 1994); são resistentes as alterações causadas pela exposição a altas temperaturas, pode ser produzidas estruturas mais resistentes aos incêndios (KONG; SANJAYAN, 2010).

Por outro lado, os materiais geopoliméricos possuem algumas desvantagens. Pode-se citar que os geopolímeros possuem comportamento frágil, podendo inviabilizar sua utilização em algumas aplicações. Para contornar esse comportamento pode-se utilizar o reforço por fibras, aumentando sua resistência à flexão e a sua resistência à fratura (AMARAL ALVES; NOGUEIRA, 2020). Além disso, há uma tendência de retração e ao aparecimento de fissuras por secagem, devido à alta demanda de água pelos reagentes, causada pela alta área superficial dos grãos de metacaulim (BERNAL *et al*., 2011).

2.1.5 Aplicações dos geopolímeros

O geopolímero pode ser utilizado em materiais de construção e pavimentação, materiais resistentes ao fogo, telhas cerâmicas, materiais refratários e materiais de fundição, até materiais compósitos, sistemas de resinas de alta tecnologia, além de servirem de barreira de contenção para resíduos tóxicos e radioativos (DAVIDOVITS, 2002). Além de também poderem ser usados como revestimentos, adesivos, ligantes para compósitos de fibras, além de servir como encapsulamento de resíduos e agente cimentício para concretos (DAVIDOVITS, 1994).

Davidovits (2002) também afirma que a equipe de Fórmula 1 de Benetton projetou uma blindagem térmica feita de geopolímero, essas peças resistiram à vibração e ao calor (acima de 700 graus °C). Ainda hoje, a maioria das equipes de Fórmula 1 estão usando materiais compostos por geopolímeros.

Uma outra aplicação consiste na estabilização de solos brandos, de natureza argilosa, onde o desempenho geotécnico é normalmente precário (PINTO, 2006).

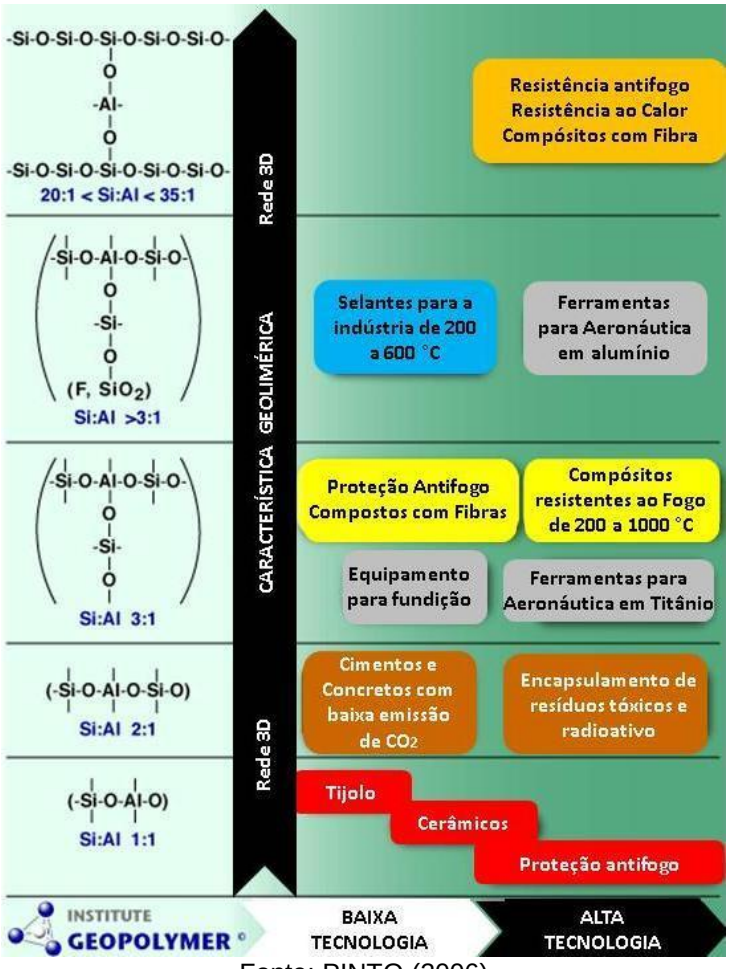
Fornasa (2017) estudou a produção de uma argamassa geopolimérica e concluiu, a partir dos resultados que a mesma pode ser utilizada para a fabricação de argamassas ecologicamente corretas.

Brito (2018) estudou a utilização do resíduo de cinza volante e metacaulim na produção de geopolímeros e os resultados da pesquisa demonstraram que quando ativados com silicato de sódio e hidróxido de sódio, são uma alternativa para possível aplicação de materiais geopoliméricos na construção civil.

Na Figura 3 é possível observar outras aplicações dos geopolímeros levando em consideração a relação Si:Al.

É possível observar que os geopolímeros tem uma vasta gama de aplicações potenciais e apresentam vantagens tecnológicas e também ambientais. Não há emissão de CO_2 em sua produção e é possível reutilizar resíduos industriais. Contudo, ainda é necessário aumentar o conhecimento sobre esses materiais para conseguir torná-los economicamente viáveis em utilizações generalizadas (SIMÕES, 2012).

Figura 3 - Aplicações dos geopolímeros.



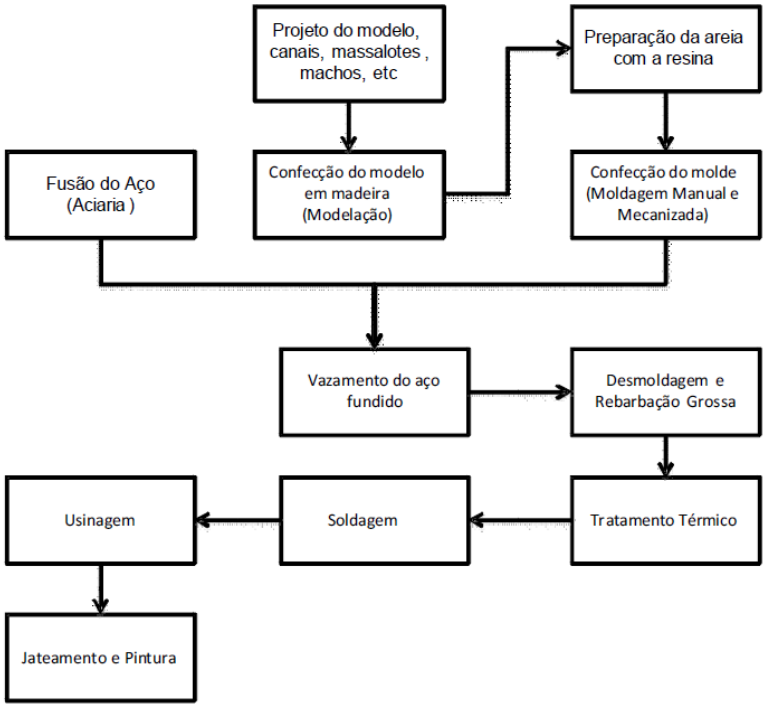
Fonte: PINTO (2006)

2.2 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

2.2.1 Processo de fundição

A atividade de fundição é um dos mais antigos processos de fabricação de peças utilizadas no mundo. A indústria de fundição fornece produtos para indústrias de diversos segmentos como a automobilística, construção ferroviária e naval, máquinas e implementos agrícolas. A mesma, permite a produção de peças de variados tamanhos e geometrias. O processo nada mais é do que derramar metal líquido em um molde com o formato da peça a ser fabricada. Os moldes são preparados colocando a areia na caixa que possui o formato da peça que será fundida, depois disso o metal é vazado e as peças são desmoldadas (MORO; AURAS, 2007). Na Figura 4 está apresentado o fluxograma do processo de fundição.

Figura 4 - Fluxograma do processo de fundição.



Fonte: OLIVEIRA (2014)

Para a realização do seu processo, as fundições utilizam toneladas de areia por ano, calcula-se que para cada tonelada de metal fundido obtenha-se por volta de uma tonelada de areia descartada (KLINSKY, 2008). No cenário mundial, o Brasil é o

10º produtor de fundidos, produzindo cerca de 2,3 milhões de toneladas, resultando em 2,3 milhões de toneladas de areia descartada (ABIFA, 2019).

2.2.2 Areia de fundição

Areia de Fundição (AF), é um produto elaborado pela mistura de alguns elementos. O principal componente da mistura é a “areia base”, que é constituída essencialmente, de sílica (óxido de silício – SiO_2) de formato sub-angular, com tamanhos de grão variando entre 0,15 mm e 0,6 mm (SIDDIQUE; SINGH, 2011). Além da areia base, pó de carvão, bentonita e água são adicionados à mistura. Devido as suas características plásticas, a bentonita possibilita moldes uniformes, compactos e que reproduzem fielmente as dimensões do modelo. Sua função coesiva confere resistência suficiente à caixa de moldagem, que possibilita que a mesma não se rompa durante o processo de vazamento (CARNIN, 2010).

Cada componente da AF tem sua função: a areia de sílica é a porção maior que resiste a alta temperatura, a argila bentonítica une os grãos de areia entre si, e a água ativa a ligação da argila na areia e adiciona plasticidade. O aditivo carbonáceo evita a fusão de areia sobre a superfície de vazamento. Os ingredientes menores absorvem a umidade e melhoram a fluidez da areia (SINGH; SIDDIQUE, 2011).

2.2.2.1 Tipos de areia de fundição

A fabricação dos moldes é feita por dois processos diferentes: o primeiro emprega areia, bentonita e pó de carvão (denominada como "areia verde"); e o segundo processo utiliza areia e resina fenólica (denominada "areia ligada quimicamente") (SCHEUNEMANN, 2005).

Para a realização dos moldes, que dão o contorno da parte externa da peça a ser fundida, utiliza-se a areia aglomerada com argila (areia verde) e para confeccionar os machos, que assentem as superfícies internas das peças, utilizam-se as areias aglomeradas com resinas sintéticas, que geralmente são de origem fenólica (areia ligada quimicamente) (COUTINHO; FABBRI, 2004).

A areia verde é utilizada para fazer os moldes da superfície externa da peça. Segundo Carnin (2010), toda areia aglomerada com argila e moldada no estado úmido recebe o nome de “areia verde” e nestes casos, os moldes não sofrem secagem

previamente ao vazamento. Estes moldes devem adquirir resistência suficiente para atender às solicitações que irão sofrer.

Sua composição é proveniente de materiais de ocorrência natural, os quais são misturados, areia de sílica (85-95%), argila de bentonita (4-10%) que é o ligante, um aditivo carbonáceo (2-10%), utilizado para melhorar o acabamento da superfície de fundição e composto também por água (2-5%), resultando em areia de cor preta, em decorrência do teor de carbono (SIDDIQUE; SINGH, 2011).

A areia ligada quimicamente é utilizada para fazer os machos, que são responsáveis por assentar a parte interna das peças fundidas. A diferença da areia verde para a areia ligada quimicamente é que a segunda utiliza uma resina orgânica como aglomerante.

Segundo Siddique e Singh (2011), a areia ligada quimicamente consiste em 93-99% de sílica e 1-3% de ligante químico. E ainda mencionam alguns aglutinantes químicos utilizados na indústria de fundição, como ácidos fenólicos não cozidos, resoléster fenólicos, silicato de sódio, fosfato, resinas alquídicas (óleo) de uretano, etc.

2.2.2.2 *Resíduo fino da Areia Verde de Fundição*

Apesar da maior parte da areia ser reutilizada, durante todo o ciclo, poderão ocorrer alterações em suas propriedades físico-químicas em decorrência das exposições mecânicas, térmicas e químicas que ocorrem nos processos de moldagem, vazamento, desmoldagem e no seu manuseio, e também existe a geração de finos que não poderão ser reaproveitados no sistema, transformando-se em resíduos. Estes resíduos são juntados com as areias perdidas por fugas no sistema de moldagem e desmoldagem e são descartados (MACIEL, 2005).

Os resíduos finos da areia verde de fundição possuem maior área superficial e de contato, possibilitando a aceleração do processo de geopolimerização e, consequentemente, o desenvolvimento da resistência mecânica do material (ZAHARAKI; KOMNISTSAS, 2009). Por esse motivo, foi utilizado neste trabalho o resíduo fino da areia verde de fundição.

2.2.3 Aplicação do resíduo de areia de fundição na construção civil

No resíduo da areia de fundição, é possível encontrar alguns contaminantes, como a presença de elementos metálicos, que são transferidos para a areia durante a fusão dos metais e também existem contaminantes orgânicos. Entretanto, segundo o estudo realizado por Hermenegildo (2011) a areia verde de fundição não se caracteriza como um resíduo de preocupação ambiental, tornando viável a sua reutilização pois não ocorre a contaminação do solo e não causa efeitos negativos à saúde do ser humano.

Já o estudo realizado por Penkaitis (2012) onde foram analisadas amostras de água dos locais onde existiam aterros clandestinos do resíduo de areia de fundição, ela encontrou fortes concentrações de metais como ferro, manganês, boro e selênio. Também foram analisadas amostras do próprio resíduo da fundição, onde foi encontrado cromo, cobre, cobalto, níquel, zinco, alumínio, ferro e manganês. Porém, os limites desses compostos encontrados estavam dentro do limite da atual normatização, classificando o resíduo como não perigoso. Mas as concentrações encontradas nas águas, comprometem a qualidade ambiental do local.

Levando em consideração os possíveis impactos ambientais decorrentes do descarte deste resíduo, do volume de areia dispostos nos aterros sanitário e dos altos custos envolvidos nestas operações, as fundições vem buscando desenvolver técnicas que visem o reaproveitamento das areias descartadas de fundição (ADF) e já existem vários estudos constando essa matéria-prima.

Nas pesquisas realizadas por Bonet (2002) foi possível afirmar que a utilização de areia descartada de fundição como agregado miúdo em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é uma proposta tecnicamente e ambientalmente viável.

A utilização do resíduo da areia de fundição em concretos é considerada apropriada como substituição parcial da areia em concreto de qualidade estrutural (BHARDWAJ E KUMAR, 2017). A substituição de areia fina do concreto pela areia de fundição, tem como resultado, um acréscimo da resistência à compressão em até 20% (CHAURASIYA *et al.,* 2017).

É possível encontrar pesquisas que apontam para o reaproveitamento das ADFs na construção de rodovias (PARTRIDGE *et al.*, 1999), em misturas asfálticas densas (COUTINHO, 2004) e na fabricação de pisos intertravados, conhecidos como paver (CARNIN *et al*., 2010).

Çevik *et al*. (2017) estudou a utilização do resíduo da areia de fundição ao invés de areia natural em argamassas de cimento. Foi observado que com o aumento de adição de areia de fundição há uma ligeira diminuição de resistência à compressão.

Iqbal *et al*. (2020) utilizaram o resíduo da areia de fundição em concreto verde para analisar as propriedades mecânicas e concluíram que a reutilização desse material no desenvolvimento do concreto verde, diminuirá os resíduos, levando à proteção ambiental e a benefícios monetários.

Sharma e Gupta (2015) estudaram o desenvolvimento de bloco de pavimentação usando areia de fundição em geopolímeros e concluíram que pode ser usado na fabricação de blocos de pavimentação pois chegou a valores de resistência à compressão de 78 MPa.

Sandhu e Siddique (2019) investigaram a influência da areia residual de fundição como substituto de agregados finos nas propriedades do concreto autoadensável e concluíram que o resíduo poderia ser usado na fabricação de concreto autoadensável.

Smarzewski (2020) estudou o uso do resíduo da areia de fundição na produção de concreto de ultra alto desempenho, como um substituto parcial para areia de quartzo. Concluiu que 5% do uso do resíduo em substituição a areia de quartzo foi considerado adequado.

Ghisleni e Lima (2020) estudaram a reutilização da areia de fundição na produção de concreto e blocos de concreto. Com os resultados verificou-se que as misturas contendo areia de fundição obtiveram resistências à compressão acima do preconizado em norma.

Matos *et al*. (2019) estudou novas aplicações de resíduos de areia de fundição em concretos convencionais e de mistura seca, foi possível concluir que é possível produzir blocos de concreto com 100% de resíduo de areia de fundição e resistências compatíveis com o concreto referência.

Monosi *et al.* (2010) estudaram as propriedades de argamassas e concretos contendo diferentes dosagens do resíduo da areia de fundição utilizado como substituição parcial de areia. Conclui-se que utilizando uma quantidade baixa (10%) de areia de fundição não há alterações no desempenho da argamassa.

Sebki *et al.* (2019) avaliou a utilização dos resíduos de areia de fundição em argamassas autoadensáveis em substituição parcial de areia. Concluiu-se que é

possível usar este tipo de resíduo em até 30% de substituição da areia sem modificar as principais características das argamassas auto adensáveis.

Thejas e Hossiney (2020) investigaram o potencial do uso de areia residual das fundições como agregado fino na produção de blocos de pavimentação de concreto. Os blocos de pavimentação com 45% de areia de fundição apresentaram resultados satisfatórios e podem ser considerados onde exista tráfego leve.

2.2.4 Aplicação do resíduo de areia de fundição em geopolímeros

A seguir serão discutidos resultados de pesquisas que utilizaram resíduo de areia de fundição para a produção de geopolímeros quanto ao seu impacto na microestrutura e nas propriedades mecânicas.

2.2.4.1 Microestrutura

Os resíduos de areia de fundição quando sofrem a ativação alcalina acarretam na dissolução dos materiais aluminossilicatos, que irão formar os geopolímeros. Entretanto, com o aumento do conteúdo de resíduos, pode ocorrer a geopolimerização incompleta do material, tornando heterogênea a matriz do geopolímero com presença de partículas inertes. Esse fato pode ser uma das possíveis razões para que haja a diminuição da resistência mecânica à compressão com o aumento de substituição por resíduos de areia de fundição, como será discutido no próximo subitem (BHARDWAJ; KUMAR, 2018; BIGNOZZI *et al.*, 2014; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007). Na Figura 5 está apresentada uma micrografia, a partir de um microscópio eletrônico de varredura, onde é possível de observar a presença do gel polimérico completamente e parcialmente formado, onde a matriz tende a ser mais densa, contribuindo para o aumento da resistência mecânica à compressão. Além disso, há também a presença de partículas de resíduo de areia de fundição que não reagiram, tornando a matriz heterogênea.

Figura 5 - Micrografia de um geopolímero com substituição de 70% de resíduos de areia de fundição

Fonte: ADAPTADO APITHANYASAI ET AL. (2020).

Em relação ao difratograma de raios-x típico de um geopolímero, pode-se encontrar um halo amorfo, que seria um pico largo centrado em torno do ângulo 2θ = 28 º, o que indica a geopolimerição e é devido a presença do gel amorfo composto por aluminossilicatos. Além disso, pode estar presente produtos cristalinos das reações, matéria prima que não reagiu e impurezas da matéria prima (LONGHI *et al.*, 2016; PROVIS; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007).

2.2.4.2 Propriedades mecânicas

De uma maneira geral, a introdução dos resíduos de areia de fundição tende a melhorar a resistência mecânica à compressão. Entretanto, há um valor limitante de teor de substituição que, para teores superiores, há diminuição da resistência mecânica. Isso se deve ao fato da inclusão dos resíduos da areia de fundição dificultarem a mistura dos materiais, acarretando no aprisionamento de bolhas de ar, que irão aumentar a porosidade do geopolímero (BHARDWAJ; KUMAR, 2018, 2019).

Um copilado de diferentes pesquisas com informações a respeito do teor limite de substituição por resíduos de areia de fundição, a partir do qual há diminuição da resistência mecânica à compressão, além das resistências à compressão da mistura de referência e da mistura com substituição, está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de resistência mecânica à compressão de pesquisas relacionadas a utilização de resíduos de areia de fundição na produção de geopolímeros

Autor	Teor limite de substituição	Resistência mecânica referência (MPa)	Resistência mecânica com teor limite de substituição (MPa)
Elakyah *et al.* (2019)	20%	41	56
Bhardwaj e Kumar (2018)	60%	34	46
Thaarrini e Ramasamy (2016)	25%	18	58
Vargas *et al*. (2015)	25%	10	3,8
Patiyal *et al.* (2016)	15%	25,74	28,33
Sharma e Gupta (2015)	20%	78	48

Fonte: AUTORA (2021).

2.3 LACUNA DO CONHECIMENTO

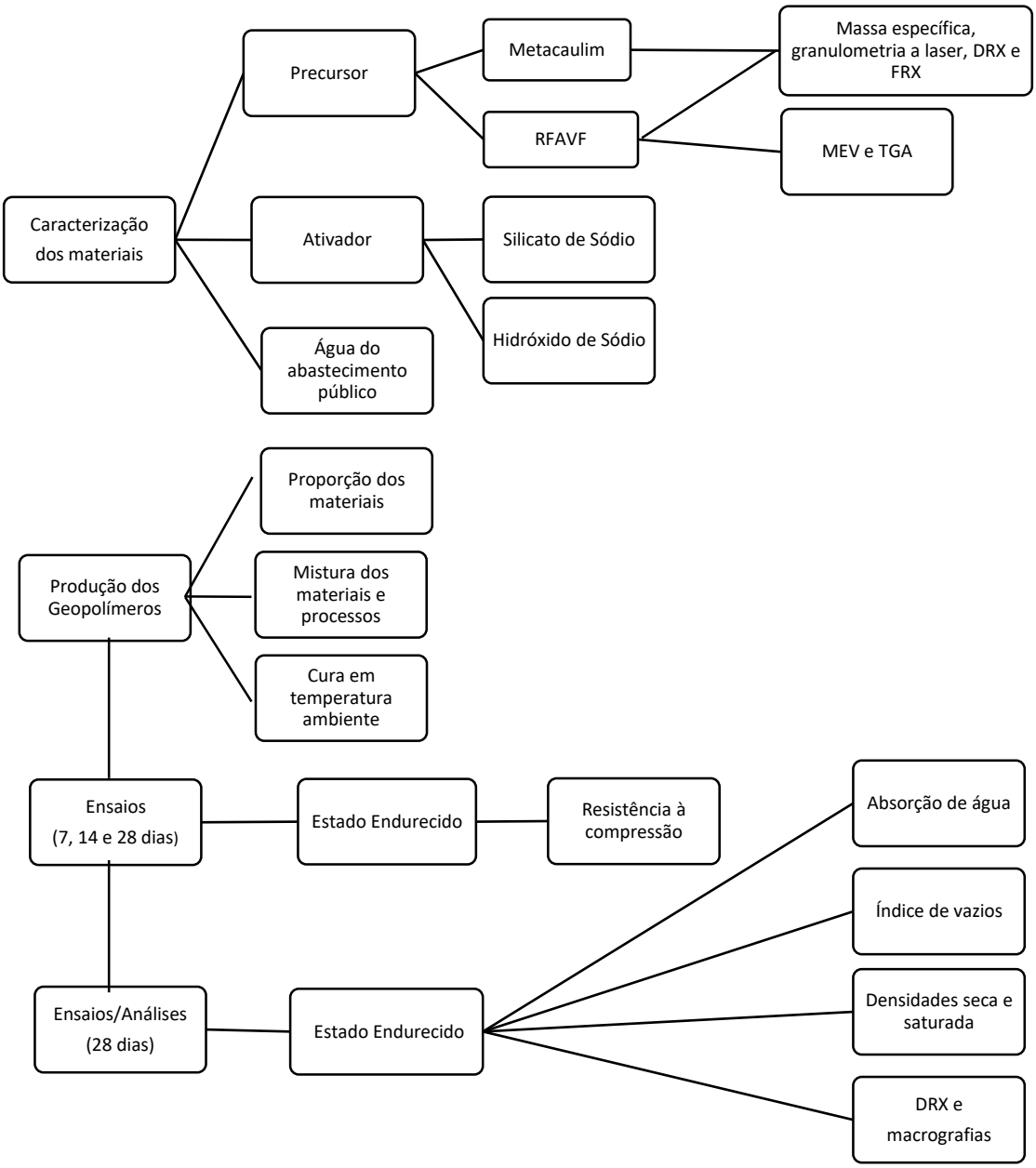
Nos últimos anos o avanço do desenvolvimento técnico e tecnológico da produção e utilização dos geopolímeros foi grande. De fato, como observado por Singh *et al*. (2015), conhece-se diversas propriedades dos geopolímeros e suas vantagens, além de ser possível o atingimento de resistências mecânicas elevadas. Entretanto, há grandes desafios científicos a serem enfrentados como, por exemplo, a compreensão dos processos de formação dos materiais geopolímeros.

A falta de compreensão sobre os geopolímeros, de uma maneira geral, é maior quando se trata da utilização de resíduos, como a areia verde de fundição, na sua produção. E maior ainda se tratando dos resíduos finos desse material, sendo esse o motivo principal da realização deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram descritas as principais características dos materiais utilizados para a produção dos geopolímeros, bem como o programa experimental previsto, com o detalhamento dos procedimentos de análises e ensaios adotados para atingir os objetivos desta pesquisa. Pode-se analisar o fluxograma do programa experimental da pesquisa na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do programa experimental



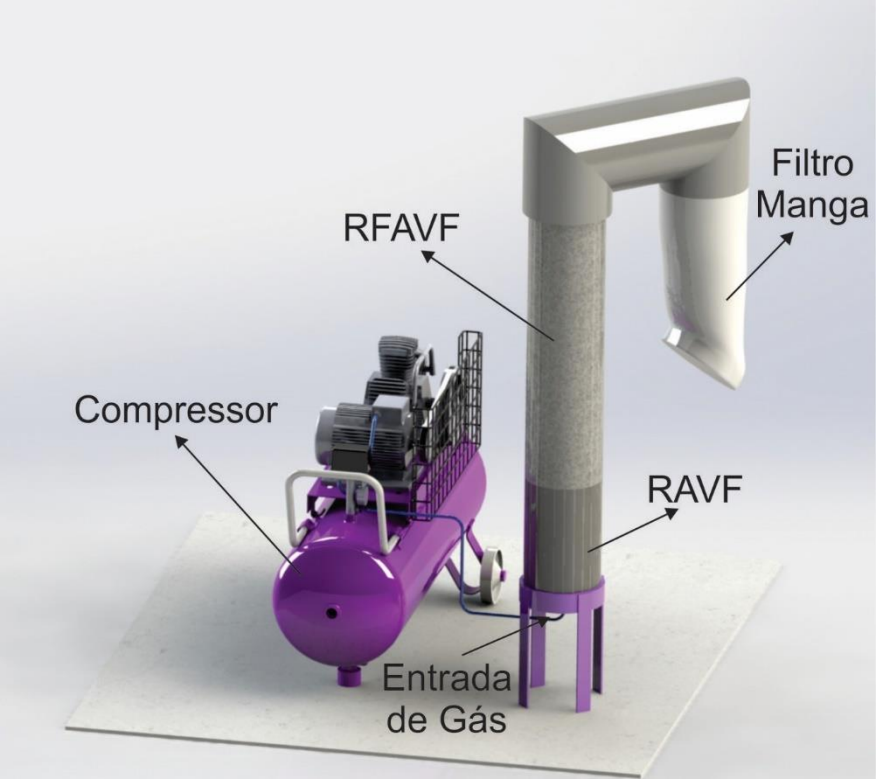
Fonte: AUTORA (2021)

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Precursores

Como precursores da mistura foram utilizados metacaulim MetaMax e o resíduo fino de areia verde de fundição (RFAVF). Para a seleção dos finos da areia verde de fundição, utilizou-se um processo semelhante aos filtros de manga. Esse processo de filtragem foi realizado pela injeção de ar comprimido em uma coluna de PVC contendo o resíduo de areia verde de fundição (RAVF). O ar comprimido movimenta o RAVF de forma turbulenta gerando um fluxo de pó desse resíduo, o qual fica retido em um filtro manga. O dispositivo utilizado para o processo de separação do RAVF consiste em um compressor de ar e uma coluna filtro. Esse dispositivo pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Dispositivo utilizado para o processamento do RAVF.



Fonte: AUTORA (2021)

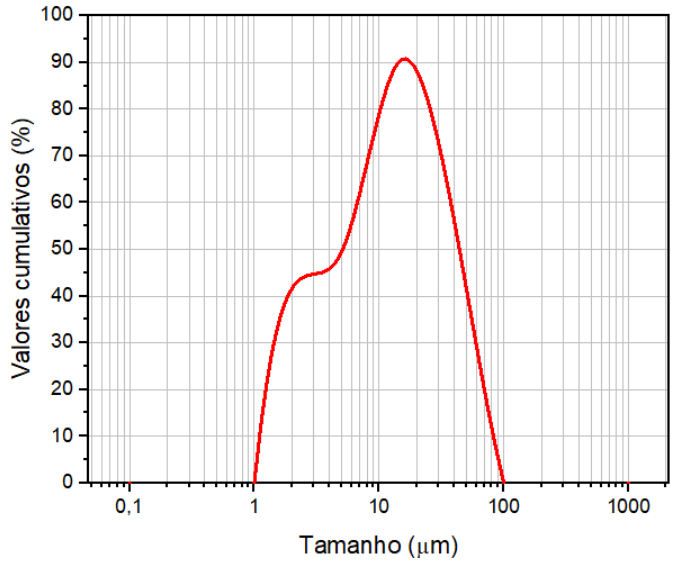
Os precursores foram caracterizados quanto a massa específica, granulometria a laser, cristalinidade e fases presentes (DRX) e composição química (FRX). Além disso, foi realizada a análise de variação de massa em função da

temperatura (TGA) e a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), somente do resíduo fino da areia verde de fundição (RFAVF). O MEV foi realizado afim de analisar a morfologia das partículas e a sua composição elementar, o mesmo permite a análise pontual dos elementos, pois apresenta as análises com alta resolução e profundidade de foco, o que permite a análise da superfície da amostra.

Para a determinação da massa específica dos precursores seguiu-se os procedimentos recomendados pela norma brasileira NM 52 (ABNT, 2003).

A análise de granulometria à laser foi realizada pelo equipamento Bettersizer S2- WD, marca AcilWeber. A metodologia utilizada foi via úmida, pelo método de Fraunhofer. A mesma, teve o intuito de identificar a distribuição granulométrica e de verificar o tamanho médio das partículas dos precursores utilizados. As Figuras 8 e 9 mostram os resultados da granulometria à laser para o metacaulim e RFAVF, respectivamente. E nas 6 e 7 estão resumidas as características físicas sobre as partículas dos precursores. Através da granulometria, é possível verificar que o diâmetro médio dos grãos de ambos os precursores utilizados é pequeno, porém as partículas RFAVF são maiores do que os de metacaulim. Quando os precursores dos geopolímeros, possuem partículas menores, tendem a ter uma área de contato maior, para que assim ocorra a geopolimerização de forma mais eficaz, entretanto devido os grãos da RFAVF serem maiores, pode haver a presença de partículas que não reagiram na matriz do geopolímero formado.

Figura 8 - Granulometria metacaulim



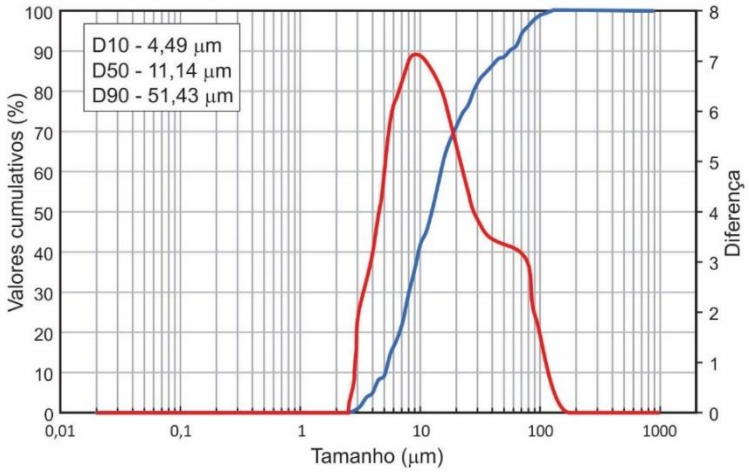
Fonte: AUTORA (2021)

Tabela 6 - Características físicas do Metacaulim

Granulometria (µm)	Diâmetro a 10%	1,11	Granulometria à laser
	Diâmetro a 50%	5,11	
	Diâmetro a 90%	14,29	
	Diâmetro médio	6,88	
Massa específica (g/cm³)	2,50		NBR NM 52 -2003

Fonte: AUTORA (2021)

Figura 9 - Granulometria dos resíduos finos da areia verde de fundição



Fonte: AUTORA (2021)

Tabela 7 - Características físicas dos resíduos finos da areia de fundição

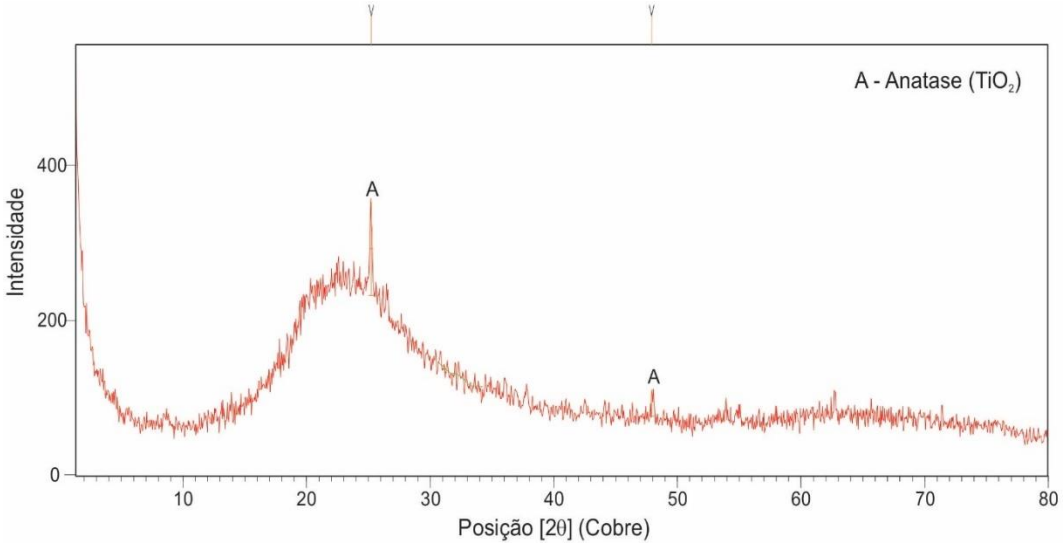
Granulometria (µm)	Diâmetro a 10%	4,49	Granulometria à laser
	Diâmetro a 50%	11,14	
	Diâmetro a 90%	51,43	
	Diâmetro médio	20,57	
Massa específica (g/cm³)	1,43		NBR NM 52 -2003

Fonte: AUTORA (2021).

A verificação da cristalinidade e as fases cristalinas presentes foram determinadas através da análise de difração de raio-X (DRX). Para essa análise foi utilizado um difratômetro de raio-X de marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 (θ-θ), equipado com tubo de ânodo fixo de Cu (λ = 1.5406 Å), operando a 40 kV e 40 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. O intervalo angular analisado foi de 0° a 80°, escala 2θ, em passo de 0,05°/s, utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,2 mm no detector. As Figuras 10 e 11 mostram os difratogramas de raio-X (DRX) para o metacaulim MetaMax e RFAVF, respectivamente.

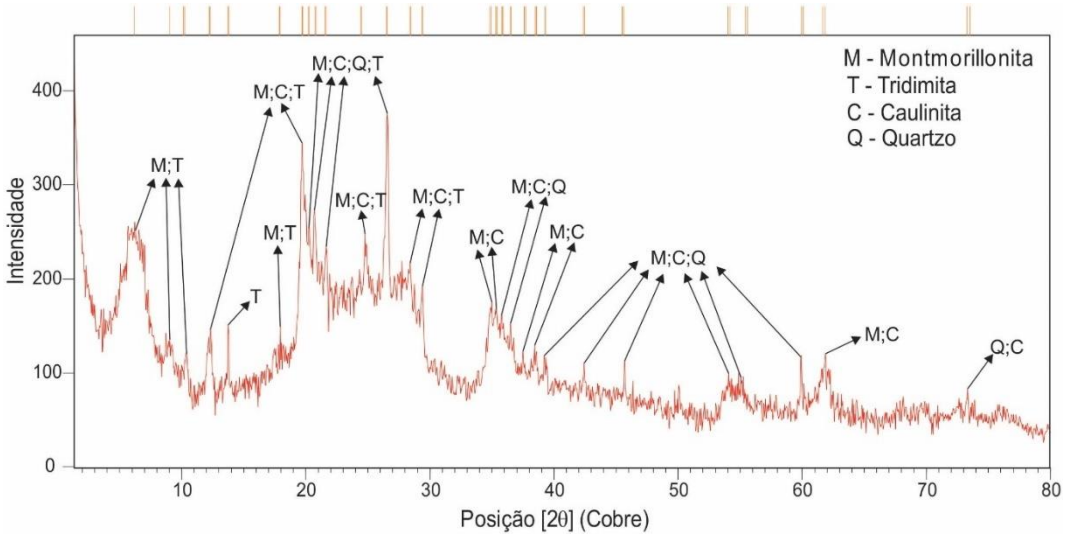
Na Figura 10 é possível observar que o Metacaulim MetaMax é constituído majoritariamente de material amorfo, por apresentar apenas o pico característico da anatase (TiO_2), isso se deve ao processo de tratamento que o caulim sofre para sua transformação em metacaulim (PREZA *et al*., 2020). Em relação ao difratograma da RFAVF (Figura 11), observa-se que há presença do argilo mineral montmorillonita [$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)2Si_4O_{10}(OH)2.nH_2O$], tridimita (polimorfo do quartzo), caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e quartzo (SiO_2). A presença dos dois últimos minerais citados indica que há impurezas na RFAVF.

Figura 10 - Difratograma do Metacaulim



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 11 - Difratograma dos resíduos finos da areia verde de fundição



Fonte: AUTORA (2021)

Também foi realizado a análise por Fluorescência de raio-X (FRX) para a obtenção da composição química das matérias-primas. O que possibilita o cálculo das relações entre os materiais precursores e ativadores. A análise foi realizada através do equipamento de modelo EDX 7000 da marca Shimadzu. Através da FRX pode-se observar que existe um alto teor de sílica no RFAVF, sendo semelhante ao presente no precursor base (MK). Além disso, percebe-se que há uma elevada porcentagem de perda ao fogo no RFAVF, indicando que há grande quantidade de argila.

A Tabela 8 mostra a análise de FRX para o metacaulim e RFAVF.

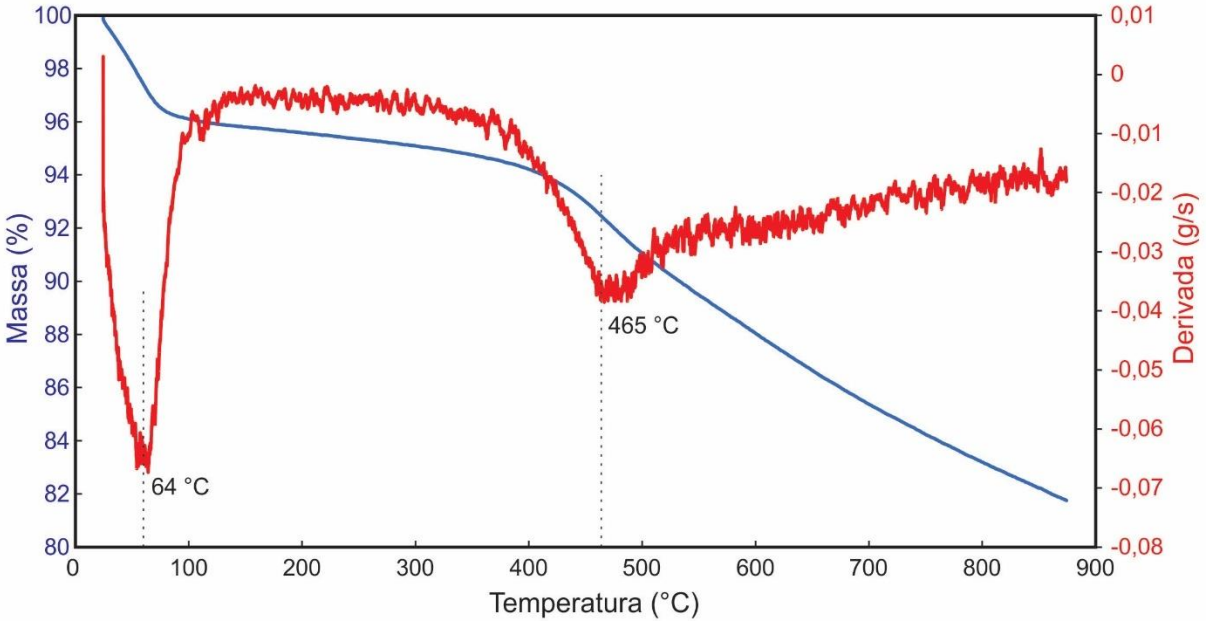
Tabela 8 - Composição química do metacaulim e dos resíduos finos da areia verde fundição.

ELEMENTOS	**MK**	**RFAVF**
SiO_2 (%)	55,00	40,570
Fe_2O_3 (%)	0,60	14,729
K_2O (%)	0,20	0,710
Al_2O_3 (%)	41,90	8,849
TiO_2 (%)	1,80	0,696
MnO (%)	0,00	0,394
ZnO (%)	0,00	0,099
ZrO_2 (%)	0,01	0,024
Cr_2O_3 (%)	0,01	0,150
SrO (%)	0,01	0,019
Y_2O_3 (%)	0,00	0,034
V_2O_5 (%)	0,10	0,072
Outros (%)	0,37	1,814
Perda ao fogo (%)	-	31,84
Total (%)	100,00	100,00

Fonte: autora, 2021.

A análise termogravimétrica (TGA) possibilita a informação da variação de massa de um material ao longo do seu aquecimento, possibilitando identificar quais as temperaturas que o material sofre alguma transformação. A Figura 12 apresenta a análise de TGA para a RFAVF, percebe-se a partir de 64 ºC tem-se o início da desidratação e em 465 ºC há a queima do carvão presente.

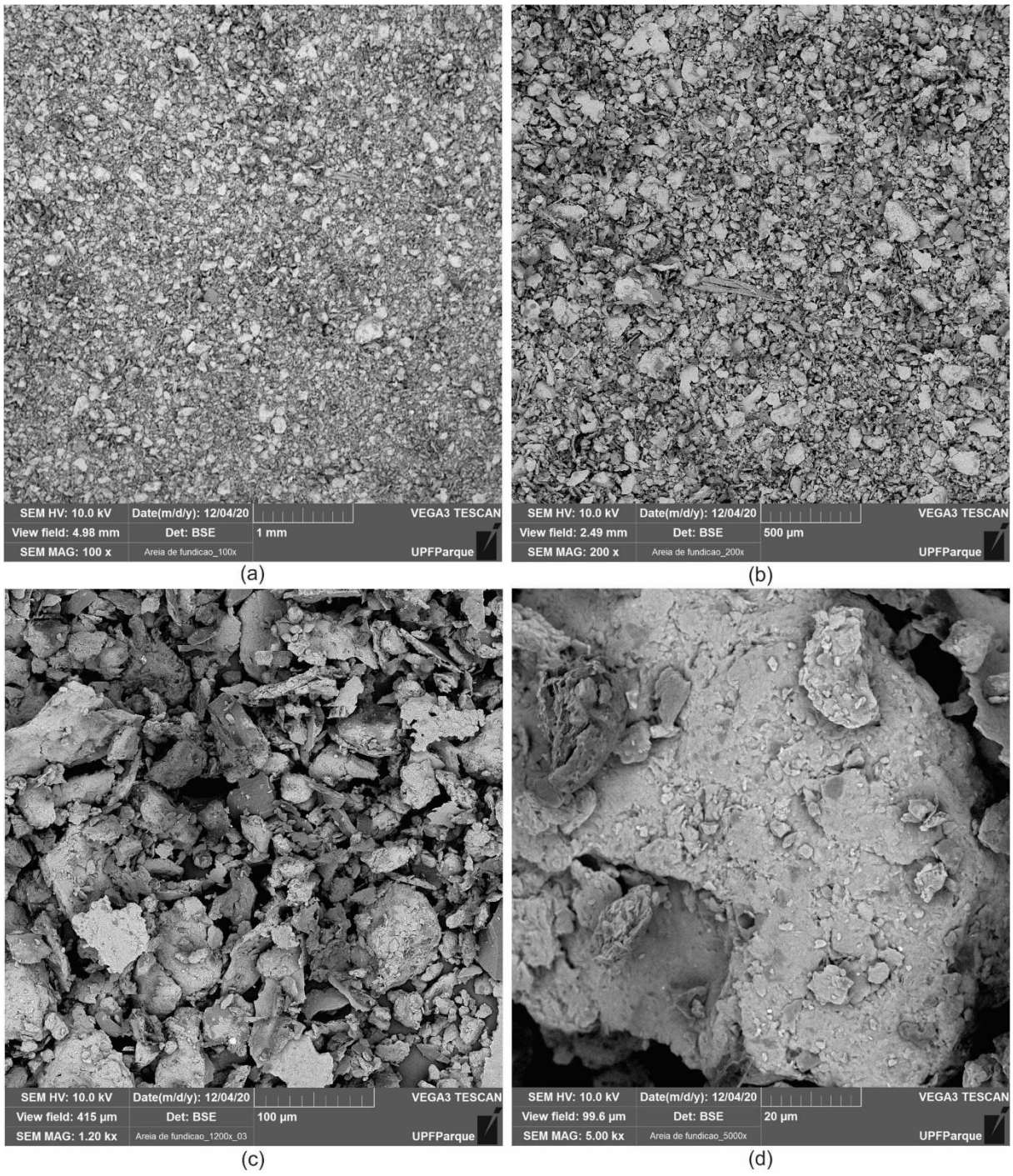
Figura 12 - Análise TGA dos resíduos finos da areia verde de fundição.



Fonte: AUTORA (2021)

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do RFAVF pode ser observada na Figura 13. É possível observar que os resíduos tem dimensões variáveis, sendo considerados materiais muito finos, o formato dos grãos é angular e possui estrutura aglomerada. Essas características citadas, associadas ao tamanho médio do grão, verificado através da granulometria à laser, de entorno de 20 μm, demonstram ser um material apropriado para utilização em geopolímeros, pois através dessas características é possível ter um alto potencial de reatividade.

Figura 13 - MEV dos resíduos finos da areia verde de fundição.



Fonte: AUTORA (2021)

3.1.2 Ativadores

Dois tipos de ativadores foram utilizados, o silicato de sódio e o hidróxido de sódio. O silicato de sódio alcalino ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$) é do tipo C-112, o mesmo foi fornecido pela empresa Nilla Comércio de Produtos LTDA., da cidade de Porto Alegre/RS. A concentração do produto utilizada para compor as razões molares foram:

53% de H_2O, 15% de Na_2O e 32,5% SiO_2. As características do silicato de sódio (SS) podem ser visualizadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características físicas e químicas do silicato de sódio

Características	Especificações	Unidade
Características Organolépticas	Liquido Viscoso	-
Viscosidade Brookfield RVT	600,000 – 1300,000	cPs*
Densidade	52,00 – 54,20	g/cm³
Óxido de Sódio	14,00 – 16,00	%
Relação Na_2O/SiO_2	2,10 – 2,40	%
Sílica	31,00 – 34,00	%
Sólidos Totais	45,00 – 50,00	%

*Centipoises. Fonte: Nilla Comércio de Produtos LTDA, 2019.

O reagente empregado também é uma fonte de sílica para a mistura geopolimérica, além da sílica fornecida pelo precursor (metacaulim). Para atingir o teor de álcalis necessário para a ativação do metacaulim, foi utilizado, em conjunto com o silicato de sódio, o hidróxido de sódio (NaOH), de origem industrial, em escamas, com concentração de 99%. A utilização de hidróxido de sódio, é para facilitar a mistura do ativador com o precursor, tendo como função o controle da água, a diluição do silicato e ajuste no módulo de sílica da mistura (OLIVEIRA, 2019). A água utilizada para diluir o hidróxido de sódio em escamas, é proveniente do abastecimento público da cidade de Passo Fundo/RS.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Projeto de experimentos

Um projeto experimental fatorial completo foi utilizado nesse trabalho, utilizando o metacaulim MetaMax como precursor base. O RFAVF foi utilizado em substituição ao precursor base. Três fatores foram avaliados, sendo o percentual de substituição de precursor base pelo RFAVF (0% - referência, 5%, 10%, 15% e 20%), o tempo de cura (7, 14 e 28 dias) e a razão SiO_2/Al_2O_3 que variou de 3,00 para 3,50.

Como variável resposta tem-se a resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios, densidades seca e saturada, além das análises de Difração de raio-X (DRX) e macrografias. A matriz experimental pode ser visualizada na Tabela 10.

Tabela 10 - Matriz experimental.

Ordem	Precursor (g)		SS (g)	NaOH (g)	H_2O (g)	Ativador		Razão molar total			
	MK	RFAVF				MS	% álcalis	SiO_2/Al_2O_3	Na_2O/Al_2O_3	H_2O/Na_2O	Na_2O/SiO_2
Geo1	200	0	203,95	20,40	89,47	1,33	46,4	3,00	0,80	15,00	0,27
Geo2	190	10	191,15	21,03	89,85	1,29	45,0	3,00	0,80	15,00	0,27
Geo3	180	20	178,34	21,65	90,24	1,24	43,5	3,00	0,80	15,00	0,27
Geo4	170	30	165,55	22,27	90,62	1,19	42,1	3,00	0,80	15,00	0,27
Geo5	160	40	152,75	22,90	91,00	1,14	40,7	3,00	0,80	15,00	0,27
Geo6	200	0	290,45	3,66	47,39	1,90	46,4	3,50	0,80	15,00	0,23
Geo7	190	10	274,97	4,80	49,07	1,85	45,0	3,50	0,80	15,00	0,23
Geo8	180	20	259,50	5,94	50,76	1,81	43,5	3,50	0,80	15,00	0,23
Geo9	170	30	244,02	7,08	52,45	1,76	42,1	3,50	0,80	15,00	0,23
Geo10	160	40	228,54	8,23	54,14	1,70	40,7	3,50	0,80	15,00	0,23

MK - Metacaulim; RFAVF- resíduo fino da areia verde de fundição; SS - Silicato de Sódio; MS - Módulo de Sílica.

Fonte: AUTORA (2021).

Uma análise de variância foi utilizada para determinar a influência dos fatores nas variáveis respostas. Os fatores foram considerados significativos para p-valores inferiores à 0,05 (valor crítico adotado), o que indica um nível de confiança superior à 95% em relação ao que está sendo declarado.

3.2.2 Sintetização dos materiais geopoliméricos

Para a confecção dos corpos de prova, inicialmente, foi feita a pesagem dos materiais utilizados. Após a mistura, a solução de NaOH ficou em repouso por um período de 24 horas para a redução da temperatura, a qual sofre um aumento devido ao efeito exotérmico da reação química. Em seguida foi adicionado o silicato de sódio à solução e, sequencialmente, foram adicionados os precursores.

O processo de mistura foi realizado em uma batedeira marca Mondial modelo Bella Massa, de eixo vertical durante 3 minutos na velocidade de 240 rpm. Após a mistura, foram confeccionados corpos de prova de 40x40x30 mm de arestas e foi realizada a moldagem preenchendo-se a fôrma. Os corpos de provas foram moldados em fôrmas como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Corpos de prova moldados.

Fonte: AUTORA (2021)

Ao completar o procedimento de moldagem os corpos de prova foram desmoldados e envelopados com plástico filme e curados em temperatura ambiente. Após a cura, os ensaios foram realizados para as avaliações das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova.

3.2.3 Caracterização dos geopolímeros

A caracterização dos corpos de prova dos geopolímeros foi realizada a partir dos seguintes ensaios experimentais: resistência à compressão; densidades seca e saturada, absorção de água e índice de vazios. Além disso, também foram preparadas amostras para análise de Difração de raio-X (DRX) e foram realizadas macrografias.

Para a determinação da resistência à compressão média foram moldados 3 corpos de prova retificados com dimensões de 40x40x30 mm para cada idade e traço. O ensaio de resistência à compressão seguiu os procedimentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7215 (ABNT, 1996). Para esse ensaio foi utilizado uma prensa marca EMIC, modelo PC 200C, com capacidade de 2000 kN, velocidade de rompimento de 0,7 mm/min e precisão de, aproximadamente, 1% da carga aplicada.

Para a determinação das densidades seca e saturada, a absorção de água e índices de vazios, foi seguido os procedimentos NBR 9778 (ABNT, 2013). A partir dos CPs rompidos, na idade de 28 dias, também foram preparadas amostras para as análises de Difração de raio-X (DRX) a qual permite a identificação dos produtos formados nos geopolímeros.

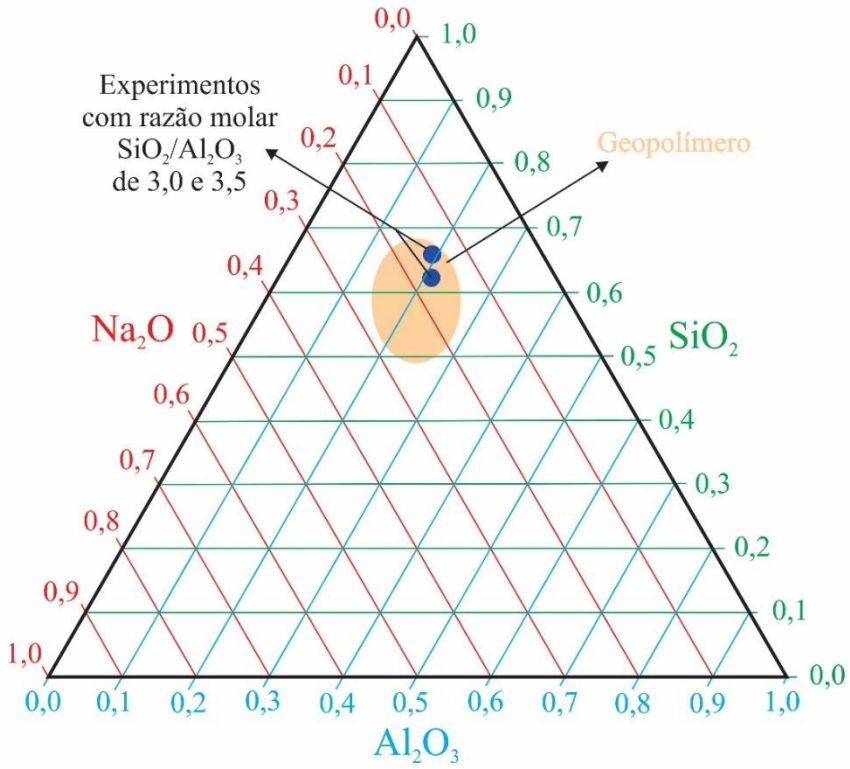
Para a inspeção visual, foram realizadas macrografias com uma lupa. As imagens foram feitas para o tempo de cura de 28 dias para verificar a porosidade e a distribuição do resíduo oriundo da areia verde de fundição e a sua interação com a matriz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FORMAÇÃO DO GEOPOLÍMERO

Na Figura 15 está apresentado o diagrama ternário dos geopolímeros formados em relação ao conteúdo de Na_2O, SiO_2 e Al_2O_3 presentes nas misturas, indicando que, possivelmente, houve a geopolimerização.

Figura 15 - Diagrama ternário relacionado ao conteúdo de Na_2O, SiO_2 e Al_2O_3



Fonte: AUTORA (2021)

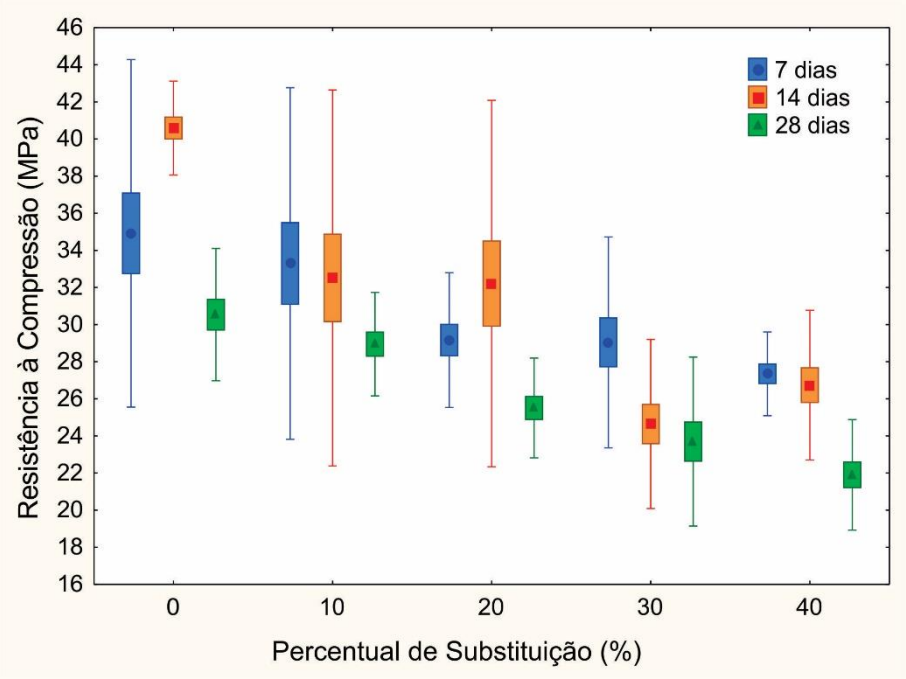
Pelo diagrama também é possível afirmar que os compostos formados são, em sua maioria, fases geopoliméricas, pois as razões molares SiO_2/Al_2O_3 se encontram na faixa entre 3,0-4,0, como observado por Juengsuwattananon *et al*. (2019).

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Figura 16 estão apresentados os resultados de resistência à compressão das misturas com razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 para as três idades (7, 14 e 28 dias) e seus respectivos desvios padrão (“*box*”) e intervalo de confiabilidade de 95%

(“*Whisker*”). Salienta-se que para as misturas com razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,5 não foi possível a obtenção de resultados aos 7 e 14 dias, pois as amostras não estavam no estado endurecido. Este fato pode estar atribuído a elevada concentração de OH^-, ou seja, alta alcalinidade. As concentrações de OH^-, são as que satisfazem as necessidades mínimas para que ocorra a geopolimerização. O excesso dessas concentrações pode acarretar na precoce precipitação do gel aluminossilicato, o que pode evitar a reação entre o precursor e a solução ativadora alcalina, afetando no processo de geopolimerização. Portanto, maiores quantidades de solução de silicato de sódio, podem inibir o processo de geopolimerização, reduzindo as propriedades mecânicas (ROCHA, 2017). Quando a quantidade de solução de silicato aumenta, aumentando a razão SiO_2/Al_2O_3, a desidratação da água desacelera e a reação de geopolimerização também, consequentemente o tempo de configuração aumenta (YASERI, *et al.* 2017).

Figura 16 - Resistência à compressão em relação ao percentual de substituição para diferentes tempos de cura e razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,0



Fonte: AUTORA (2021)

Pela análise ANOVA, apresentada na Tabela 11, percebe-se que tanto o teor de substituição quanto a idade das amostras influenciaram na resistência à compressão. E através do teste Tukey, observou-se que não há diferença significativa entre as médias de resistência à compressão para as curas de 7 e 14 dias. Já,

relacionando as médias de resistência à compressão para o tempo de cura de 28 com os demais (7 e 14 dias), observa-se, pelo teste de Tukey, uma diferença significativa, com confiabilidade de 95%. Essa variação aos 28 dias pode estar relacionada à pouca cristalinidade do gel formado e ao início da formação do zeólito, devido à instabilidade termodinâmica dos produtos da reação amorfa (LIMA, 2018; LONGHI *et al*., 2016).

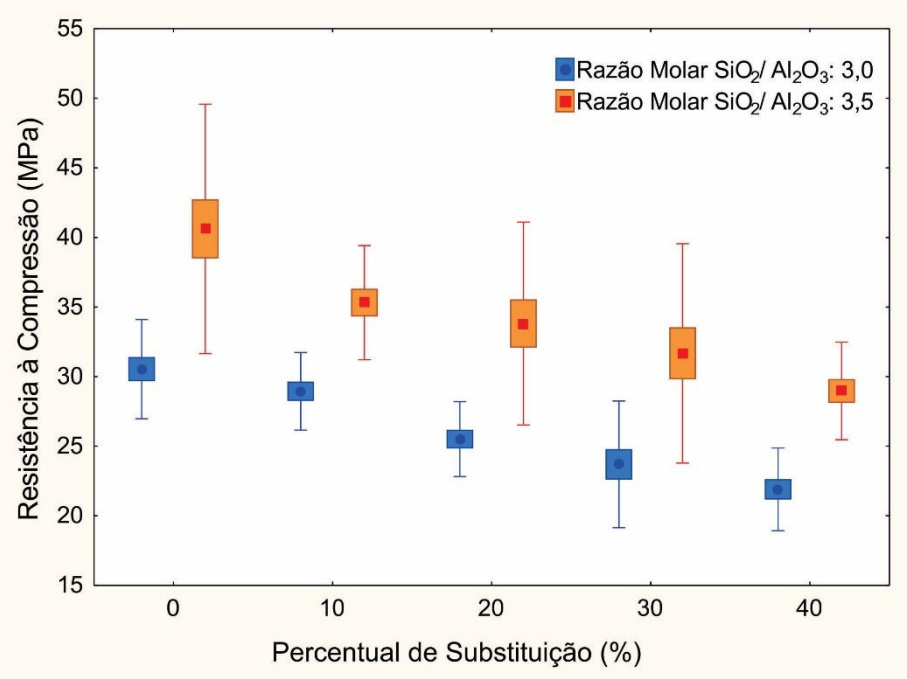
Tabela 11 - Análise de variância para a resistência à compressão com razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,0

Fator	Grau de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Percentual de substituição	4	629,24	157,31	27,54	0,0000	Sim
Tempo de cura	2	245,39	122,70	21,482	0,0000	Sim
Interação	8	109,06	13,63	2,39	0,0402	Sim
Erro	30	171,38	5,71	--	--	--
Total	44	1155,08	--	--	--	--

Fonte: AUTORA (2021)

Quanto ao aumento da razão molar SiO_2/Al_2O_3 para 3,5, na Figura 17 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão dos geopolímeros, na idade de 28 dias, em relação ao percentual de substituição do precursor para diferentes razões molares. E na Tabela 12 está apresentado o resultado da análise ANOVA desses resultados.

Figura 17 - Resistência à compressão em relação ao percentual de substituição para diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura de 28 dias.



Fonte: AUTORA (2021)

Tabela 12 - Análise de variância para a resistência à compressão e tempo de cura de 28 dias

Fator	Grau de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Percentual de substituição	4	371,34	92,84	20,3213	0,0000	Sim
Razão molar SiO_2/Al_2O_3	1	475,13	475,13	104,00	0,0000	Sim
Interação	4	11,87	2,97	0,65	0,6336	Não
Erro	20	91,37	4,57	--	--	--
Total	29	949,72	--	--	--	--

Fonte: AUTORA (2021)

Pela análise ANOVA, percebe-se que o aumento da relação SiO_2/Al_2O_3 e o teor de substituição de metacaulim por RFAVF causaram variações significativas nas médias de resistência mecânica à compressão. O grupo de misturas em que se utilizou a relação SiO_2/Al_2O_3 igual 3,5 (misturas de 6 a 10) apresentou ganhos de resistência à compressão de 39 %, 17 %, 22 % ,14 % e 18 %, para os teores de substituição de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 %, respectivamente, em comparação ao grupo com a relação SiO_2/Al_2O_3 igual 3,0. Esse comportamento está em concordância com o que é encontrado na literatura (KHALE; CHAUDHARY, 2007). O melhoramento da resistência à compressão se dá devido a razão molar reger o tipo de produtos produzido na geopolimerização. Segundo Dehghani, Aslani e Ghaebu Panah (2021), misturas com a razão SiO_2/Al_2O_3 igual a 3,5 são mais propicias a formarem o composto geopolimérico do tipo poli(sialato-multisiloxo) que é mais resistente do que o composto poli(sialato-disiloxo), formado quando a razão SiO_2/Al_2O_3 é igual a 3,0.

Já a substituição de metacaulim por RFAVF, independente da relação SiO_2/Al_2O_3 utilizada, causou diminuição nas resistências mecânicas à compressão. Para todas as razões molares e idades, a maior diminuição de resistência ocorreu com a substituição de RFAVF de 20%. Esse teor acarretou na diminuição percentual em relação a mistura de referência, aos 28 dias, de 11 % e 24 % para as misturas com relações SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 e 3,5, respectivamente. A diminuição está, provavelmente, ligada ao fato de a incorporação de RFVAF ter causado aumento da porosidade, como será discutido no subitem 4.3. Diversos autores relatam o fato de que o aumento de introdução de RFAVF na mistura dificulta a mistura mecânica (BHARDWAJ; KUMAR, 2018, 2019). Como consequência, há um maior aprisionamento de bolhas de ar no interior das amostras que irão causar diminuição da resistência mecânica à compressão. Além disso, como será discutido no subitem 4.5, houveram partículas de RFAVF, que possuem baixa densidade e que não

participaram da geopolimerização, tornaram a matriz heterogênea, diferente da matriz das misturas referência. A heterogeneização da matriz pode levar a diminuição da resistência mecânica devido as descontinuidades entre o grão de RFAVF e a matriz geopolimérica (BIGNOZZI *et al*., 2014; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007).

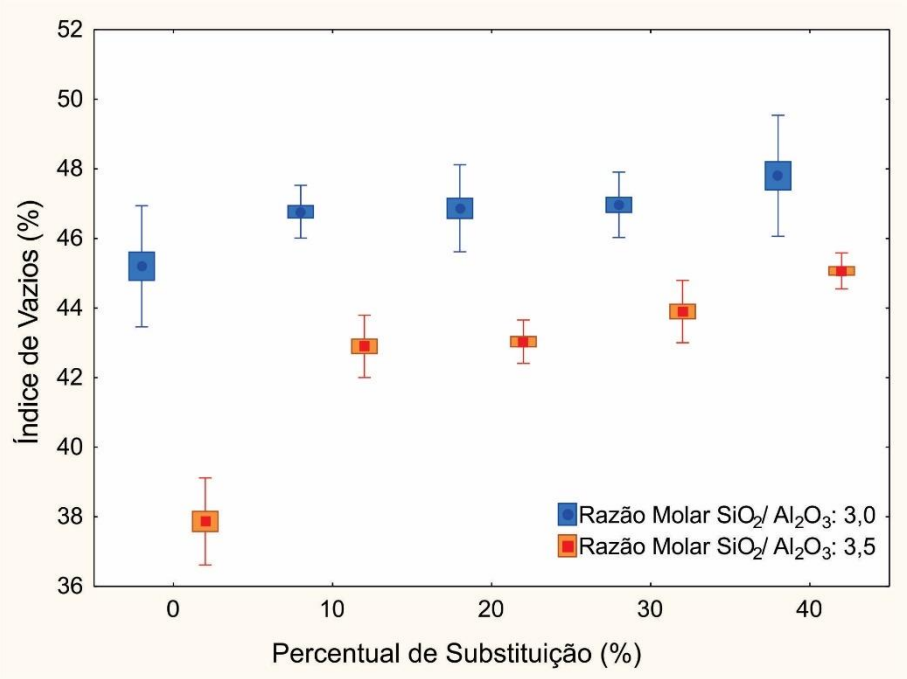
Porém, salienta-se que mesmo que houve diminuição da resistência à compressão com o aumento de teor de RFAVF, obteve-se resistências à compressão de 24,64 e 29,13 MPa para as misturas com 20 % de substituição de RFAVF e razões molares SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 e 3,5. Esses valores regulam-se aos que são encontrados na literatura, como exposto na Tabela 5, indicando então que é possível fazer substituição em teores maiores e ter resultados satisfatórios.

4.3 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA E DENSIDADES

Nas Figuras 18 e 19, e nas análises ANOVA, presentes nas Tabelas 13 e 14, é possível de ser verificado esse fato, independente da relação SiO_2/Al_2O_3 utilizada, houve um aumento do índice de vazios, indicando que a porosidade das amostras aumentou, bem como a absorção de água. Na literatura encontra-se como possível causa para esse aumento da porosidade a diminuição da trabalhabilidade, devido ao aumento da área superficial das partículas, que irão demandar maior quantidade de água para manter a trabalhabilidade constante. A diminuição da trabalhabilidade dificulta a mistura mecânica dos geopolímeros, aprisionando bolhas de ar em sua matriz (BHARDWAJ; KUMAR, 2018, 2019).

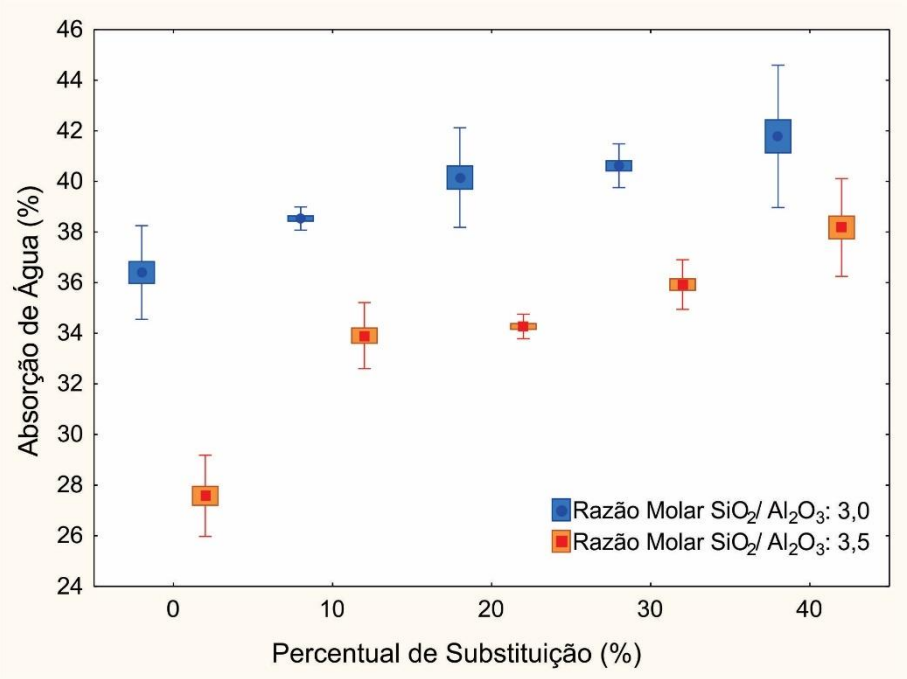
Em relação ao aumento da razão molar SiO_2/Al_2O_3, houve diminuição da porosidade e também da absorção de água. Indicando que a geopolimerização ocorreu de maneira melhor para as misturas com razão molar SiO_2/Al_2O_3 igual a 3,5 e tendo como consequência uma matriz mais densa.

Figura 18 - Índice de vazios em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 19 - Absorção de água em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.



Fonte: AUTORA (2021)

Tabela 13 - Análise de variância para o índice de vazios

Fator	Grau de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Percentual de substituição	4	81,78	20,45	97,82	0,0000	Sim
Razão molar SiO_2/Al_2O_3	1	130,21	130,21	623,01	0,0000	Sim
Interação	4	20,24	5,06	24,21	0,0000	Sim
Erro	20	4,18	0,21	--	--	--
Total	29	236,41	--	--	--	--

Fonte: AUTORA (2021)

Tabela 14 - Análise de variância para a absorção de água

Fator	Grau de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Percentual de substituição	4	215,52	53,88	130,94	0,0000	Sim
Razão molar SiO_2/Al_2O_3	1	229,01	229,01	556,54	0,0000	Sim
Interação	4	24,32	6,08	14,78	0,0000	Sim
Erro	20	8,23	0,41	--	--	--
Total	29	477,09	--	--	--	--

Fonte: AUTORA (2021)

Em relação as densidades, ficou evidenciado pela análise ANOVA (Tabelas 15 e 16) que tanto o teor de substituição do precursor quanto o aumento da razão molar foram influentes nos resultados. Com o aumento da porosidade devido a substituição de metacaulim por RFAVF e das partículas de RFAVF que não participaram da geopolimerização terem baixa densidade, houve a diminuição das densidades das amostras, como exposto nas Figuras 20 e 21. Bem como a diminuição da porosidade acarretada pelo aumento da razão molar SiO_2/Al_2O_3, acarretou no aumento das densidades. Além do aumento da porosidade, outro fator que possivelmente influenciou na diminuição da densidade das misturas é o fato de a RFAVF possuir menor densidade em relação ao metacaulim. Pastas geopoliméricas produzidas com metacaulim tendem a apresentar densidade em torno de 1900 kg/m³, como observado por Kong e Sanjayan (2010) que obteve densidade igual a 1940,4 kg/m³. Neste trabalho, os geopolímeros de referência tiveram densidades próximas a 1760 e 1700 kg/m³ para as misturas com razões molares SiO_2/Al_2O_3 iguais a 3,0 e 3,5, respectivamente. Além disso, encontra-se na literatura que a densidade de pastas geopoliméricas de fato diminuem com o aumento do teor de RFAVF. Sharma e Gupta (2015) verificaram que a substituição de 44 % de metacaulim por RFVAF produziu um geopolímero com densidade de 1638 kg/m³, valor próximo ao encontrado nesta

pesquisa em que se observou que para misturas com 20 % de substituição, obteve-se densidades entre 1620 e 1640 kg/m³.

De uma maneira geral, baixas densidades não são um problema por si só, pois na construção civil muitas vezes é necessária a utilização de argamassas de baixa densidade. Porém, a porosidade do material pode afetar não apenas a resistência mecânica à compressão, como comentado anteriormente, mas também a sua durabilidade devido a facilidade da entrada de agentes agressivos em seu interior (HASNAOUI; GHORBEL; WARDEH, 2021).

Tabela 15 - Análise de variância para a densidade saturada

Fator	Grau de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Percentual de substituição	4	34522,47	8630,61	76,37	0,0000	Sim
Razão molar SiO_2/Al_2O_3	1	8197,42	8197,43	72,54	0,0000	Sim
Interação	4	2857,83	714,46	6,32	0,0019	Sim
Erro	20	2260,14	113,01	--	--	--
Total	29	47837,86	--	--	--	--

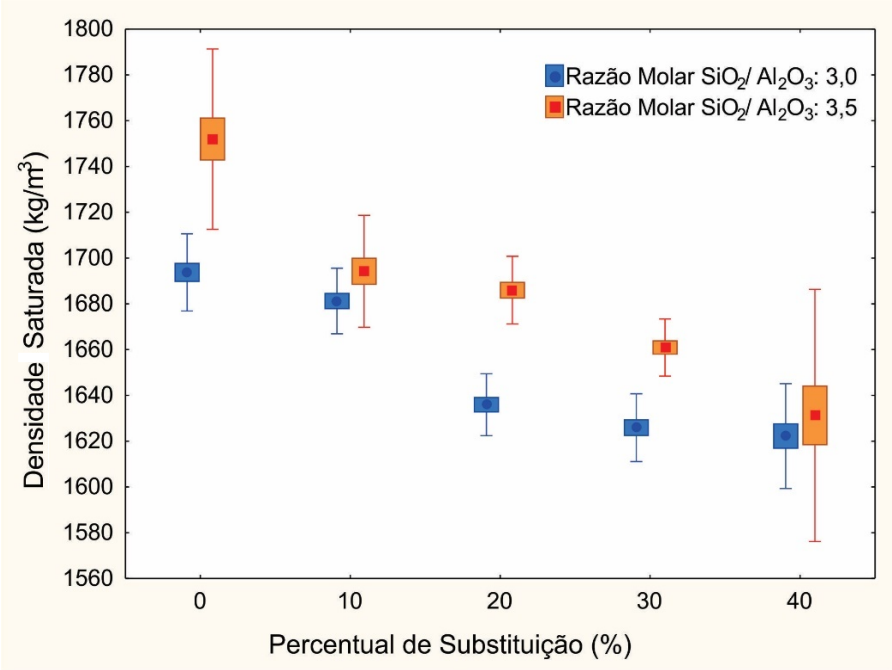
Fonte: AUTORA (2021)

Tabela 16 - Análise de variância para a densidade seca

Fator	Grau de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Percentual de substituição	4	74171,25	18542,81	127,62	0,0000	Sim
Razão molar SiO_2/Al_2O_3	1	41881,00	41881,00	288,25	0,0000	Sim
Interação	4	8253,17	2063,29	14,20	0,0000	Sim
Erro	20	2905,89	145,29	--	--	--
Total	29	127211,32	--	--	--	--

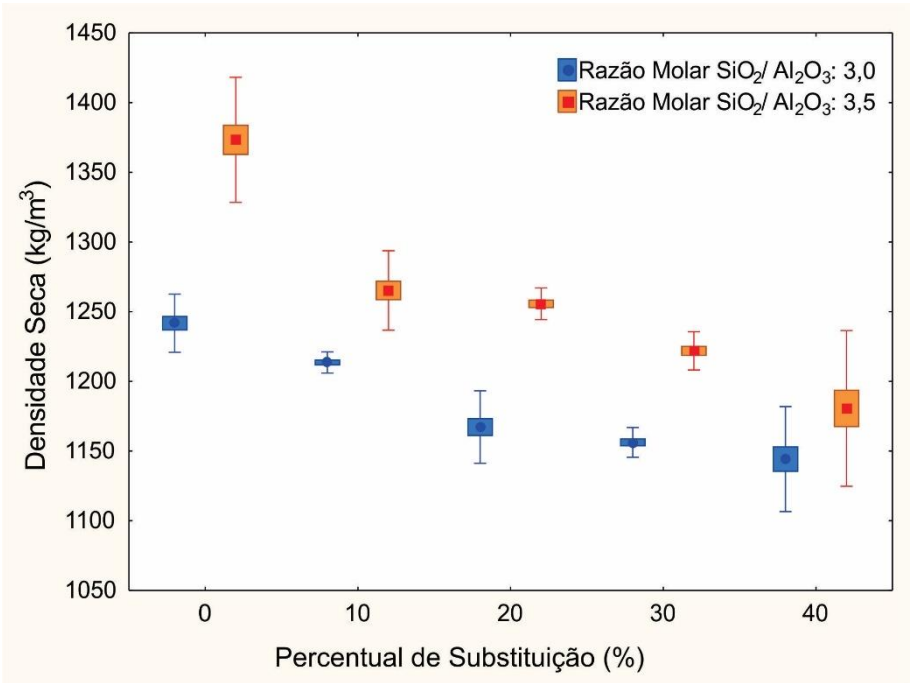
Fonte: AUTORA (2021)

Figura 20 - Densidade saturada em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 21 - Densidade seca em relação ao percentual de substituição para as diferentes razões molares SiO_2/Al_2O_3. Tempo de cura 28 dias.

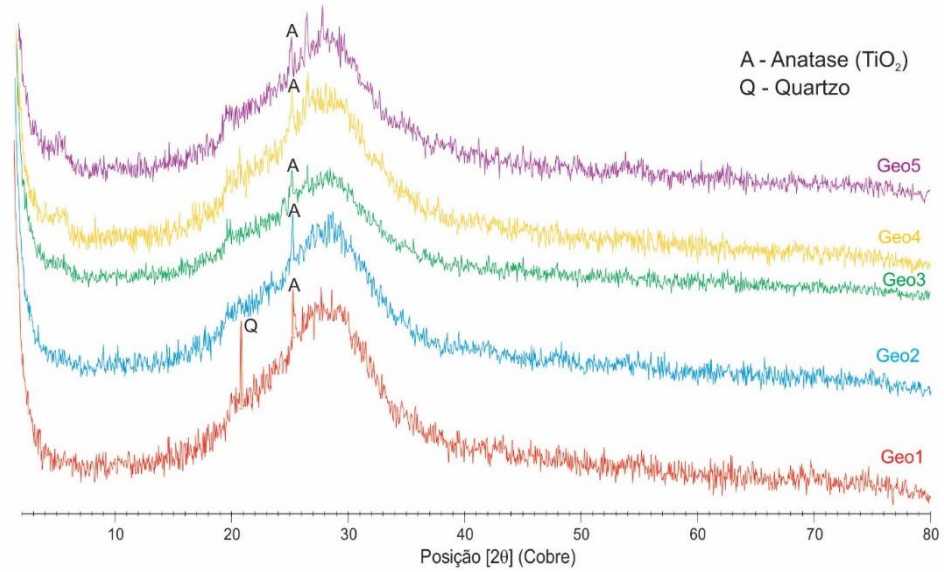


Fonte: AUTORA (2021)

4.4 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

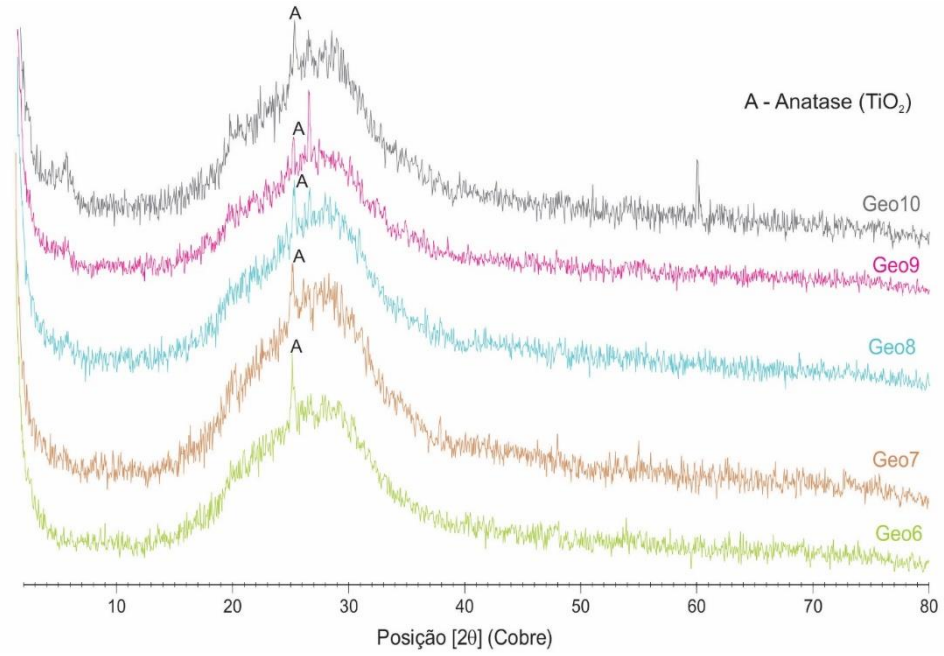
Os difratogramas dos materiais poliméricos, aos 28 dias, com razão molar SiO_2/Al_2O_3 3,0 e 3,5, estão apresentados nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22 - Difratogramas dos materiais geopoliméricos com razão molar SiO_2/Al_2O_3 igual a 3,0.



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 23 - Difratogramas dos materiais geopoliméricos com razão molar SiO_2/Al_2O_3 igual a 3,5.



Fonte: AUTORA (2021)

Em todas as misturas há a presença de um pico correspondente a anatase (TiO_2) e, especificamente, na mistura Geo 1 há também o pico correspondente ao

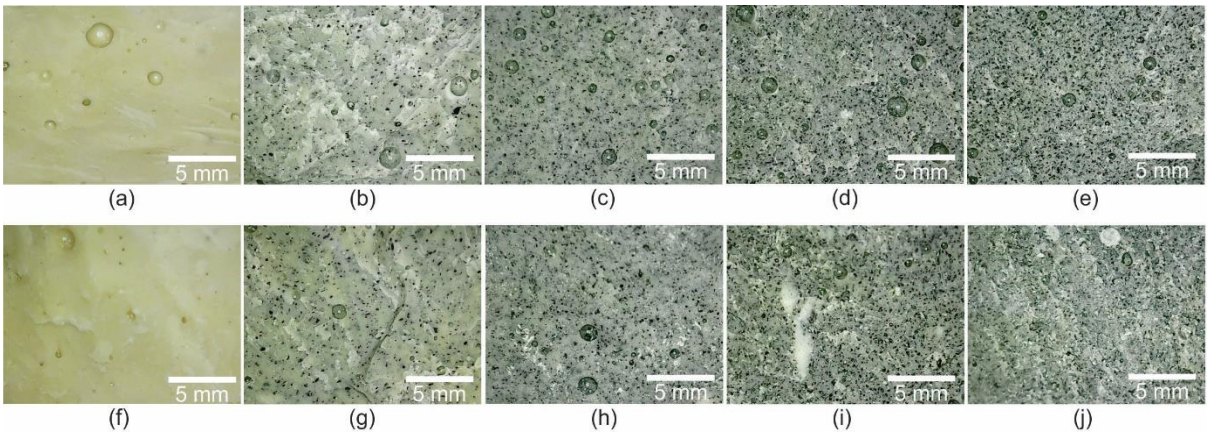
quartzo (SiO_2). A presença desses cristais é devido as impurezas do metacaulim utilizado (LONGHI *et al*., 2016; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007).

Além das fases cristalinas presentes, pode ser evidenciado que para todas as misturas há a presença de um pico largo que está centrado em torno do ângulo 2θ = 28 º, o que é comum de ser observado em materiais geopoliméricos, indicando que houve de fato a geopolimerização. Esse pico largo, também chamado na literatura de “pico de halo difuso”, se deve a presença do gel amorfo de aluminossilicatos (PROVIS; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007). Esse comportamento também foi reportado por Juengsuwattananon *et al*. (2019), que observou que para misturas com razões molares SiO_2/Al_2O_3 entre 3 e 4, houve a presença acentuada de material amorfo nos difratogramas, diferente das misturas com razões molares abaixo de 3.

4.5 CARACTERIZAÇÃO POR IMAGEM

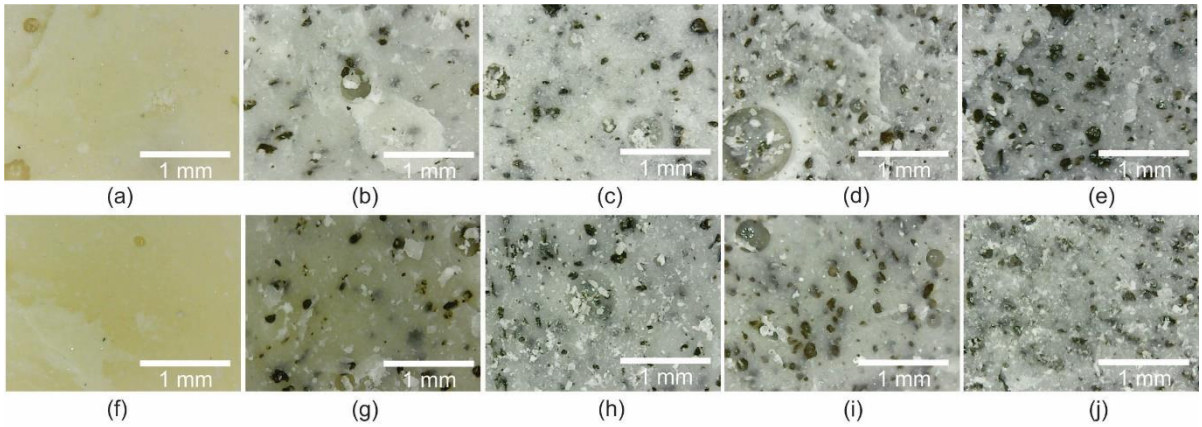
As macrografias das amostras com resolução de 5 e 1 mm, estão expostas nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 - Macrografias das amostras de geopolímeros com escala de 5 mm. (a) Geo 1, (b) Geo 2, (c) Geo 3, (d) Geo 4, (e) Geo 5, (f) Geo 6, (g) Geo 7, (h) Geo 8, (i) Geo 9 e (j) Geo 10.



Fonte: AUTORA (2021)

Figura 25 - Macrografias das amostras de geopolímeros com escala de 1 mm. (a) Geo 1, (b) Geo 2, (c) Geo 3, (d) Geo 4, (e) Geo 5, (f) Geo 6, (g) Geo 7, (h) Geo 8, (i) Geo 9 e (j) Geo 10.



Fonte: AUTORA (2021)

Observa-se a partir das macrografias que mesmo com o menor teor de substituição (10%) há a presença de grãos de RFAVF que não participaram da reação de geopolimerização, agindo como filler. A presença de grãos de RFAVF, que possuem baixa densidade, na matriz do geopolímero, o que torna a sua matriz mais heterogênea, em conjunto com o aumento da porosidade são as possíveis causas da diminuição da resistência à compressão observada com o aumento da substituição (BIGNOZZI *et al*., 2014; SILVA; SAGOE-CRENSTIL; SIRIVIVATNANON, 2007).

Em relação ao aumento da razão molar SiO_2/Al_2O_3 tem-se uma macroestrutura mais densa, pois com o aumento do conteúdo de silicatos há, por consequência, o aumento da reatividade da mistura (BHARDWAJ; KUMAR, 2019).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivos específico: caracterizar os materiais precursores (metacaulim e RFAVF) quanto sua composição química, e características físicas e mineralógicas; caracterizar fisicamente os geopolímeros formados com diferentes teores de substituição de RFAVF e seu grau de geopolimerização. A partir dos resultados tem-se algumas conclusões:

- Tanto o metacaulim e o RFAVF possuem grãos extremamente finos, o que facilita na reação de geopolimerização. Além disso, o metacaulim utilizado se encontra, em sua maioria, no estado amorfo. A combinação desses fatores resultou em geopolímeros com alto grau de amorfismo, como constatado pelos difratogramas de raios-x, isto é, foi evidenciado pelos difratogramas das amostras o “pico de halo amorfo” em torno do ângulo 2θ igual a 28º, característico de materiais geopoliméricos devido a presença de gel amorfo de aluminossilicatos;
- A incorporação de RFAVF acarretou na diminuição da resistência à compressão. Tendo como causas prováveis o aumento da porosidade e também a presença de grãos de RFAVF, que possuem baixa densidade e não participaram das reações geopolimerização, na matriz, tornando-a heterogênea. Entretanto, salienta-se que mesmo que haja a diminuição da resistência à compressão, a incorporação de até 20 % de RFAVF aparenta ser razoável, visto que as resistências obtidas estão de acordo com as obtidas em outras pesquisas presentes na literatura. Em adição, tem-se o fato da destinação de um resíduo industrial, tornando o material mais ecológico e sendo ainda mais favorável a utilização de RFAVF na fabricação de geopolímeros;
- O aumento da razão molar SiO_2/Al_2O_3 de 3,0 para 3,5 apresentou melhoras nas resistências à compressão, até mesmo para as misturas com substituição de RFAVF. Se mostrando como uma alternativa para contornar o fato da diminuição de resistência à compressão causada pela substituição de RFAVF, possibilitando sua incorporação na produção de geopolímeros. Entretanto, não houve endurecimento das misturas nas idades de 7 e 14 dias, sendo um inconveniente para a sua aplicação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nas observações feitas durante a realização do trabalho e nas lacunas que não foram possíveis de serem preenchidas pelo escopo deste trabalho, sugere-se os seguintes tópicos para serem estudados:

- Analisar misturas com teores de RFAVF menores do que 10 % tendo em vista que para teores maiores há presença de grãos que não participaram da reação;
- Estudar outras relações molares SiO_2/Al_2O_3, com os mesmos teores de substituição de RFAVF.

REFERÊNCIAS

ABIFA, anuário 2019. 18 p. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/revista20/#p=1>. Acesso em 11 maio 2020.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 327–363, jun. 2010.

AL-MASHHADANI, M. M.; CANPOLAT, O. Effect of various NaOH molarities and various filling materials on the behavior of fly ash based geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120560, nov. 2020.

ALVARENGA, C. B. S. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS À BASE METACAULIM E MICROPARTÍCULAS DE VIDRO SODA-CAL**. Tese—Belo Horizonte, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

AMARAL ALVES, L.; NOGUEIRA, A. O USO DE GEOPOLÍMEROS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Projectus**, v. 3, n. 4, p. 18–29, 9 jun. 2020.

_____. **ASTM C618** - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. Disponível em: <http://www.astm.org>. Acesso em: 15 nov. 2019.

APITHANYASAI, S.; SUPAKATA, N.; PAPONG, S. The potential of industrial waste: using foundry sand with fly ash and electric arc furnace slag for geopolymer brick production. **Heliyon**, v. 6, n. 3, p. e03697, mar. 2020.

ARCELORMITTAL, 2021. Produtos e soluções. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>. Acesso em: 13 março 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.

_____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa. 2013.

_____. **NBR 16697**. Cimento Portland – Requisitos. 2018.

BELL, J. L.; DRIEMEYER, P. E.; KRIVEN, W. M. Formation of Ceramics from Metakaolin-Based Geopolymers. Part II: K-Based Geopolymer. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 92, n. 3, p. 607–615, mar. 2009.

BERNAL, S. A. et al. Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 16, p. 5477–5486, ago. 2011.

BEZERRA, I. M. T. et al. Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 2, p. 101–105, 2013.

BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Effect of waste foundry sand addition on strength, permeability and microstructure of ambient cured geopolymer concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 431, p. 092009, 8 nov. 2018.

BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 555–565, jun. 2019.

BIGNOZZI, M. C. et al. Room temperature alkali activation of fly ash: The effect of Na 2 O/SiO 2 ratio. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 262–270, out. 2014.

BONET, I. I. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF). Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q**. Dissertação—Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

BORGES, P. H. R. et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153–168, jun. 2014.

BOSCHI, A. O.; LOT, A. V.; MELCHIADES, F. G. **EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS DE PARTIDA NO DESEMPENHO DE GEOPOLÍMEROS**. ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. **Anais**... In: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. Águas de Lindóia: 2016.

BRITO, W. S. **ATIVAÇÃO ALCALINA PARA A PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE RESÍDUO INDUSTRIAL**. Dissertação—Belém: Universidade Federal do Pará, 2018.

CARNIN, R. L. P. et al. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, v. 5, p. 56–67, 2010.

ÇEVIK, S. et al. Mechanical and microstructural characterization of cement mortars prepared by waste foundry sand (WFS). **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 53, n. 2, p. 829–837, out. 2017.

CHAURASIYA, D., KOLI, K., CHAUDHARI, S., MORE, V., & SATPUTE, P. Investigation of mechanical property of various mix design in concrete by replacing fine sand with foundry sand. **Asian Journal For Convergence In Technology**, 3(3). 2017. Disponível em: <http://www.asianssr.org/index.php/ajct/article/view/97>

COUTINHO, N. B. **Avaliação do Reaproveitamento de Areia de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas Densas**. Tese—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2004.

CUNHA, M. F.; FORTI, B. A.; SILVA, B. I. **Tendências da normalização de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho**. Ibracon 52 - Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável. **Anais**...2010.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

_____. Properties of geopolymer cements. In: **First international conference on alkaline cements and concretes**. Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials. p. 131-149.1994.

_____. Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In: **Geopolymer 2002 Conference**. Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute, 2002. p. 29.

DEHGHANI, A.; ASLANI, F.; GHAEBI PANAH, N. Effects of initial SiO2/Al2O3 molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123527, jul. 2021.

DOĞAN-SAĞLAMTIMUR, N. Waste Foundry Sand Usage for Building Material Production: A First Geopolymer Record in Material Reuse. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1–10, 2018.

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

DUXSON, P.; PROVIS, J. L. Designing Precursors for Geopolymer Cements. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 12, p. 3864–3869, dez. 2008.

ELAKYAH, D.; KALAIVANI, M.; EASWARAN, P. Effect of curing and molarity on Geopolymer concrete with foundry sand. **International Journal of Scientific Research and Review**, v. 7, n. 3, 2019.

FOLETTO, E. L. et al. Conversion of rice hull ash into soluble sodium silicate. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 335–338, set. 2006.

FORNASA, B. L. **Utilização de concreto reciclado para a produção de geopolímero**. Trabalho de conclusão de curso—Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

FOSCARINI, L. F. **Resistência ao ataque ácido de pastas geopoliméricas baseadas em metacaulim**. Dissertação—Passo Fundo: IMED, 2019.

GEO-POL. Cimento Portland versus Ligantes Geopoliméricos. 2019. Disponível em: <http://www.geopolymer.com.br/PDF/cpxgp.pdf>.

GHISLENI, Geisiele; LIMA, Geannina Terezinha dos Santos. Estudo da viabilidade de reutilização da areia de fundição na produção de blocos de concreto e concreto convencional. **Gestão e Sustentabilidade Ambiental**: simpósio mundial de sustentabilidade, Florianópolis, v. 9, p. 551-570, maio 2020.

HASNAOUI, A.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Performance of metakaolin/slag-based geopolymer concrete made with recycled fine and coarse aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102813, out. 2021.

HERMENEGILDO, M. K. **DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS PRESENTES EM AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO: ESTUDO DE CASO DA FUNDIÇÃO TUPY S.A**. Trabalho de conclusão de curso—[s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

IQBAL, M. F. et al. Prediction of mechanical properties of green concrete incorporating waste foundry sand based on gene expression programming. **Journal of Hazardous Materials**, v. 384, p. 121322, fev. 2020.

JUENGSUWATTANANON, K. et al. Correlation between initial SiO2/Al2O3, Na2O/Al2O3, Na2O/SiO2 and H2O/Na2O ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 406–417, nov. 2019.

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

KLINSKY, L. M. G. **Proposta de Reaproveitamento de Areia Fundição em Sub-bases e Bases de Pavimentos Flexíveis Através da sua Incorporação a Solos Argilosos**. Dissertação—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 334–339, fev. 2010.

LIEW, Y.-M. et al. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, v. 83, p. 595–629, out. 2016.

LIMA, J. S. **EFEITO DA RELAÇÃO MOLAR SiO2/Al2O3 E DAS CONDIÇÕES DE CURA NAS PROPRIEDADES DE GEOPOLÍMEROS OBTIDOS COM SILICATO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ**. Tese—Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. Tese—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

LONGHI, M. A. et al. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 265–272, mar. 2016.

MACIEL, C. B. **Avaliação da Geração do Resíduo Sólido Areia de Fundição Visando sua Minimização na Empresa Metalcorte Metalurgia-Fundição**. Dissertação—[s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

MATOS, P. R. DE et al. Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. **Journal of Environmental Management**, v. 244, p. 294–303, ago. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MONOSI, S.; SANI, D.; TITTARELLI, F. Used Foundry Sand in Cement Mortars and Concrete Production~!2010-03-27~!2010-05-03~!2010-07-07~! **The Open Waste Management Journal**, v. 3, n. 1, p. 18–25, 22 jul. 2010.

MORO N.; AURAS A. P.. **PROCESSOS DE FABRICAÇÃO: FUNDIÇÃO**. Florianópolis. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Curso técnico de mecânica industrial. 2007. Disponível em: <http://norbertocefetsc.pro.br/downloads/fundicao.pdf>

NETO, P. M.; GODINHO, D. S. S. **Estudo da influência da temperatura nas propriedades do concreto geopolimérico com adição de óxido de alumínio**. Trabalho de conclusão de curso—Santa Caterina: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

NG, C. et al. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 550–576, out. 2018.

NITA, C. **Utilização de Pozolanas em Compósitos de Cimento Reforçados com Fibra de Celulose e PVA**. Universidade de São Paulo, 2006.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete**. Conference on Constitution and Building Technol International. **Anais**... In: CONFERENCE ON CONSTITUCTION AND BUILDING TECHNOL INTERNATIONAL. 2008.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 729–737, mar. 2013.

PARTRIDGE, B. K. et al. Field Demonstration of Highway Embankment Construction Using Waste Foundry Sand. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1670, n. 1, p. 98–105, jan. 1999.

PATEL, D. N.; PITRODA, J. R. A CRITICAL LITERATURE REVIEW ON UTILISATION OF USED FOUNDRYSAND IN INTERLOCKING PAVER BLOCKS. p. 10, 2013.

PATIYAL, N.; KUMAR, J.; SHARMA, A. K. Experimental Study on Geopolymer Concrete with Partial Replacement of Fine Aggregate with Foundry Sand. v. 3, n. 2, p. 6, 2016.

PENKAITIS, G. **Impacto ambiental gerado pela disposição de areia de fundição: estudo de caso**. Dissertação—[s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

PIMENTEL, M. G. Characterization of blast furnace slag from industrial waste aiming its use in construction. n. 2, p. 13, 2018.

PINHEIRO, B. F. S. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS GEOPOLÍMEROS**. Dissertação—Coimbra: Universidade de Coimbra, 2017.

PINTO, A. T. Introdução ao estudo dos geopolímeros. **Universidade De Trás-Os-Montes E Alto Douro: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro**, 2006.

PREZA, C. R. A. S. et al. Geopolimerização do Metacaulim ferruginoso com adição de cinza volante. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 11768–11779, 2020.

PROVIS, J. L. Activating solution chemistry for geopolymers. In: **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**. 1ª ed. Nova Delhi: Woodhead Publishing Limi, 2009.

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

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. **Chemistry of Materials**, v. 17, n. 12, p. 3075–3085, jun. 2005.

ROCHA, T. S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação de temperatura**. 2017. Tese de Doutorado. Dissertação de M. Sc., LECIV/UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

ROSSA JR., J.; PORTELLA, K. F. Adição de escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I. **Cerâmica**, v. 58, n. 348, p. 542–548, dez. 2012.

SANDHU, R. K.; SIDDIQUE, R. Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 371–383, nov. 2019.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de Areia de Fundição Através de Tratamento Químico Via Processo Fenton**. Dissertação—[s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SEBKI, G.; SAFI, B.; CHAHOUR, K. Recycling of Foundry Sand Wastes in Self-Compacting Mortars: Use as Cementitious Materials and Fine Aggregates. **Journal of Applied Engineering Sciences**, v. 9, n. 2, p. 195–200, 1 dez. 2019.

SHARMA, S. K.; GUPTA, H. DEVELOPMENT OF PAVER BLOCK BY USING FOUNDRY SAND BASED GEOPOLYMER CONCRETE. **JOURNAL OF TODAY'S IDEAS - TOMORROW'S TECHNOLOGIES**, v. 3, n. 2, p. 129–144, 7 dez. 2015.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, jul. 2011.

SIDDIQUE, R.; SINGH, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 885–892, set. 2011.

SILVA, P. D.; SAGOE-CRENSTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al2O3 and SiO2. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 512–518, abr. 2007.

SIMÕES, A., et al. Ciência e Engenharia de Materiais de Construção. 1. ed. atual. São Paulo: IST Press, 2012. 1057 p.

SINGH, B. et al. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 78–90, jun. 2015.

SMARZEWSKI, P. Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete with Partial Utilization of Waste Foundry Sand. **Buildings**, v. 10, n. 1, p. 11, 14 jan. 2020.

SRIVASTAVA, A.; SINGH, S. K. Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119706, abr. 2020.

THAARRINI, J.; RAMASAMY, V. Properties of Foundry Sand, Ground Granulated Blast Furnace Slag and Bottom Ash Based Geopolymers under Ambient Conditions. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 60, n. 2, p. 159–168, 2016.

THEJAS, H. K.; HOSSINEY, N. Use of Waste Foundry Sand in Precast Concrete Paver Blocks—A Study with Belgaum Foundry Industry. In: **Sustainable Civil Engineering Practices**. [s.l.] Springer, 2020. p. 1–7.

VAIDYA, S.; DIAZ, E. I.; ALLOUCHE, E. N. **Experimental Evaluation of Self-Cure Geopolymer Concrete for Mass Pour Applications**. World of Coal Ash (WOCA) Conference. **Anais**... In: WOCA CONVERENCE. Denver: 2011.

VARGAS, A. S. DE et al. Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição. **Cerâmica**, v. 61, n. 359, p. 317–322, set. 2015.

VENKATESAN, M. et al. Optimum utilization of waste foundry sand and fly ash for geopolymer concrete synthesis using D-optimal mixture design of experiments. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 114–123, set. 2019.

WEI, X. et al. Influence of Water Content on Mechanical Strength and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash/GGBFS Mortars Cured at Cold and Polar Regions. **Materials**, v. 13, n. 1, p. 138, 29 dez. 2019.

YASERI, Sajad et al. The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 534-545, 2017.

ZAHARAKI, D.; KOMNISTSAS, K. **Role of Alkali Metals on the Synthesis of low Ca Ferronickel Slag-Based Inorganic Polymers**. Assessing the Footprint of Resource Utilization and Hazardous Waste Management. **Anais**... In: 3RD AMIREG INTERNATIONAL. Atenas: 2009.

ZHANG, Y. et al. Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 122970, nov. 2020.