



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS – FEMat
CAMPUS DE ANANINDEUA.

MATHAUS MORAES LUCAS

MATERIAIS CIMENTÍCIOS GEOPOLIMÉRICOS A PARTIR DE ESCÓRIA DE ALTO
FORNO: UM ESTUDO MORFOLÓGICO PRELIMINAR

ANANINDEUA,

2021

MATHAUS MORAES LUCAS

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS GEOPOLIMÉRICOS A PARTIR DE ESCÓRIA DE
ALTO FORNO: UM ESTUDO MORFOLÓGICO PRELIMINAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a faculdade de engenharia de materiais, do Campus de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Clay Rios Da Silva

ANANINDEUA,

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

M827m Moraes Lucas, Mathaus.
MATERIAIS CIMENTÍCIOS GEOPOLIMÉRICOS A
PARTIR DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO: UM ESTUDO
MORFOLÓGICO PRELIMINAR / Mathaus Moraes Lucas. —
2021.
74 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais,
Ananindeua, 2021.

1. Sustentável. 2. Metacaulim. 3. Escória. 4.
Microscopia. I. Título.

CDD 620.11

MATHAUS MORAES LUCAS

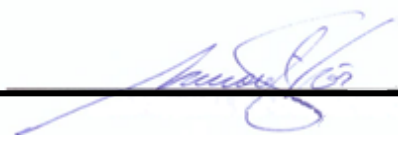
**MATERIAIS CIMENTÍCIOS GEOPOLIMÉRICOS A PARTIR DE ESCÓRIA DE
ALTO FORNO: UM ESTUDO MORFOLÓGICO PRELIMINAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de
Materiais da Universidade Federal do Pará em cumprimento as exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

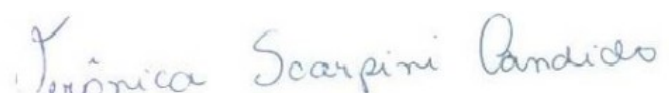
DATA DA AVALIAÇÃO: 17/06/2021.

CONCEITO: EXCELENTE

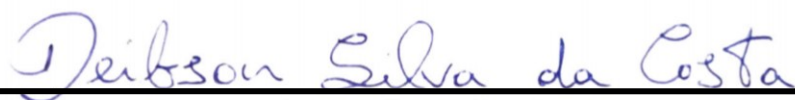
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva – FEMat - UFPA (Orientador)



Prof. Dra. Verônica Scarpini Cândido – FEMat - UFPA (Membro Interno)



Prof. Dr. Deibson Silva da Costa – FEMat - UFPA (Membro Interno)

ANANINDEUA,

2021

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo apoio, atenção, dedicação e por acreditarem desde sempre nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Nossa Senhora de Nazaré e Aparecida por todas as graças alcançadas e força em toda caminhada.

Aos meus pais, Alexandre Lucas e Maria Das Graças Lucas, por todo sacrifício e luta para que eu alcançasse meus objetivos, por todo carinho e afeto demonstrado por toda vida.

A minha irmã, Jhadi Lucas, por todo companheirismo e sensatez nos melhores e piores momentos, contribuindo enormemente para a minha vida profissional e pessoal.

A minha namorada, Josi Moreira, por toda atenção, compreensão, carinho, companheirismo e total apoio ao longo de toda minha graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alisson Rios e a Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini, por sempre acreditarem no meu potencial, dando-me todo apoio acadêmico e institucional desde os primórdios da graduação, agradeço pelo exemplo e espelho acadêmico.

À Universidade Federal do Pará, em especial a faculdade de engenharia de materiais pelo suporte na realização desse trabalho. E todos os Professores da FEMAT.

A banca examinadora, ao Prof. Dr. Deibson Costa e Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini por aceitarem participar da defesa desse trabalho.

Aos laboratórios de práticas tecnológicas e laboratório de caracterização da UFPA campus Ananindeua, pela disponibilidade estrutural para a realização desse trabalho e a Tintas Vivace pelo fornecimento de caulim.

Ao grupo dos 'Cavernas', colaborando essencialmente ao longo da graduação representados por: Amaury Barros, Andrey Fanjas, Daniel de Almeida, Eryck "Clarck Crente", Lucas Rezende, Gabriel "Castanheira Castanhal" Oliveira, Pedro Henrique, Siandro "Baiaçu" Sena, Willian "Filha" Rayol e Victor Mafra.

Ao meu grupo de estudo que desde o primeiro trabalho esteve presente, conquistando sempre boas médias, composto por: Nelma Siqueira, Juliana Barbosa, Rute Silva e Wellington Silva.

Aos meus amigos Thiago Corrêa e Olívia Lopes por todo companheirismo e dedicação na ajuda a construção desse trabalho, sendo de suma importância para a sua realização.

Aos meus demais amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para a vida acadêmica.

RESUMO

Em todas as obras da construção civil são utilizadas grandes quantidades de concreto e a indústria vem evoluindo gradativamente para atender as necessidades do mercado com maior qualidade, durabilidade e menor custo. Com essa crescente demanda, cresce também os impactos ambientais causados pela construção civil e a busca por estudos inovadores se faz necessária como alternativa para um concreto mais sustentável. Neste trabalho se buscou desenvolver o estudo da microscopia de pastas e argamassas alternativas de alto desempenho, a partir de argilominerais álcali-ativados com escória de alto forno. Os materiais utilizados no trabalho foram: metacaulim, escória de alto forno, Hidróxido de Potássio e areia como agregado miúdo. A metodologia utilizada para a obtenção das formulações para confecções de pasta foi utilizando os estudos de Porto (2019) e Silva (2011) enquanto que para a argamassa foram os estudos de Helene e Terzian (1993) e de Silva (2011). Foram Confeccionados 5CP's para cada formulação de pasta onde se variou a quantidade mássica de escória (0%,35%,45%, 55%,60% e 65%) e 5 CP's para cada formulação de argamassa com 45% de escória e variando a quantidade mássica de areia (0%,29%,59%,69%,75% e 81%). Os ensaios realizados foram de caracterização mineralógica da matéria prima por DRX, tempo de pega e microscopia óptica. Nos resultados, pode-se perceber que o tempo de pega é influenciado pela concentração do ativador alcalino, onde os resultados não foram semelhantes aos da literatura. A partir da pasta com 45% de EAF a concentração do ativador alcalino não é suficiente o que acarreta no aparecimento de muitas partículas não reagidas, já para a argamassa se observou que com o aumento da quantidade de areia, houve concentração de partículas que foi atribuído ao processo de fabricação e a concentração do ativador alcalino devido a quantidade de partículas soltas e não reagidas. Pode-se concluir que as matérias-primas utilizadas estão adequadas para o uso em geopolímeros, com o aumento de EAF a quantidade de microporos diminuiu na pasta e que o material utilizado tem grande potencial na indústria cimentícia.

Palavras-chave: Sustentável. Metacaulim. Escória. Microscopia.

ABSTRACT

In all civil construction works, large amounts of concrete are used and the industry has been gradually evolving to meet market needs with greater quality, durability and lower cost. With this growing demand, the environmental impacts caused by civil construction are also growing and the search for innovative studies is necessary as an alternative for a more sustainable concrete. This work aimed to develop the study of the microscopy of high performance alternative pastes and mortars, from alkali-activated clay minerals with blast furnace slag. The materials used in the work were: metakaolin, blast furnace slag, Potassium Hydroxide and sand as fine aggregate. The methodology used to obtain the formulations for making paste was using the studies of Porto (2019) and Silva (2011) while for the mortar were the studies of Helene and Terzian (1993) and Silva (2011). 5 CP's were made for each paste formulation where the mass amount of slag is varied (0.35%, 45%, 55%, 60% and 65%) and 5 CP's for each mortar formulation with 45% slag and varying the mass amount of sand (0%,29%,59%,69%,75% and 81%). The tests performed were mineralogical characterization of the raw material by XRD, setting time and optical microscopy. In the results, it can be seen that the setting time is influenced by the concentration of the alkaline activator, where the results were not similar to those in the literature. From the paste with 45% EAF, the concentration of the alkaline activator is not sufficient, which leads to the appearance of many unreacted particles, as for the mortar it was observed that with the increase in the amount of sand, there was a concentration of particles that was attributed the manufacturing process and the concentration of the alkaline activator due to the amount of loose and unreacted particles. It can be concluded that the raw materials used are suitable for use in geopolymers, with the increase of EAF the amount of micropores decreased in the paste and that the material used has great potential in the cement industry.

Keywords: Sustainable. Metakaolin. Slag. Microscopy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arranjos formados por aluminossilicatos	18
Figura 2 - Mecanismo de geopolimerização.....	20
Figura 3 - Aplicações dos geopolímeros segundo sua estrutura molecular	30
Figura 4 - Brisbane West Wellcamp Airport	31
Figura 5–Fluxograma das etapas do desenvolvimento do trabalho	34
Figura 6 – Matérias-primas utilizadas na produção do geopolímero: (a) metacaulim, (b) EAF, (c) solução alcalina e (d) areia.	35
Figura 7 – Forno utilizado para calcinação.....	38
Figura 8 – DRX metacaulim.	38
Figura 9 - Moinho de bolas.....	39
Figura 10 – DRX escória de alto forno.	40
Figura 11–Separação dos insumos das formulações 0%,35% e 45%.	41
Figura 12 –Disposição dos moldes de (Ø2,5X5) cm.	41
Figura 13 – Separação das formulações de argamassa 69% e 75% de areia	42
Figura 14 – Disposição dos moldes de argamassa com 0% de areia.	43
Figura 15 – Rompimento de 1 CP de com 45% de EA: a) Pasta, b)disposição do CP de pasta na prensac) argamassa com 29% de areia e d) disposição do CP de argamassa na prensa.....	44
Figura 16 – Microscópio EVEN com amostra de pasta de 45% de EAF.	45
Figura 17 – Gráfico de tempo de pega de pasta geopolimérica.	46
Figura 18 - Gráfico de tempo de pega de argamassa geopolimérica.....	47
Figura 19 – Macro e microscopia para 0% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	49
Figura 20 – Macro e microscopia para 35% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	50

Figura 21 – Macro e microscopia para 45% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	51
Figura 22 – Macro e microscopia para 55% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	52
Figura 23 – Macro e microscopia para 60 % de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	53
Figura 24 – Macro e microscopia para 65 % de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	54
Figura 25 – Macro e microscopia para 0% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	56
Figura 26 – Macro e microscopia para 29% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	57
Figura 27 – Macro e microscopia para 59% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	58
Figura 28 – Macro e microscopia para 69% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	60
Figura 29 – Macro e microscopia para 75% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	61
Figura 30 – Macro e microscopia para 81% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.	62

LISTA SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

CO ₂	Dióxido de carbono
Si	Silício
Al	Alumínio
EAF	Escória De Alto Forno
Ca	Cálcio
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Silicato de Alumínio hidratado
H ₂ O	Água
SiO ₂	Dióxido de Silício
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
NaOH	Hidróxido de Sódio
KOH	Hidróxido de Potássio
K	Potássio
Na	Sódio
CCA	Cinza Da Casca Do Arroz
MKL	Metacaulim
DRX	Difração de Raio-X
CP	Corpo de Prova
IFPA	Instituto Federal do Pará
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 Justificativa	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Geopolímero	17
2.2 Estrutura do geopolímero e geopolimerização	18
2.3 Matérias-primas utilizadas na produção do geopolímero	21
2.3.1 Metacaulim	21
2.3.2 Ativadores.....	22
2.3.3 Resíduos agrícolas	23
2.3.4 Resíduos Industriais	24
2.3.5 Resíduos Sólidos	27
2.3.6 Agregado	28
2.4 Aplicações dos geopolímeros	29
2.5 Microscopia do geopolímero	32
3 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
3.1 Materiais	34
3.1.1 Metacaulim (MKL).....	36
3.1.2 Escória de alto forno (EAF).....	36
3.1.3 Solução alcalina.....	36
3.1.4 Agregado miúdo.....	37
3.2 Metodologia experimental.....	37
3.2.1 Calcinação do caulim para obtenção do metacaulim	37
3.2.1.1 DRX do Metacaulim.....	38

3.2.2 Escória de Alto Forno (EAF)	39
3.2.2.1 DRX da escória de alto forno.....	39
3.2.3 Metodologia da obtenção da pasta geopolimérica	40
3.2.4 Preparação dos CP'S de pasta geopolimérica	41
3.2.5 Metodologia da obtenção da argamassa geopolimérica.....	41
3.2.6 Preparação dos CP'S de argamassa geopolimérica.....	42
3.2.7 Tempo de pega.....	43
3.2.8 Rompimento dos CP's	43
3.2.9 Microscopia óptica	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Tempo de pega.....	46
4.1.1 Pasta geopolimérica	46
4.3 Microscopia Óptica	48
4.3.1 Microscopia óptica da pasta geopolimérica	48
4.3.2 Microscopia óptica da argamassa geopolimérica	55
5 CONCLUSÃO	64
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Em todas as obras da construção civil são utilizadas grandes quantidades de concreto e a indústria vem evoluindo gradativamente para atender as necessidades do mercado com maior qualidade, durabilidade e menor custo (HAGEMANN, 2011). Com essa crescente demanda, cresce também os impactos ambientais causados pela construção civil e a busca por estudos inovadores se faz necessária como alternativa para um concreto mais sustentável (ARAÚJO, 2017).

O cimento Portland é o principal material dos concretos e argamassas e o mais utilizado na construção civil. Ele é responsável por conferir resistência mecânica elevada à mistura, bem como uma boa durabilidade (BORGES *et al.*, 2014). As principais matérias-primas utilizadas para a produção do concreto são: um material homogêneo composto por agregados (brita, areia, material pulverizado) e por aglomerante, com função de uni-los, dando-lhe resistência mecânica com o passar do tempo (CASCAES, 2016).

O grande problema do enorme consumo de cimento, é que a sua produção demanda altos níveis de energia, gerando entorno de 0,8 kg de dióxido de carbono(CO_2) para cada kg de cimento. Estes fatos resultam em um dos materiais mais poluidores do planeta, sendo responsável pela emissão de 7% da taxa global de CO_2 (CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP, 2019).

Tendo em vista esta alta geração de CO_2 na fabricação do cimento, pesquisadores como: Krivenko (1997), Davidovits (1994) e Silva (2006a), apontam a substituição do cimento Portland por materiais obtidos na reação alcalina de aluminossilicatos, que são denominados geopolímeros (BORGES *et al.*, 2014).

O estudo de Davidovits (2002) mostra que para a produção de 1(uma) tonelada de cimentogeopolimérico gera 0,180 tonelada de CO_2 enquanto que para a produção de 1 (uma) tonelada de Cimento Portland gera 1 tonelada de CO_2 . Cimento geopolimérico gera quase seis vezes menos CO_2 durante a fabricação do que o cimento Portland (DAVIDOVITS, 2002).

Os geopolímeros pertencem a família de polímeros inorgânicos e podem ser fabricados com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade considerável de silício (Si) e alumínio (Al) na forma amorfa e semi-cristalina (BHARATH, 2017).

Um ponto positivo dos geopolímeros é a utilização de resíduos da indústria e agricultura como aglomerantes. Ao contrário das adições em cimentos tradicionais (Portland), nos geopolímeros os resíduos são a base dos aglomerantes. Os resíduos mais comumente utilizados são: escória de alto-forno, cinzas volantes e cinzas provenientes da queima de biomassa (SILVA, 2006b).

Dentre as vantagens entre o cimento geopolímero sobre o cimento Portland pode-se destacar: a inércia química em relação a algumas patologias comuns aos produtos à base de cimento Portland, em outras palavras, não gera reação expansiva do tipo álcali-agregado, comum a concretos de cimento Portland confeccionados com agregados miúdos potencialmente reativos (DAVIDOVITS, 1994); resistência às altas temperaturas, o que permite desenvolvimento de estruturas mais resistentes à ação do fogo (KONG *et al.*, 2010); e materiais refratários de baixo custo (SOUZA, 2011).

Diante das vantagens do uso dos geopolímeros e seu potencial de aplicação, esta pesquisa visa promover o estudo de pasta e argamassa geopolimérica, através da caracterização microestrutural preliminar desses materiais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver o estudo da morfologia de pastas e argamassas alternativas de alto desempenho, a partir de argilominerais álcali-ativados com escória de alto forno.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar as melhores proporções entre metacaulim e escória de alto forno para a produção de pasta e melhor proporção de areia para argamassa;
- Estudar a morfologia da região de fratura da pasta e argamassa, através de análise morfológica.

1.2 Justificativa

O presente trabalho se justifica pelo crescimento da necessidade de produção de materiais cimentícios alternativos com o objetivo de atender as demandas do mercado além da sua contribuição para o meio científico.

O estudo é relevante no caráter ambiental de modo a utilizar resíduo industrial para substituir matérias-primas naturais, de modo a diminuir a extração de recursos naturais e dar um destino ao que para a indústria é considerado rejeito.

De modo científico, é justificado como forma de compreender as características microestruturais da pasta e argamassa geopolimérica, através da caracterização morfológica desses materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geopolímero

Nos anos 50, o pesquisador ucraniano Vitor Glukhovsky, propôs através de seus estudos realizados em amostras de construções antigas um novo ligante desenvolvido por processos alcalinamente ativados. Sendo o primeiro pesquisador a enfatizar que, a partir de transformações geológicas de determinadas rochas vulcânicas em zeólitas, ocorre a formação de rochas sedimentadas em baixa pressão e temperatura (KOMNITSAS *et al.*, 2007 *apud* SANTA, 2012).

Na década de 70, o cientista Joseph Davidovits, devido a vários incêndios catastróficos na França, que envolveu plástico orgânico comum, teve a iniciativa de formular materiais resistentes ao fogo, assim iniciando as suas pesquisas sobre materiais inorgânicos. Realizou pesquisas em alguns fragmentos de Pirâmides do Egito, e também em algumas amostras de Jericó datadas de 7000 a.C., devido apresentarem pouco desgaste e alterações químicas, mesmo sendo expostos a ambientes físicos e agressivos por longos períodos de tempo. Os resultados da pesquisa identificaram concretos elaborados a partir de calcários cauliníticos com hidróxido de sódio. Após passarem por análises químicas e mineralógicas, o cientista constatou que, nas microestruturas dos materiais analisados, existia material amorfo composto de aluminossilicatos (DAVIDOVITS, 2002).

O termo “geopolímero” foi criado por Davidovits no ano 1978 para designar uma família de ligantes minerais com composição química semelhante à da zeólita, mas com uma microestrutura mista, sendo amorfa asemi-cristalina (SKAF, 2008).

O material geopolimérico depende de materiais naturais ativados termicamente, com metacaulinita ou subprodutos industriais como cinzas volantes ou escórias pra fornecer uma fonte de silício (Si) e alumínio (Al). Onde o silício e o alumínio são dissolvidos em uma solução de ativação alcalina e subsequentemente polimeriza em cadeias moleculares e se torna aglutinante (ALEEM *et al.*, 2012).

Como uma alternativa, o geopolímero tem grande potencial para substituir o cimento Portland comum devido a sua alta resistência mecânica e força, excelente durabilidade e baixo consumo de energia e pouca emissão de CO₂ durante a sua produção. (FRÍAS *etal.*, 2012).

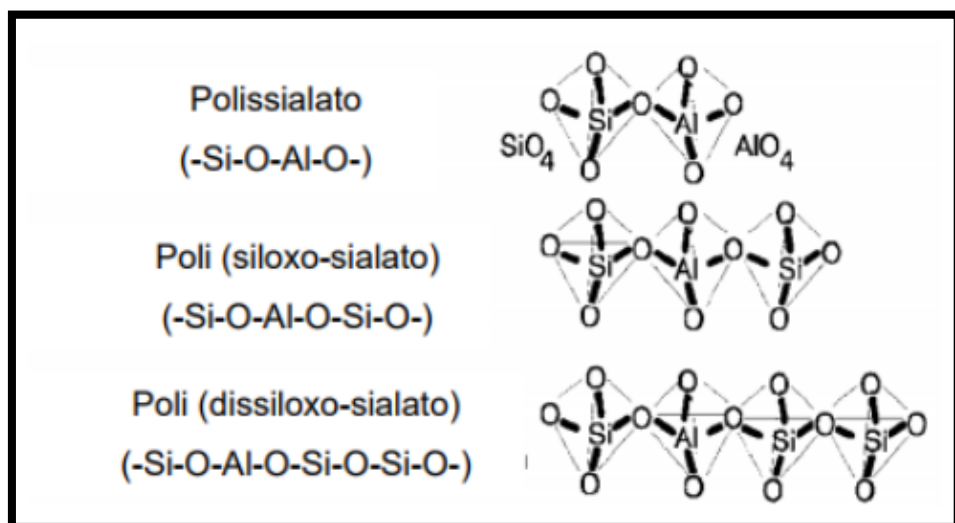
2.2 Estrutura do geopolímero e geopolimerização

Basicamente a definição para os geopolímeros mostra que eles são como polímeros inorgânicos em que tetraedros de silício (SiO_4^{4-}) e alumínio (AlO_4^{5-}) formam uma rede tridimensional ao se ligarem pelo compartilhamento de todos os seus átomos de oxigênio, devendo essa rede ser estabilizada pela presença de cátions monovalentes. Sua síntese se dá a partir das reações entre fontes de silico-aluminatos em um meio aquoso e alcalino, sendo que a estrutura do sólido obtido varia entre completamente amorfa a semi-cristalina (BITENCOURT, 2012).

Poli-silico-aluminatos (Si-O-Al), conhecidos como “polissialatos”, são anéis de polímeros formados entre átomos tetravalentes de silício (Si^{4+}) e trivalentes de alumínio (Al^{3+}) em coordenações tetraédricas com quatro oxigênios (DAVIDOVITS, 2002). Vassalo (2013) mostra que a estrutura dos polissilicatos representa polímeros naturais resultantes da reação chamada geossíntese, onde o alumínio é induzido por ativação alcalina em uma estrutura de matriz de silício.

Os arranjos são formados, de acordo com a razão entre Si/Al (VASSALO, 2013). Estes podem ser divididos em três classes apresentando estruturas que variam de acordo com a composição química, nomeadas como: PS→Poli (sialato) com razão Si/Al=1, PSS→Poli (sialato-siloxo) com razão Si/Al=2 e PSDS→Poli (sialato-disiloxo) com razão Si/Al=3, e representadas na figura 1 (KOMNITSAS *et al.*, 2007).

Figura 1 - Arranjos formados por aluminosilicatos

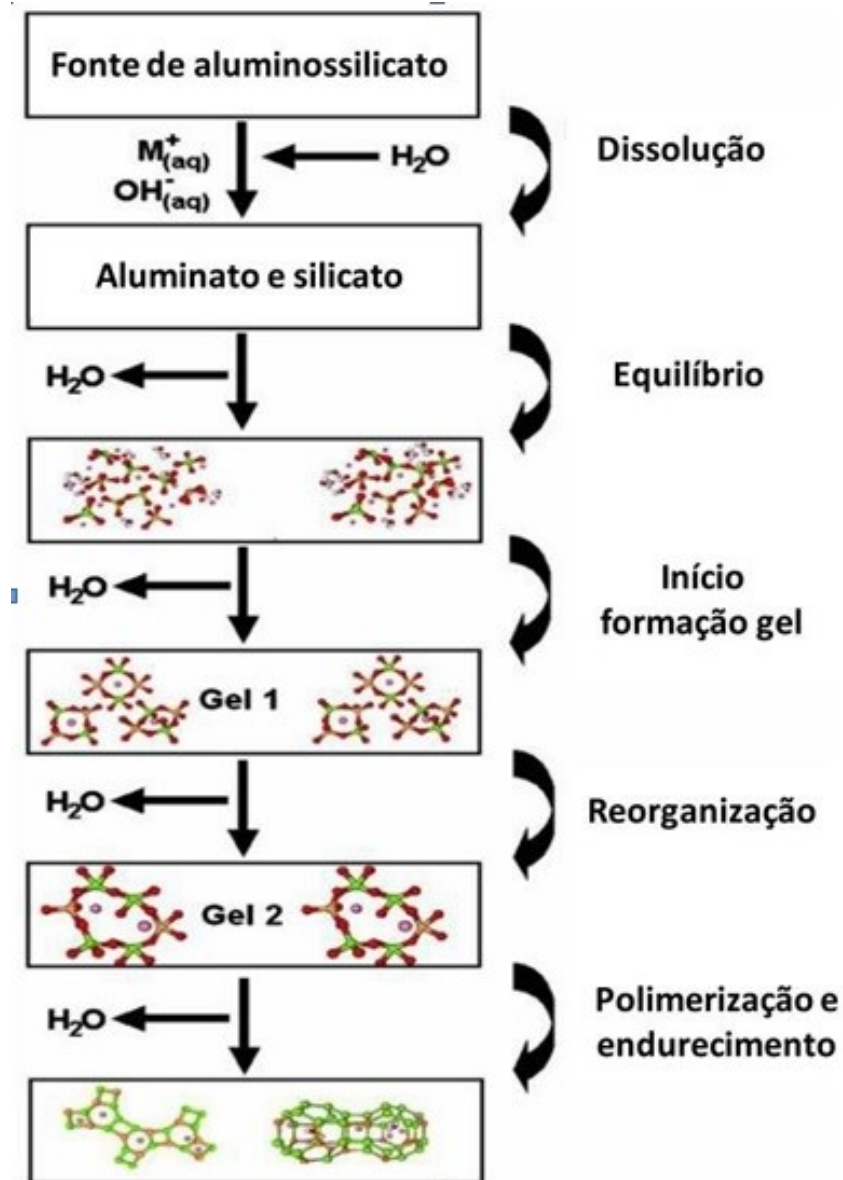


Fonte: Davidovits (1994, p. 2).

O mecanismo de reação do geopolímero ou geopolimerização trata-se de um processo exotérmico, devido à policondensação. Envolve a dissolução de alumínio (Al) e silício (Si) no meio alcalino, onde não só hidrolisa a superfície do material, mas também dissolve a pequena quantidade de Al e Si. Posteriormente ocorre a policondensação, através da reação de condensação, formando um gel que é transformado em uma rede tridimensional de estrutura silico-aluminato. A fase gel é altamente reativa e provavelmente produzida pela copolimerização de alumina e sílica individuais dissolvidas pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina (PINTO, 2007 *apud* VASSALO, 2013).

A formação dos geopolímeros é semelhante a das zeólitas naturais e ocorre em três etapas: a primeira é a dissolução (formando precursores livres), a segunda é a organização destes materiais e por fim, a recombinação e solidificação. A diferença entre os materiais encontra-se: no tempo de reação (que nas zeólitas é maior), estrutura (nas zeólitas é na final) e estrutura cristalina (enquanto o geopolímero é amorfo ou semicristalino, a zeólita é exclusivamente cristalina). Pode-se observar na figura 2a cinética de formação proposta por Glukhosky. A estrutura amorfa dos geopolímeros, que é adquirida devido ao rápido endurecimento da matriz, é uma das principais diferenças entre os geopolímeros e a estrutura cristalina das zeólitas (SANTA, 2012).

Figura 2 - Mecanismo de geopolimerização



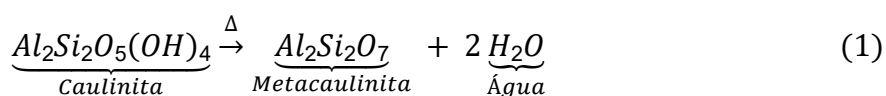
Fonte: Duxon, 2006.

A fabricação do geopolímero se dá com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade adequada de sílica e alumina na forma amorfa à semi-cristalina (BHARATH, 2017). Assim, aceitam em sua formulação a utilização de matérias-primas naturais e resíduos gerados na indústria, agricultura, diminuindo assim os custos de sua produção e o impacto ambiental gerado (SANTA, 2012).

2.3 Matérias-primas utilizadas na produção do geopolímero

2.3.1 Metacaulim

O metacaulim é um material pozolânico amorfo (de estrutura cristalina desordenada), obtido por processo industrial de ativação térmica entre 600 °C e 850 °C e moagem de argilas caulinitas e caulins. Essas matérias-primas são compostas predominantemente 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 essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina e com baixa granulometria. Esta reação pode ser descrita pela equação 1 (CUNHA *et al.*, 2010).



Como produto de ativação térmica o metacaulim é oriundo de argilas caulinitas e caulins. O Caulim tem em sua composição diversos elementos que geralmente são representados em forma de óxidos, o que acarreta na possibilidade de existir alguns elementos em formas mais complexas e muitas vezes não catalogadas. Como características principais, pode-se destacar: a cor branca e o ponto de fusão na faixa de 1650 a 1775°C. Quando comparada com outras argilas o caulim possui baixa resistência, granulometria mais grosseira e em sua estrutura apresenta lamelas hexagonais bem cristalizadas (BRITO, 2018).

O metacaulim possui em sua composição elementos primordiais para produção de geopolímeros, entre eles dióxido de silício (SiO_2), em torno de 52%, e óxido de alumínio (Al_2O_3) com aproximadamente 40%. Os outros 8% são de impurezas, e os minerais que as compõem são quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006).

Davidovits (1984) utilizava principalmente caulinita calcinada (metacaulim) como fonte de aluminossilicato para sintetizar geopolímeros. Muitos outros pesquisadores realizaram seus estudos tendo como foco o metacaulim como fonte principal de aluminossilicato, para esses pesquisadores a metacaulinita forma espécies que definem a estrutura geral dos geopolímeros (KOMNITSAS *et al.*, 2007).

2.3.2 Ativadores

A geopolimerização ocorre em condições altamente alcalinas entre aluminossilicatos que passaram por tratamento térmico e bases fortes como o hidróxido de potássio e de sódio (BRITO, 2018). O hidróxido de sódio (NaOH) tem sido utilizado como parte da solução ativadora, em vez do hidróxido de potássio (KOH) devido o primeiro ter um custo de produção bem mais baixo, o que praticamente define sua escolha (SILVA, 2012). Porém, os geopolímeros produzidos com KOH apresentam uma resistência à compressão 42% maior que aqueles produzidos com NaOH (YUN-MING *et al.*, 2016). Isso se dá devido a presença do cátion de potássio (K^+) que aumenta a desordem na fase gel (ZHANG *et al.*, 2017).

A preparação da solução para ativação alcalina envolve a mistura de: água, hidróxido de sódio ou potássio e silicato de sódio, porém podem ser utilizados outros sistemas de metais alcalinos ou misturas de álcalis diferentes. Esta solução precisa ser concentrada para evitar que o produto seja um zeolito cristalino em vez de um geopolímero, (AZIMI, *et al.*, 2016).

A ativação alcalina é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas(amorfas, parcialmente amorfas ou metaestáveis) em um compactado material cimentício (PALOMO *et al.*, 1999). Ao entrar em contato com uma solução alcalina as espécies de aluminossilicatos dissolvem-se, devido a lixiviação que ocorre de íons de alumínio(Al^{3+}) e silício (Si^{4+}), para que haja êxito nesse processo a concentração do ativador deve ser elevada (RATTANAASK *et al.*, 2014).

A escolha do ativador considerado ideal é através da concentração ser suficiente para que ocorra o balanceamento das cargas de Si^{4+} e Al^{3+} nos tetraedros (a carga negativa sobre o grupo AlO_4^- é responsável pelo balanceamento de carga Na^+ e/ou K^+). O excesso de ativador pode formar carbonato de sódio em contato com o ar (KONMITSAS *et al.*, 2007).

O cátion de Na^+ , é menor que o cátion de K^+ , o que se pode concluir é que o K^+ produz maior grau de condensação. No entanto, nos estudos de Duxson *et al.*, (2006), não se observou qualquer mudança ao trocar de cátion e concorda que o K^+ , por ser maior, tem tendência de formar mais oligômeros; no entanto, o Na^+ , por ser menor, é capaz de migrar através da rede do gel úmido. O NaOH aumenta a concentração de óxido de sódio(Na_2O), o que corresponde a um crescimento na resistência mecânica, isso porque a razão entre o SiO_2/Na_2O é um parâmetro

importante para que ocorra a reação satisfatória, a baixa do Na_2O diminui o pH e afeta a cinética da reação (OLIVIA *et al.*, 2014).

Segundo Santa (2012), um dado bastante relevante é a concentração a ser usada, a maioria dos autores defendem que seja entre 6-15 mols/l. A combinação de soluções é o que determina a força e o produto final dos geopolímeros e o uso de ativadores compostos são considerados mais eficientes.

2.3.3 Resíduos agrícolas

Levando em consideração a grande problemática ambiental, a indústria da construção civil é um dos ramos mais poluentes, devido a isso cresce o interesse e a necessidade de se desenvolver novos produtos e tecnologias mais sustentáveis. Nesse sentido, estudos realizados na última década comprovaram que resíduos orgânicos da agroindústria, como a cinza da casca de arroz, da madeira e do bagaço da cana-de-açúcar, que devido a sua abundante produção e disponibilidade, podem ser utilizados como matérias-primas para fabricação de novos produtos (FAZZAN, 2016; JÚLIO *et al.*, 2011; CASTALDELLI, 2013).

- Cinza de casca de arroz (CCA)

A CCA é obtida a partir da queima da casca de arroz para geração de energia. Onde, 1000 kg de arroz com casca produzem aproximadamente 200 kg de casca, algo entre 80 e 110 kg de farelo, dependendo do grau de moagem, e de 680 a 730 kg de arroz branco. De 18 a 20% do peso da casca de arroz é convertido em CCA após a incineração. Sua composição é basicamente de sílica amorfa (80-95%), com traços de CaO , MgO , K_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e Na_2O (PODE, 2016). Este alto teor de sílica na CCA deriva da membrana sílico-celulósica que se forma pela polimerização do ácido monossilícico (H_4SiO_4) quando a água evapora da estrutura da planta (PIRES, 2015).

A combustão da CCA em condições controladas pode elevar o seu teor de sílica amorfa, podendo transformar a CCA na matéria-prima mais rica em sílica. Além de barata e em grande abundância, a CCA possui outras grandes vantagens como: grande área superficial, alta reatividade e ser muito fina (DENG *et al.*, 2016).

A adição de cinza de casca de arroz em concreto diminui a segregação e está diretamente ligada com o aumento de resistência mecânica do concreto com menores idades, agindo como catalizador de resistência (CASCAES, 2016).

- Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

O resíduo da produção de açúcar é chamado de bagaço de cana e é produzido em grande volume. Este material fibroso é deixado após a cana-de-açúcar ser esmagada para extrair o suco. No Brasil, o bagaço de cana é queimado em caldeiras para produzir energia elétrica, resultando em um enorme volume de cinzas (TEIXEIRA *et al.*, 2014).

A combustão do bagaço de cana produz grande quantidade de componentes inorgânicos como sílica associada a quantidades menores de alumínio, ferro, álcalis e óxidos alcalino-terroso. Nos últimos anos foram estudados a incorporação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar como um potencial aditivo ao cimento (SOUZA *et al.*, 2011). Cordeiro *et al.* (2017), Adesanya *et al.* (2009) e Ban *et al.* (2011) mostram que a incorporação de cinzas de biomassa em materiais cimentícios poderia manter ou até melhorar o desempenho mecânico dos materiais cimentícios (XU *et al.*, 2019). Segundo Castaldelli (2013), isso ocorre devido às atividades pozolânica que influenciam nas propriedades químicas e mecânicas das pastas, argamassas e concretos. Segundo os estudos de Souza (2011), o efeito físico das pozolanas em pastas de cimento reflete no empacotamento da mistura, preenchendo os vazios entre as partículas de cimento por serem materiais mais finos por consequência melhora o desempenho mecânico da mistura.

2.3.4 Resíduos Industriais

Os geopolímeros são bastante utilizados na construção civil devido às suas propriedades serem similares ou superiores a de materiais cerâmicos aplicados nesse campo, no que se incluem as cerâmicas vermelhas, cimentos, concretos, entre outros. Desse modo se destaca o grande diferencial dos geopolímeros que se dá devido ao aspecto da sustentabilidade, pois os processos de geopolimerização podem ser energeticamente menos intensos (em comparação ao processo de produção do cimento Portland). Contudo, o principal ponto para o uso é que podem

ser produzidos através de matérias-primas cujo aproveitamento tem se transformado em uma questão de interesse mundial como a utilização de resíduos industriais. Dentre esses, as cinzas volantes e as escórias siderúrgicas destacam-se como os alvos de maior interesse e estudo (KOMNITSAS *et al.*, 2007; SILVA, 2006a; SILVA 2011).

- Escória de Aciaria

Na indústria siderúrgica, a escória de aciaria é um dos mais importantes subprodutos. Sua geração é na faixa de 100 a 150 kg por tonelada de aço produzido, dependendo das matérias-primas utilizadas e do processo de fabricação de aço empregado (ABM, 2008).

A escória de aciaria do convertedor Linz e Donawitz (LD) é gerada nas usinas integradas, que possuem resumidamente, as etapas de redução, refino e laminação. Basicamente existem três processos, caracterizados pelo emprego de diferentes tipos de fornos de refino: o Siemens-Martin (Open Heart – OH), o convertedor (Linz e Donawitz – LD ou Basic OxygenFurnace – BOF) utilizado no processo integrado e o forno elétrico a arco (Electric ArcFurnace - EAF), utilizado nas usinas semi-integradas (FREITAS, 2018).

As características químicas e físicas da escória, dos ativadores alcalinos, das condições de cura e adição de demais compostos são de extrema importância para a preparação, formação e propriedades dos geopolímeros à base de resíduos industriais (PEREIRA *et al.*, 2018).

- Escória de Alto Forno

A produção de ferro gusa se realiza em unidades industriais chamadas de alto forno, onde se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro separam as impurezas que os acompanham. As escórias se formam ao atingir a temperatura de fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes e as cinzas do coque. A escória fundida é uma massa que, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa e é conduzida por canais, até o lugar de resfriamento de acordo com a empresa (ARCELLORMITTAL, 2020).

A escória de alto-forno é o coproduto do refinamento siderúrgico com maior volume de geração, na faixa de 210 a 310 kg por tonelada de ferro gusa produzida.

Em razão do elevado volume gerado, é de suma importância seu reaproveitamento. Esse reaproveitamento já que tem se concretizado frente ao grande volume consumido pela indústria do cimento para utilização na substituição do clínquer (GESTÃO DE COPRODUTOS, 2008).

A escória de alto forno é um subproduto (não metálico) da fabricação de ferro fundido em alto forno, composto essencialmente por silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras fases (SIDDIQUE *et al.*, 2012).

A escória de alto forno é caracterizada como um material pozzolânico, uma vez que não apresenta propriedades cimentícias por si só, a menos que seja combinado com outros materiais cimentícios para sua ativação química (MALHOTRA, 1996; LEA, 1971).

Para o concreto endurecido, a utilização de escória pode contribuir para melhorar a resistência à compressão. Mas também se corre o risco de que a resistência do concreto sofra um decréscimo com a adição quando nenhum método de cura apropriado é empregado e o respectivo cuidado para o sistema cimentício empregado. Assim, tem-se que o desenvolvimento da resistência no concreto com escória de alto forno pode ser semelhante ao concreto normal se for curado à temperatura de 23°C aproximadamente (MADRID *et al.*, 2016)

- Cinza Volante

O uso de cinzas volantes para a produção de ligantes geopoliméricos tem sido investigada por vários cientistas devido à sua grande produção e sua pouca utilização, tornando-se um problema de armazenamento. Milhares de toneladas de cinza volante são produzidos anualmente e representam um problema ambiental e de saúde pública, devido, principalmente, a processos de percolação e problemas respiratórios, respectivamente (AZEVEDO *et al.*, 2017).

A cinza volante é definida por uma combinação de fases vítreas e amorfas, constituída principalmente pelos óxidos de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), hematita (Fe_2O_3) e cal (CaO), sendo os três primeiros os óxidos ácidos que reagem com os álcalis do ativador (XIE *et al.*, 2001).

A composição química da cinza varia tanto para lotes de mesma matéria-prima quanto para fontes diferentes dispersas pelo mundo, em função da origem do

carvão mineral, dos procedimentos de coleta, dos métodos de combustão e do próprio formato das partículas (HARDJITO *et al.*, 2005).

A cinza volante classe C vem sendo utilizada na formulação de geopolímeros que essa nova classe de material apresenta propriedades ligantes semelhantes aos cimentos convencionais, e a sua estrutura varia de amorfo a semicristalino que reagem em um meio alcalino que pode ser denominado também por polímero inorgânico. Para aumentar a reatividade da cinza volante, adiciona-se metacaulim como fonte de Si e Al em sua composição (BRITO *et al.*, 2018).

2.3.5 Resíduos Sólidos

- Lodo de estação de tratamento de água

O processo de tratamento de água no Brasil gera grande volume de lodo que necessita ser descartado, usualmente tendo sido lançado nos recursos hídricos próximos ou transportado a aterros sanitários de lixo urbano. Os resíduos, quando lançados nos cursos de água, sem o tratamento adequado colaboram para aumentar a concentração de metais tóxicos, além de diminuir significativamente a luminosidade do meio. Consequentemente, o tratamento e descarte é uma atividade complexa com custos operacionais elevados. O lodo das estações de tratamento de água (ETA) é um material de resíduo rico em minerais de silicatos e matéria orgânica. Com isso, se torna um material muito atrativo para a produção de geopolímeros (BERNARDO *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2013).

Dentre as diversas formas estudadas de empregar lodo de ETA destaca-se o uso in natura e calcinado, além do emprego integral e com substituição parcial, porém, o alvo deste estudo busca a forma que propicie o melhor custo benefício, alcançando o melhor produto com menor consumo de recursos, Geraldo, Fernandes e Camarini (2017) empregaram o lodo de ETA como precursor de geopolímero sem qualquer tipo de tratamento, principalmente para eliminação de matéria orgânica e umidade que segundo os autores, causaram a perda de resistência e ganho de porosidade.

Valores de proporções de alumina e sílica encontradas na bibliografia para resíduos de lodo de ETA apresentam-se favoráveis para a base de produção de geopolímero, uma vez que são semelhantes aos encontrados no metacaulim e nas

cinzas volantes, ambos materiais tradicionalmente utilizados na fabricação de geopolímeros. Para atingir características semelhantes a estes materiais o tratamento térmico é uma alternativa amplamente discutida na literatura, proporcionando um maior grau de reatividade e mineralização devido a ação da temperatura (OLIVERIA, 2019).

2.3.6 Agregado

Agregado é o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia. Este material desempenha importante papel nas argamassas e concretos, quer sob o ponto de vista econômico, quer sob ponto de vista técnico, exercendo influência benéfica sobre algumas propriedades importantes como: retração e resistência ao desgaste por abrasão, sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos (PETRUCCI, 1998).

De acordo com Neville (2016), pelo menos três quartos do concreto é composto por agregados, sendo, dessa forma, de grande importância o conhecimento de sua qualidade. Os agregados de má qualidade podem limitar a resistência do concreto e suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

Segundo a norma NBR 7211 (2009), os agregados naturais são encontrados na natureza (areia, seixos) e artificiais os que são obtidos pela ação do homem através de processos industriais ou do rejeito destes.

Segundo Jaques (2013), os agregados minerais mais usados em construção civil são divididos em:

- Agregados Miúdos: as areias;
- Agregados Graúdos: os cascalhos e as britas.

- Agregado Miúdo – Areia

Segundo a NBR 7211 (2009), o agregado miúdo ou areia natural é o material particulado de origem mineral no qual predomina o quartzo de diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e fica retido na peneira ABNT 0,75 mm. As areias podem ser extraídas dos rios, de cava e de britagem. Nos leitos dos rios as areias são retiradas dos depósitos sedimentares através de

sucção, que bombeiam a água, contendo cerca de 5 a 10% de areia, para lagoas de decantação. Já as areias de cava são extraídas por escavação mecânica ou desmonte hidráulico dos depósitos aluviais em fundos de vales, cobertos por capa de solo (COSTA, 2005).

A granulometria é outra importante propriedade do agregado miúdo e há várias razões para especificação de limites granulométricos dos agregados, o mais importante, contudo são a sua influência na trabalhabilidade e custo. Por exemplo, areias muito grossa produzem misturas de concreto ásperas e não trabalháveis, e areias muito finas aumentam o consumo de água, elevando o consumo de cimento para que a relação água/cimento desejada seja atingida, sendo, portanto antieconômicas. Em geral, agregados que possuam uma granulometria contínua tendem a produzir misturas de concreto mais econômico e trabalháveis (MEHTA *et al.*, 1994).

2.4 Aplicações dos geopolímeros

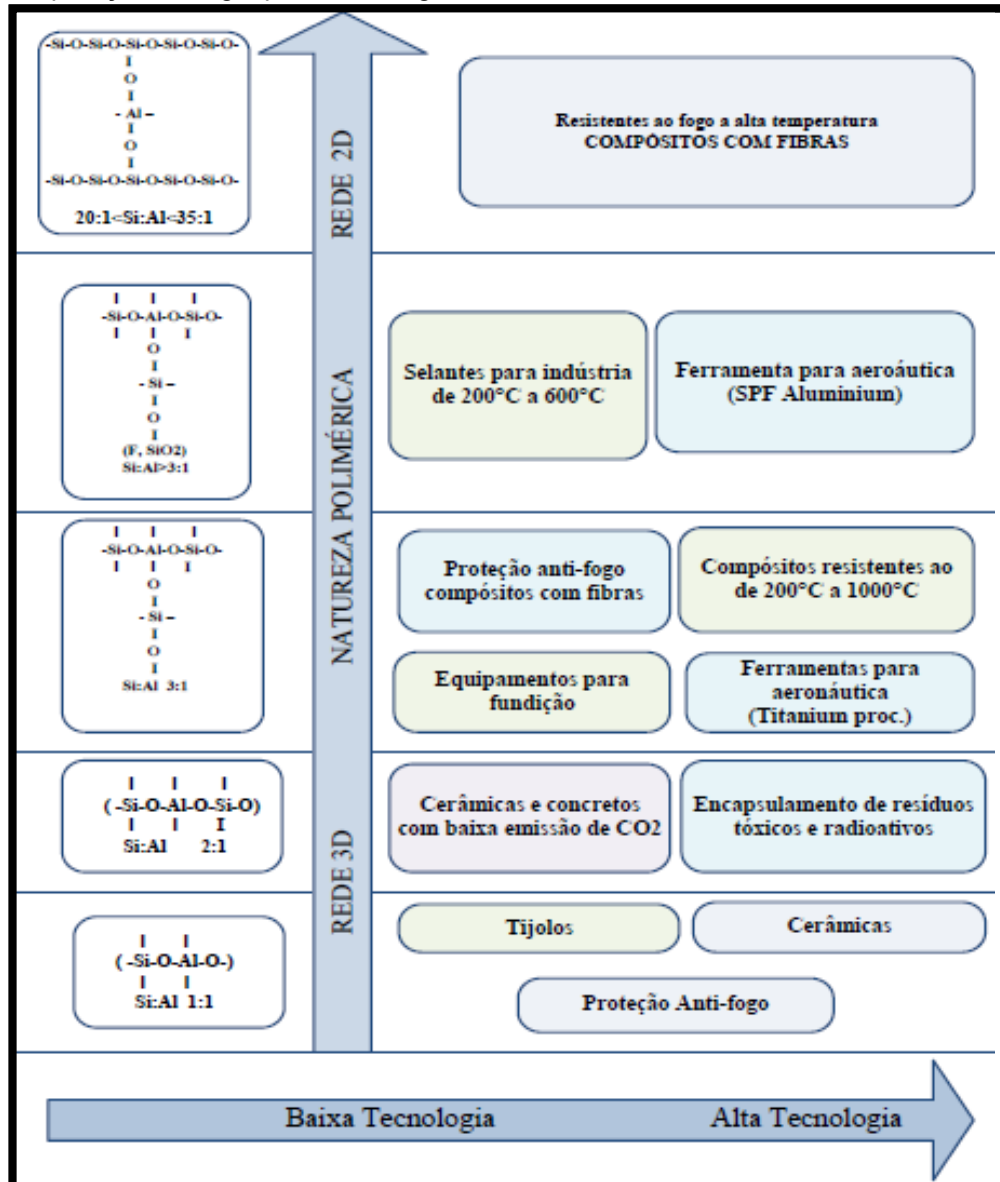
Os materiais geopoliméricos apresentam um comportamento similar aos materiais à base de cimento. São produtos atrativos em termos de mercado, possuem baixo custo e menor agressão ao meio ambiente, sendo um material propício para substituir o cimento Portland, tendo uma diversidade para sua aplicação (ARAÚJO, 2017).

A grande variedade do potencial de aplicação dos materiais geopoliméricos inclui: materiais de construções e pavimentação, materiais resistentes ao fogo, artefatos de decoração, isolantes térmicos, materiais com baixa tecnologia, telhas de cerâmica, itens refratários resistentes a choque térmico, materiais de fundição, materiais compósitos para interiores de aeronaves e automóveis, sistemas de resinas de alta tecnologia, podem servir de barreira de contenção para resíduos tóxicos e radioativos (DAVIDOVITS, 2002).

Os geopolímeros podem ser aplicados a altas temperaturas, onde os resultados dos desempenhos termomecânicos do geopolímero apresentaram-se excelentes em todas as altas temperaturas e tempos de exposição, não apresentando mudanças significativas na sua estrutura e nem aparecimento de qualquer partícula de Portlandita, mostraram que os geopolímeros permanecem íntegros e mantendo suas características estruturais (PORTO, 2018).

A figura 3 produzida por Davidovits (2002) e adaptada por Santa (2012) apresenta diversas aplicações que os geopolímeros podem assumir, segundo a sua estrutura química.

Figura 3 - Aplicações dos geopolímeros segundo sua estrutura molecular.



Fonte: Davidovits (2002) adaptado por Santa (2012, p. 67).

Com a figura 3, é possível observar inúmeras aplicações para o geopolímero devido a diferentes razões molares e dosagem. As principais estão ligadas a serem utilizadas para o cimento e o concreto geopolimérico, a partir de uma reação pozolânica controlada, para obter um polímero totalmente inorgânico, de alta resistência mecânica sendo capaz de ser processada a temperatura ambiente (SILVA, 2011).

Silva (2006a e 2006b) em seus estudos de concreto de cimento geopolimérico mostra que desenvolvendo uma dosagem adequada das matérias-primas do geopolímero têm-se melhores resultados. O desempenho foi excelente quando o concreto foi submetido a ensaios de resistência a fadiga com variações de tensão.

Sonafrank (2010) expõe em seu trabalho, que na Austrália, Canadá e Europa, o concreto geopolimérico é utilizado como matéria-prima para dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, reparações de rodovias, obras de infraestrutura e outros.

Atualmente, o maior exemplo de construção geopolimérica é o *Brisbane West Wellcamp Airport* (figura 4), localizado na Austrália. Neste projeto foram utilizados 40.000 m³ (100.000 toneladas) de concreto geopolimérico, tornando-se assim a maior aplicação no mundo. Com esta escolha, deixou-se de emitir 6.600 toneladas de gás carbônico na atmosfera (INSTITUTE, 2020).

Figura 4 - Brisbane West Wellcamp Airport



Fonte: Toowoomba Wellcamp Airport, 2019. Disponível em: <https://www.wellcamp.com.au/corporate/airline-development/airport-operations/>. Acessado em: 12/01/2021.

Os estudos de Candido (2018) mostraram que no concreto de cimento geopolimérico (CCG) os agregados contribuem para o melhor desempenho mecânico e é mais denso devido a ausência de partículas frágeis de Portlandita. Concluíram também que o alto desempenho a fadiga do CCG é bem mais vantajoso em relação ao concreto de cimento Portland e que pode ser aplicado para construções civis como pavimentos de tráfego pesado.

De acordo com Pereira (2018), o concreto de cimento geopolimérico (CCG) se comportou como o esperado ao desenvolver resistência a compressão de forma razoável após duas horas de cura, enquanto que o concreto de cimento Portland de alto rendimento é ainda macio como pasta. Em seu estudo se pode concluir que desde os 7 dias até os 2 anos de idade, os dois concretos apresentam resistência a compressão semelhantes e são especificados tanto para a construção civil quanto pra pavimentos com tráfego pesado.

2.5 Microscopia do geopolímero

Ao longo dos anos, com a notoriedade do desenvolvimento de materiais álcali-ativados, o pesquisador Van Deventer(1998) investigou a microscopia e em seus estudos utilizando cinzas volantes observou a presença de materiais não reagidos que pode influenciar na resistência a compressão, pois não há boa adesão entre partícula não reagida e fase amorfa.

No ano de 2002, o pesquisador Hos (2002) em seus estudos de desenvolvimento de aluminossilicato sintético para usar em geopolímeros, observou na microscopia a presença de nanoporose estrutura de poros abertos que presumidamente facilitam o escape de água durante a secagem sem promovem rachaduras. Já os estudos de Bell (2004), mostram que a morfologia dos poros não é uniforme e com ampla distribuição e isso pode ser visto em regiões com boa reação entre os componentes, nas áreas que não há reação ou estejam parcialmente reagidos são encontradas estruturas de folhas de metacaulim e componente.

Em 2004, Feng (2004) ao submeter a geopolimerização a ultrassom, observou na sua microestrutura a formação de duas fases, uma homogênea e densa e a outra com partículas que pode ser atribuída a presença de quartzo. A ligação melhorada entre o quartzo e a fase gel pode ser um importante fator ao aumento de compressão e com a utilização de ultrassom pode se encontrar menos rachaduras.

No ano de 2006, Yunsheng (2006) observou na sua microscopia a influencia do aumento da proporção de cinzas volantes na contribuição do aparecimento de poros e a presença de material não reagido, ou seja, quanto menor a proporção mais densa e compacta a estrutura ira ficar e com menos chances de aparecimento de trincas.

Em 2008, Yip (2008) fez uma análise na concentração de silicato a ser usado na geopolimerização e observou que com o aumento da quantidade de silicato resultou no aumento de partículas não reagidas situadas dentro do gel geopolimérico.

Skaf (2008) em seu trabalho com geopolímero afirma que A presença de matérias-primas não reagidas pode estar associada à baixa reatividade da matéria-prima e/ou à álcali-ativação insuficiente do material.

Em 2017, Tho-in (2017) observa que com o aumento do percentual de cinzas volantes aumenta o numero de fissuras e apresentam menor densidade do que a pasta de referencia e aumentou a quantidade de material não reagido.

Em 2019, Hamedet. *al.*(2019) em seus estudos com argamassa conclui que com o aumento da adição de casca de arroz, diminui a densificação devido a presença de poros e com isso diminui a resistência a compressão.

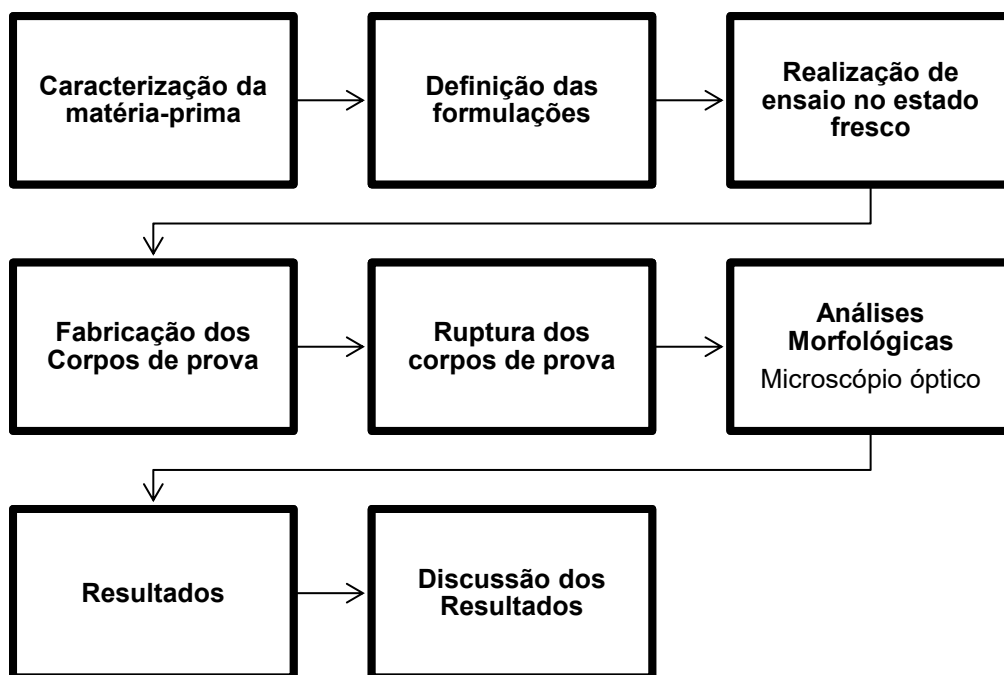
Em 2019, Yousefi (2019) aponta em seus estudos que microfissuras começam a aparecer no geopolímero com a adição de 20% de escória e que tal trinca pode aparecer devido ao encolhimento dos produtos de reação.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a caracterização das matérias primas, produção dos corpos de prova e análises foram seguidas rigorosamente as normas técnicas e procedimentos experimentais desenvolvidos e consolidados pelo grupo de pesquisa materiais compósitos geopoliméricos da UFPA.

As pastas e argamassas geopoliméricas foram preparadas no laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua). Já as caracterizações das matérias-primas foram feitas no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal do Pará – IFPA – Belém e no Laboratório de Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua). A sequência e as etapas do processo do trabalho são mostradas no fluxograma da figura 5.

Figura 5–Fluxograma das etapas do desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autor, 2021.

3.1 Materiais

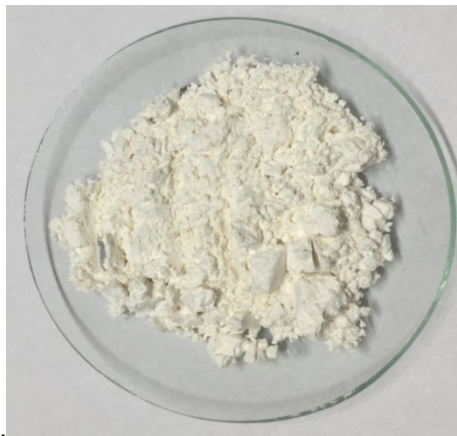
Para a produção da pasta e argamassa geopolimérica foram utilizados os seguintes materiais:

- Metacaulim (MKL), como fonte de silício (Si) e alumínio (Al);

- Escória de alto forno (EAF), como fonte de cálcio (Ca);
- Solução alcalina: água (H_2O) + hidróxido de potássio (KOH) + Silicato de sódio, como agente ativador alcalino;
- Areia comercial, como agregado miúdo.

A figura 6 apresenta os materiais utilizados na produção das pastas e argamassas geopoliméricas.

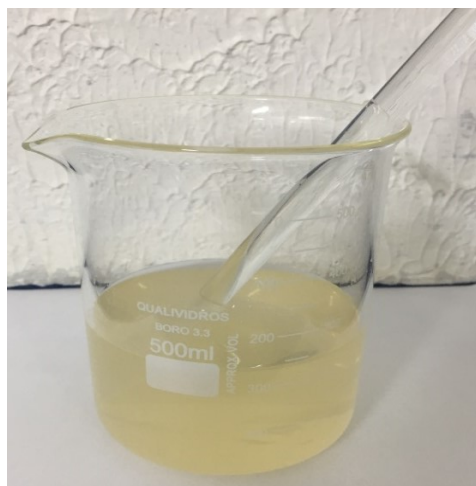
Figura 6 – Matérias-primas utilizadas na produção do geopolímero: (a) metacaulim, (b) EAF, (c) solução alcalina e (d) areia.



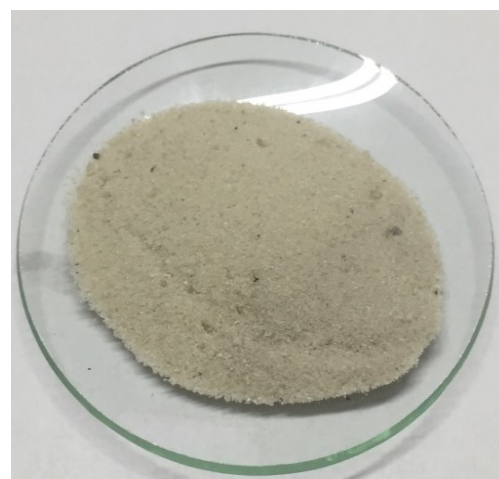
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor, 2021.

3.1.1 Metacaulim (MKL)

O metacaulim escolhido como fonte de alumínio e silício é o produto da calcinação do Caulim Comercial como é mostrado na equação 1. As análises mineralógicas realizadas no material foi através da Difração de Raios-X (DRX).

3.1.2 Escória de alto forno (EAF)

O resíduo utilizado foi a escória de alto forno, de pH alcalino, cedido pela empresa Cimento Verde do Brasil, localizada no estado do Maranhão, onde foi utilizada como fonte de cálcio. A caracterização desse material foi feita através da Difração de Raios-X (DRX).

3.1.3 Solução alcalina

A solução alcalina é composta por H_2O (água), KOH e silicato de sódio alcalino ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$). A água utilizada foi do tipo destilada cedida pelo Laboratório de química da UFPA- Campus Ananindeua. O Hidróxido de Potássio comercial, da empresa Merk, foi utilizado com o intuito de manter o pH básico da solução, o que é fundamental para que ocorra a reação de geopolimerização, suas características físicas foram fornecidas pela empresa e estão presentes na tabela 1.

A escolha da utilização do KOH foi por meio de trabalhos anteriores que mostraram uma melhor interação na formação de sílica reativana reação de KOH com dióxido de silício (SiO_2), que se obtém os silicatos (PORTO, 2018).

Tabela 1 - Características físicas do KOH.

Estado físico	Sol. hidrocópico
Aparência	Lentilhas
Cor	Branças
Massa especif.	2,04 g/cm ³
pH	14
Solubilidade em água	Total

Fonte: Merck.

O silicato de sódio alcalino comercial, da empresa Parquímica, foi utilizado com o intuito de fornecer de forma suplementar SiO_2 . As características químicas e físicas foram fornecidas pela empresa e constam nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Características químicas do silicato de sódio (SS)

Óxidos	Porcentagem
SiO ₂	33,15
Na ₂ O	14,81
H ₂ O	52,04

Fonte: Parquímica

Tabela 3- Características físicas do silicato.

Estado físico	Líquido
Aparência	Viscoso
Cor	Transparente
Solubilidade em água	Total
PH	12,51
Massa específica	26 g/cm ³
Voláteis	0%

Fonte: Parquímica.

3.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no trabalho foi a areia comercial, onde se utilizou o passante na peneira de 4,8 mm. A areia é proveniente da Região metropolitana de Belém, onde foi lavada e seca em estufa a temperatura de 100 ± 5 °C por 4 horas, da marca QUIMIS de capacidade 200°C, de acordo com a norma técnica NBR 7211(2005).

3.2 Metodologia experimental

Para a metodologia experimental, procurou-se avaliar a morfologia da pasta e argamassa de geopolímero produzido com metacaulim e escória de alto forno. Sendo assim, foram desenvolvidos os seguintes estudos: caracterização física e química dos materiais utilizados e avaliação morfológica do geopolímero após a ruptura utilizando prensa hidráulica manual.

3.2.1 Calcinação do caulim para obtenção do metacaulim

Para a produção do trabalho foi utilizado o tempo de 2 horas e a temperatura de 850°C com base nos estudos preliminares de Porto (2018), seguiu-se também as recomendações dos estudos de Silva (2011). O forno utilizado foi da marca Solidsteel 16L com ate 1200 °C para o processo de calcinação, e é mostrado na figura 7.

Figura 7 – Forno utilizado para calcinação.

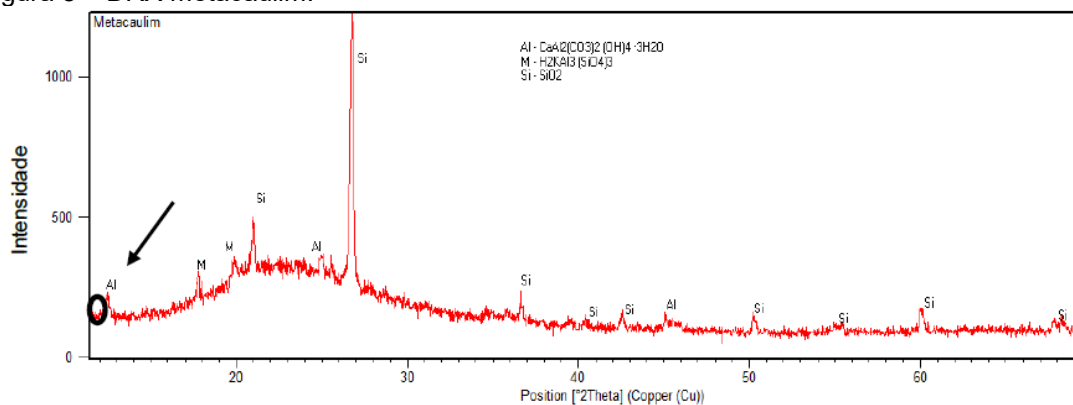


Fonte: Autor, (2021).

3.2.1.1 DRX do Metacaulim.

A análise mineralógica por difratograma de raios-X do metacaulim foi feita com o intuito de observar a amorfização do material é apresentada na figura 8.

Figura 8 – DRX metacaulim.



Fonte: Porto, 2019.

O DRX mostra as transformações ocorridas após a ativação térmica, onde o caulim torna-se um composto amorfo. O tratamento térmico a 850 °C por 2 horas causa uma diminuição na intensidade dos picos do difratograma, indicando a perda de cristalinidade o que pode ser visto no círculo indicado no DRX, onde no $2\theta \approx 12,5^\circ$ não se observa o pico da caulinita, característico do metacaulim. O pico mais alto do difratograma corresponde ao quartzo (SiO_2), porém aparecem também as fases Alumohidrocalcita ($\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e Mica ($\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$). O

Quartzo presente está ligado as concentrações de silício, a Alumohidrocalcita com a presença de alumínio e cálcio enquanto a Mica é pelo tero e potássio e alumínio da amostra. Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Lima *et. al.* (2016) ao verificar a potencialidade do metacaulim em substituição parcial de cimento.

3.2.2 Escória de Alto Forno (EAF)

O resíduo foi seco em estufa (marca QUIMIS) por 24 horas à $100 \pm 5^\circ \text{C}$, sendo moída em moinho de bolas de marca MATOLI – 070M016 como mostra a figura 9, no Instituto Federal do Pará – IFPA. Para o beneficiamento, seguiram-se os parâmetros: foi colocada 1,5 kg de EAF no moinho por 3 (três) horas e posteriormente foi peneirado em peneirador da marca ROTAP, utilizando o passante na peneira de #200 mesh (abertura de $75 \mu\text{m}$).

Figura 9 - Moinho de bolas.

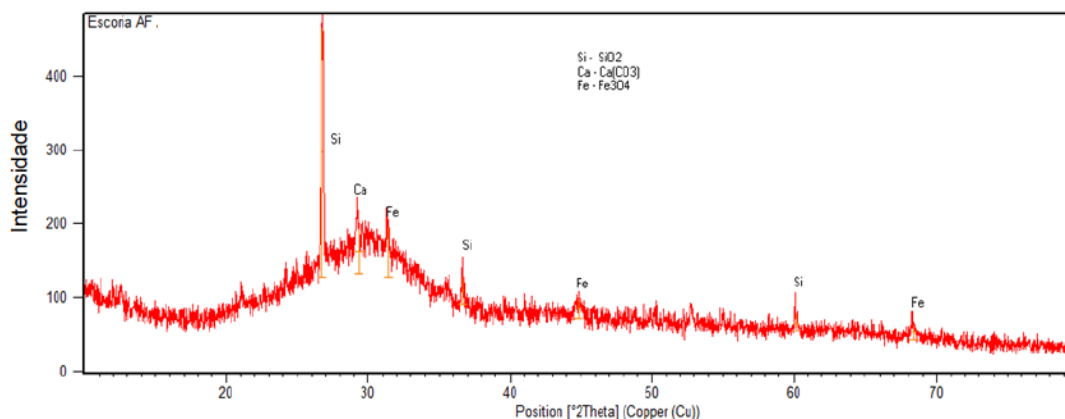


Fonte: Porto, 2019.

3.2.2.1 DRX da escória de alto forno

A figura 10 apresenta as fases mineralógicas da Escória de Alto Forno, obtidas através da análise de DRX.

Figura 10 – DRX escória de alto forno.



Fonte: Porto, 2019.

Nota-se na figura 16 que a EAF pode estar predominantemente amorfa, mas apresenta alguns picos de cristalinidade. Esses picos, segundo Pimentel et. al (2017) e Silva (2006) são devido ao processo de resfriamento da EAF de forma lenta e em condições ambientes não dando tempo para a formação dos cristais. Os picos mostrados são de Quartzo (SiO_2), Calcita (CaCO_3) e Magnetita (Fe_3O_4).

3.2.3 Metodologia da obtenção da pasta geopolimérica

Para os estudos da pasta foram utilizados os percentuais 0%, 35%, 45%, 55% e 65%, todos em relação a quantidade de escória na massa seca. Os percentuais adotados são com base nos estudos de Porto (2019) e Silva (2011), do grupo de pesquisa de materiais compósitos da UFPA- Campus Ananindeua, que utilizam percentuais de EAF variando de 40% a 50%. A escolha dos percentuais foi feita com o objetivo de investigar os percentuais de escória ainda não avaliados pelo grupo de pesquisa em materiais compósitos UFPA campus Ananindeua. As confecções das pastas foram feitas em relação ao metacaulim/escória para após o rompimento fazer a análise morfológica. As pastas foram moldadas em cinco (5) Corpos de prova (CP's) cilíndricos metálicos de Ø2,5 cm de diâmetro X 5 cm de altura para cada formulação, com o tempo de cura de 1 e 7 dias, para posterior ruptura.

3.2.4 Preparação dos CP'S de pasta geopolimérica

O material utilizado foi aferido utilizando balança da marca BALMARK emodelo ELP-6/15/30 e identificado de acordo com o percentual de cada formulação como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11–Separação dos insumos das formulações 0%,35% e 45%.



Fonte: Autor, 2021.

O processo para a obtenção da pasta ocorreu utilizando liquidificador industrial da marca SpoluAttack. O procedimento utilizado foi: adicionar a solução alcalina, em seguida se colocou os pós, misturou-se no liquidificador por 3 minutos e então foram dispostos nos moldes.

A disposição dos moldes da pasta geopolimérica pode ser vista na figura 12.

Figura 12 –Disposição dos moldes de (Ø2,5X5) cm.



Fonte: Autor, 2021.

3.2.5 Metodologia da obtenção da argamassa geopolimérica

No estudo da argamassa geopolimérica, foram utilizados os métodos de Helene e Terzian (1993) e de Silva (2011), para determinações dos percentuais de areia para a argamassa. Tendo como base esses estudos, houve a necessidade de

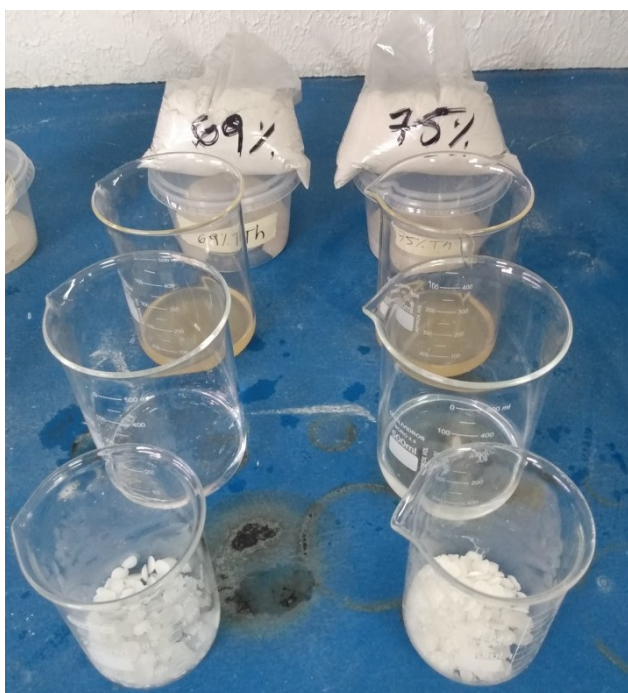
procurar o percentual ideal de areia para a argamassa geopolimérica através dos seguintes percentuais: 0%,29%,59%,69%,75% e 81%. Levando em consideração o melhor resultado de pasta de Porto (2019), que foi 45% de EAF, foi realizada a variação do percentual de areia no geopolímero desenvolvido no presente estudo.

Foram moldados cinco (5) CP's metálicos de Ø5 cm de diâmetro X10 cm de altura e tempo de cura de 1 e 7 dias em temperatura ambiente de acordo com Silva (2011).

3.2.6 Preparação dos CP'S de argamassa geopolimérica

O material utilizado foi aferido utilizando balança da marca BALMARK modelo ELP-6/15/30 e identificado de acordo com o percentual de cada formulação como pode ser visto na figura 13.

Figura 13 – Separação das formulações de argamassa 69% e 75% de areia.



Fonte: Autor, 2021.

O processo para a obtenção da argamassa ocorreu utilizando furadeira de bancada industrial da marca STANLEY 5 rotações. O procedimento para preparação

foi: adicionou-se areia, solução alcalina e os pós, em seguida se misturou por 3,5 minutos e então foram moldados os CP'S.

Após esses procedimentos os CP'S foram moldados, como mostra a figura 14.

Figura 14 – Disposição dos moldes de argamassa com 0% de areia.



Fonte: Autor, 2021.

3.2.7 Tempo de pega

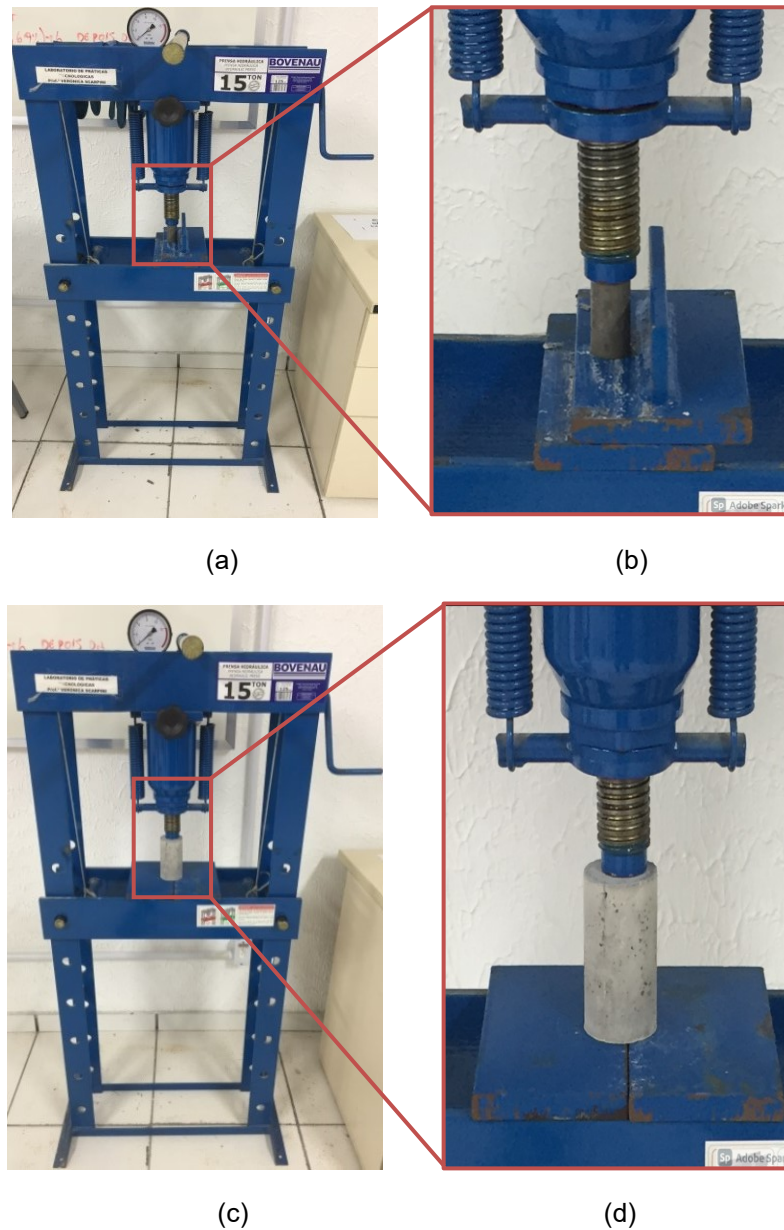
O tempo de pega foi verificado através da cronometragem do início da moldagem até o estado endurecido dos CP's. O método utilizado foi o toque na superfície do CP verificando de 5 em 5 minutos se variou para o estado endurecido.

3.2.8 Rompimento dos CP's

Para romper os CP'S de pasta e argamassa, nos tempos de cura de 1 e 7 dias, utilizou-se uma prensa hidráulica de 15 ton da marca BOVENAU. As cargas aplicadas, para 1 dia e 7 dias, foram de 1 ton para pasta e 3 ton para argamassa. A prensa utilizada foi exclusivamente para romper os CP's.

O rompimento dos CP'S pode ser visto na figura 15.

Figura 15 – Rompimento de 1 CP de com 45% de EA: a) Pasta, b)disposição do CP de pasta na prensac) argamassa com 29% de areia e d) disposição do CP de argamassa na prensa.

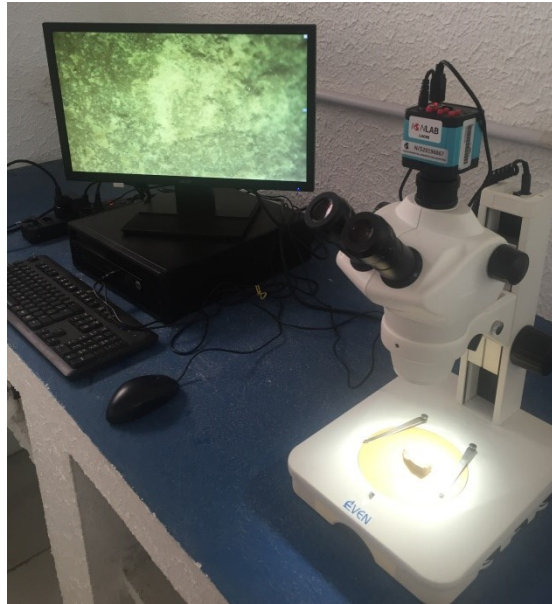


Fonte: Autor, 2021.

3.2.9 Microscopia óptica

As amostras foram extraídas após rompimento com 1 e 7 dias de cura. A análise foi feita no laboratório de caracterização dos materiais da UFPA – Campus Ananindeua, utilizando Microscópio Estereoscópio Binocular Zoom 1X ~ 4X Aumento 10X da marca EVEN com câmera acoplada, como mostra a figura 16.

Figura 16 – Microscópio EVEN com amostra de pasta de 45% de EAF.



Fonte: Autor, 2021.

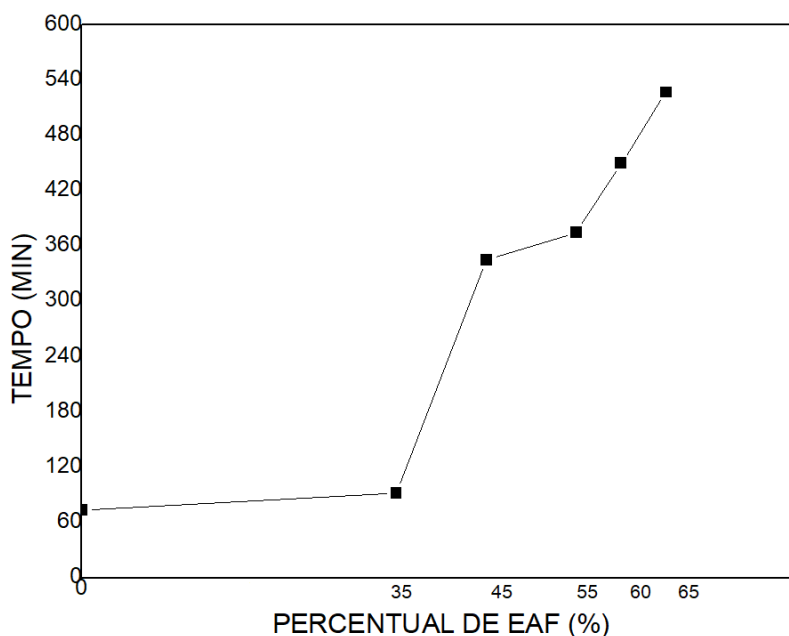
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tempo de pega

4.1.1 Pasta geopolimérica

A figura 17 mostra o gráfico com o tempo de pega das formulações de 0%,35%,45%,55%,60% e 65% em relação a quantidade de EAF de pastas geopoliméricas para posterior fratura e microscopia.

Figura 17 – Gráfico de tempo de pega de pasta geopolimérica.



Fonte:Autor, 2021.

O gráfico mostra que com 0% o tempo de pega ficou em 74 minutos, para 35% aumentou para 92 minutos, 45% apresentou o tempo de 345 minutos, pode-se observar que ocorreu um grande salto no tempo de 35% para 45%. Para 55% de EAF o tempo foi de 375 minutos, o de 60% mostra o tempo de 450 minutos e finalizando com 65% e o tempo de 527 minutos. É possível observar que de acordo com o aumento do percentual de EAF, a tendência é aumentar o tempo de pega.

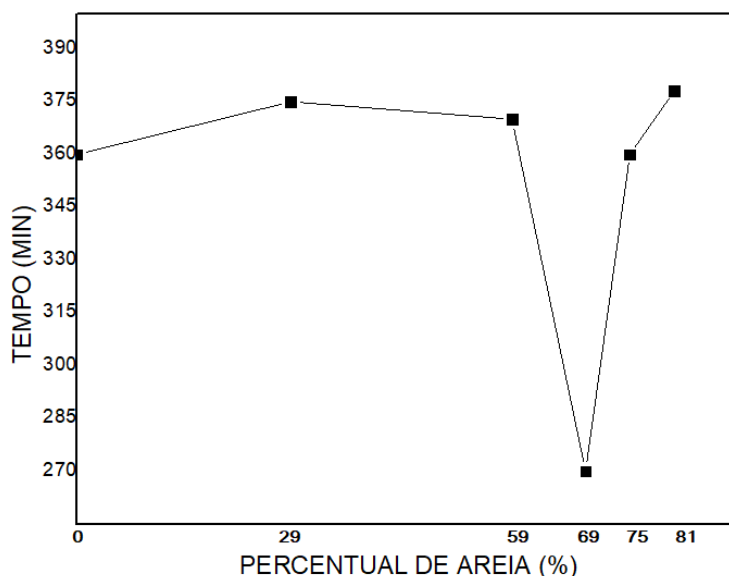
Nos estudos de Langaro (2016), que trata da utilização de escória de alto forno em cimentos álcali ativado, mostra uma redução no tempo de pega ao aumentar a quantidade de cálcio fornecido pela EAF, completamente diferente do

que mostra a figura 17, no entanto Freitas (2008) ressalta a importância da razão molar para a diminuição do tempo de pega, quanto maior a concentração, menor o tempo de pega e chama a atenção para o excesso da concentração não atrapalhar a trabalhabilidade do material.

4.2.2 Argamassa geopolimérica

A figura 18 mostra o gráfico com o tempo de pega das formulações de 0%,29%,59%,69%,75% e 81% em relação a quantidade de areia de argamassas geopoliméricas para posterior fratura e microscopia.

Figura 18 - Gráfico de tempo de pega de argamassa geopolimérica.



Fonte: autor, 2021.

O gráfico mostra que a pasta sem adição de areia teve um tempo de pega de 360 minutos, com 29% de areia o tempo subiu para 375 minutos e houve uma queda para a formulação de 59% de areia com o tempo de 370. Para 69% de areia o tempo foi de 270 minutos, ocorrendo uma queda brusca no tempo de pega quando comparado aos outros percentuais. Para 75% de areia o tempo foi de 360 minutos e 81% foi de 378 minutos. Pode-se perceber que não houve uma relação consistente para a associação do tempo de pega com o aumento da proporção de areia, aumentasse o tempo de pega, pois existem três aumentos 0% para 29%, 69% para 75% e 75% para 81%, e duas quedas 29% para 59% e 59% para 69% de areia.

Isso pode ter ocorrido devido a diminuição da razão líquido/sólido, de acordo com Caballero (2017), diminui o tempo de queda, no entanto isso ocorre quando se tem boa dosagem da concentração do ativador alcalino, caso contrário a reação de geopolimerização será tardia. Os resultados da figura 18 não condizem com o que foi apresentado por Kretzer (2020) que encontra diminuição no tempo de pega ao aumentar a porcentagem de areia. A diferença dos resultados pode estar associada à quantidade de água na mistura. A falta de água pode causar uma incompleta ativação, ou ainda, o excesso de água pode vir a reduzir a taxa de geopolimerização devido ao efeito de diluição (ZUHUA *et al.*, 2009). O melhor tempo de pega foi com 69% de areia, pode ter ocorrido devido a melhor relação entre líquido/sólido e concentração de ativador alcalino.

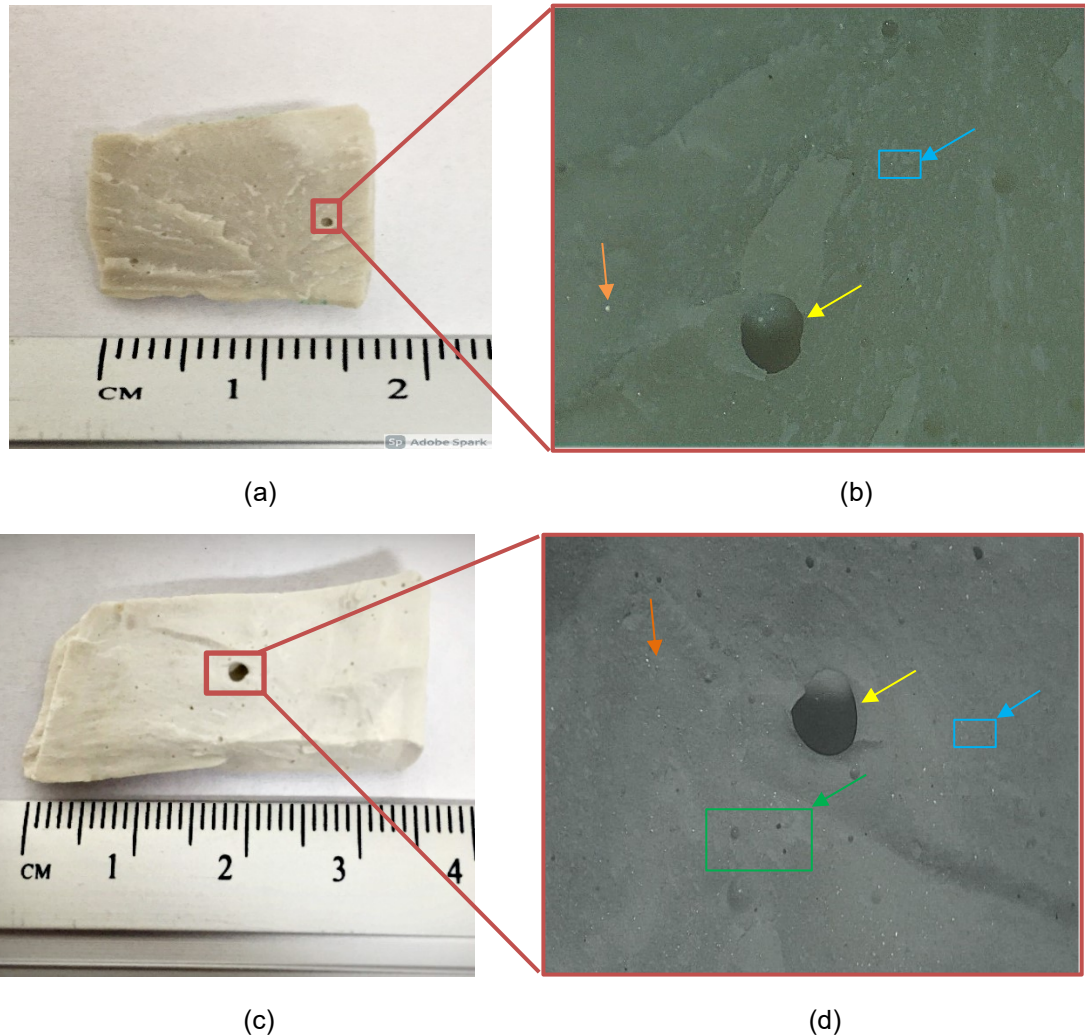
4.3 Microscopia Óptica

Foram obtidas as imagens da superfície de fratura de pasta e argamassa rompidas na prensa hidráulica aos 1 e 7 dias de cura, procurando observar a morfologia (pasta e argamassa) e as características da interface do agregado miúdo com a matriz geopolimérica (argamassa).

4.3.1 Microscopia óptica da pasta geopolimérica

As micrografias da Figura 19 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de idade para a proporção de 0% de EAF, ou seja, somente metacaulim. As setas verdes mostram microporos, as setas amarelas macroporos, as setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 19 – Macro e microscopia para 0% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



Fonte:Autor, 2021.

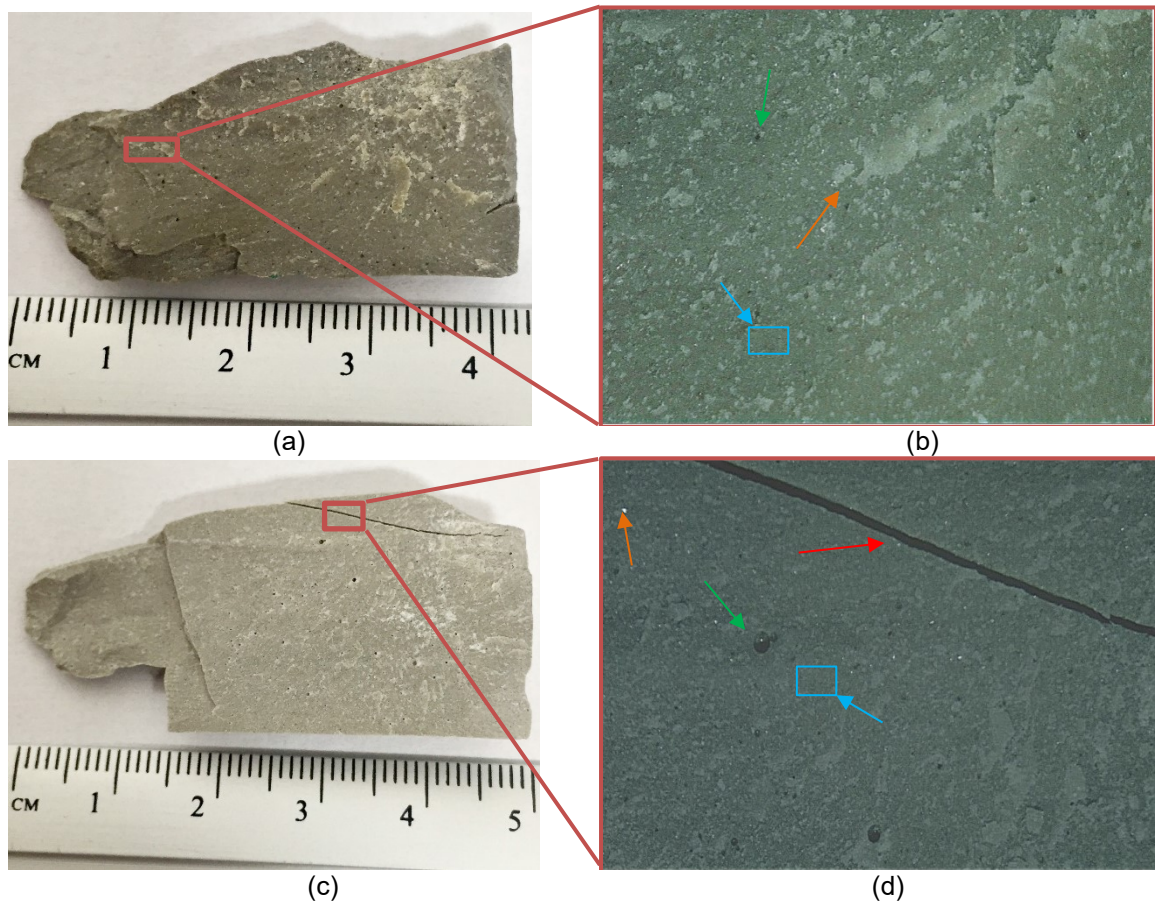
Na Figura 19a, pode-se observar a presença de Macroporos, microporos e superfície de fratura irregular e com a Figura 19b é possível analisar a porosidade do material assim como homogeneização na superfície de fratura, porém com alguns pontos de material não reagido. Para o tempo de cura de 7 dias de acordo com as figuras 19c e 19d, pode-se observar que as características se mantiveram como visto com 1 dia de cura com exceção da quantidade de microporos que aumentou.

A quantidade de poros e o tamanho está associado a quantidade do ativador alcalino e sua concentração, os estudos de Silva (2019) mostram que com o aumento da concentração do ativador alcalino a porosidade aberta aumenta e a porosidade fechada diminui, isso ocorre devido ao aumento da viscosidade que

dificulta a expansão das bolhas. Para Skaf (2008) em seu estudo de concentração de ativador alcalino, a quantidade de metacaulim não reagido está associado a reatividade e concentração do ativador alcalino.

As micrografias da figura 20 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 35% de EAF. As setas vermelhas mostram trincas, as setas verdes mostram microporos, as setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 20 – Macro e microscopia para 35% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



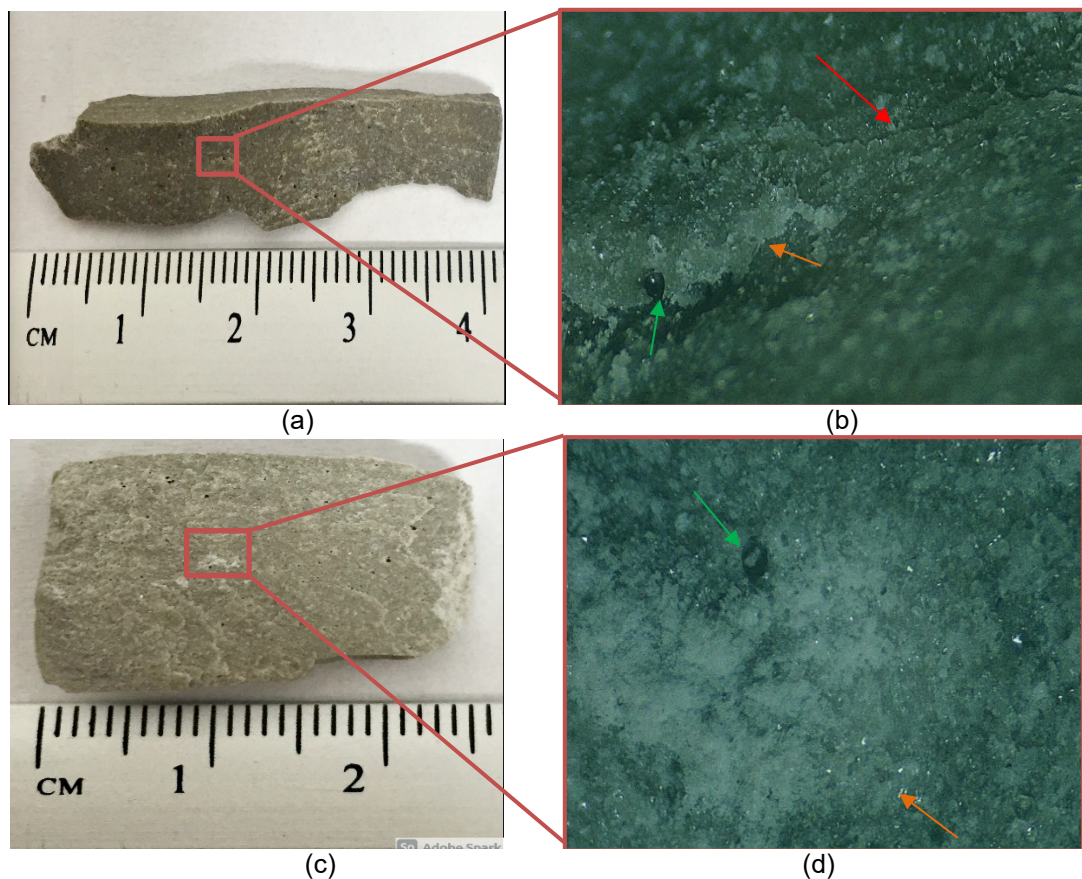
Fonte: Autor, 2021.

A figura 20a mostra uma superfície de fratura irregular, observa-se a presença de microporos e laminas de material não reagido. Na figura 20b, pode-se notar a comprovação da existência de microporos distribuídos não uniformes na região analisada, a presença de material não reagido, e homogeneidade. Para as figuras 20c e 20d, nota-se a presença de material não reagido, porém em menor

quantidade, redução na quantidade aparente de poros e a presença de uma trinca no topo da imagem que pode ter sido ocasionada pela concentração de tensão na quantidade de material não reagido ou poros, que torna frágil o material. Yousefi (2019), em seu estudo com carregamento de EAF, mostrou em seus resultados o aparecimento de microfissuras a partir da adição de 20% de EAF.

As micrografias da figura 21 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 45% de EAF. As setas vermelhas mostram trincas, as setas verdes mostram microporos e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 21 – Macro e microscopia para 45% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



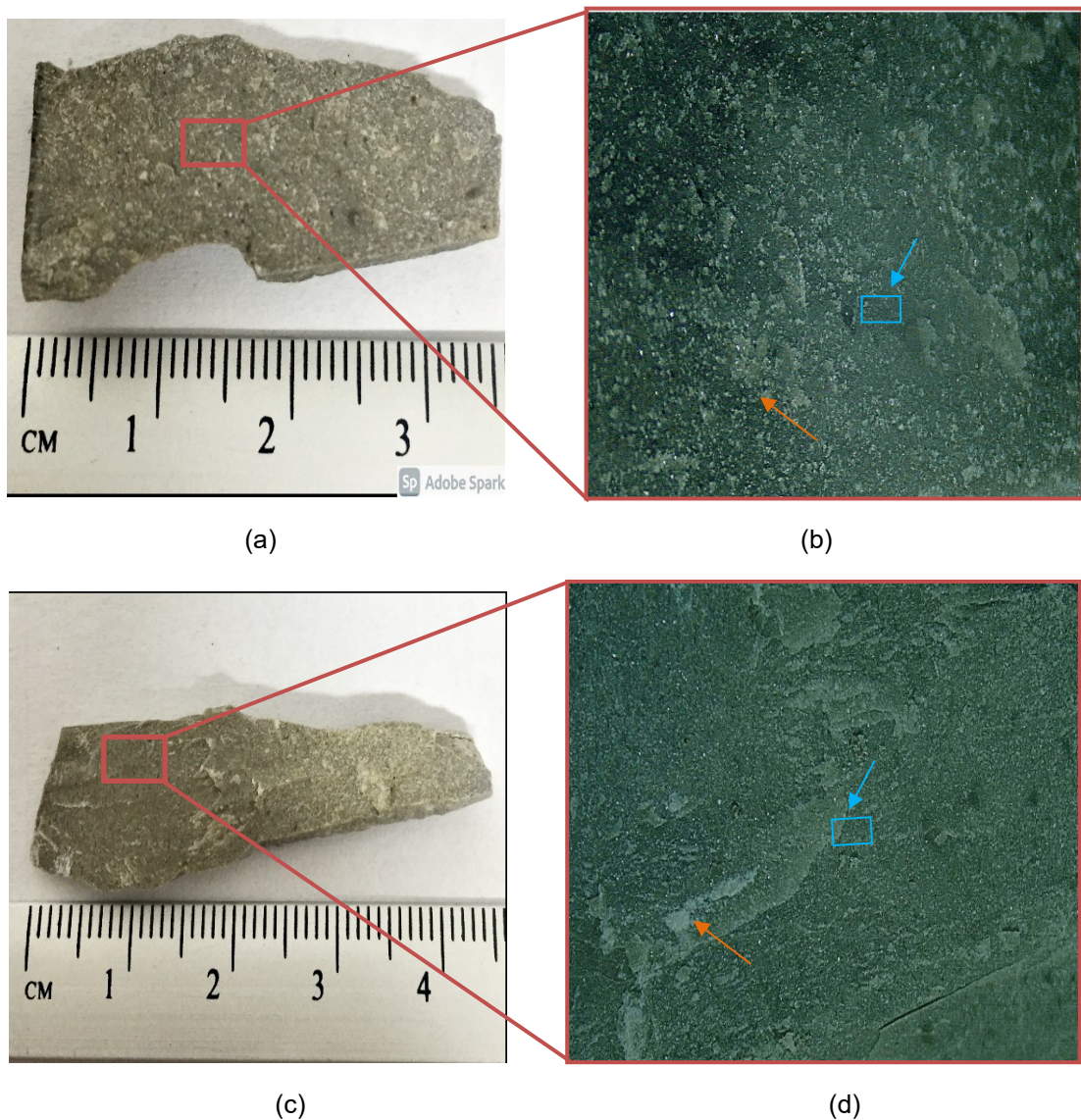
Fonte: Autor, 2021.

A figura 21a mostra o material com folhas de material não reagido, microporos, regiões de densificação e irregularidade na superfície de fratura. Na figura 21b, percebe-se a presença de poros envoltos de material não reagido e a presença de uma micro-trinca em uma região com material não reagido. Para as

figuras 21c e 21d, observa-se a presença de alguns microporos, grande área de material não reagido e irregularidade na superfície de fratura. A coloração branca do material não reagido pode ser a concentração do ativador alcalino ou metacaulim, e poderá ser descoberta através de um MEV/EDS.

As micrografias da Figura 22 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 55% de EAF. As setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 22 – Macro e microscopia para 55% de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



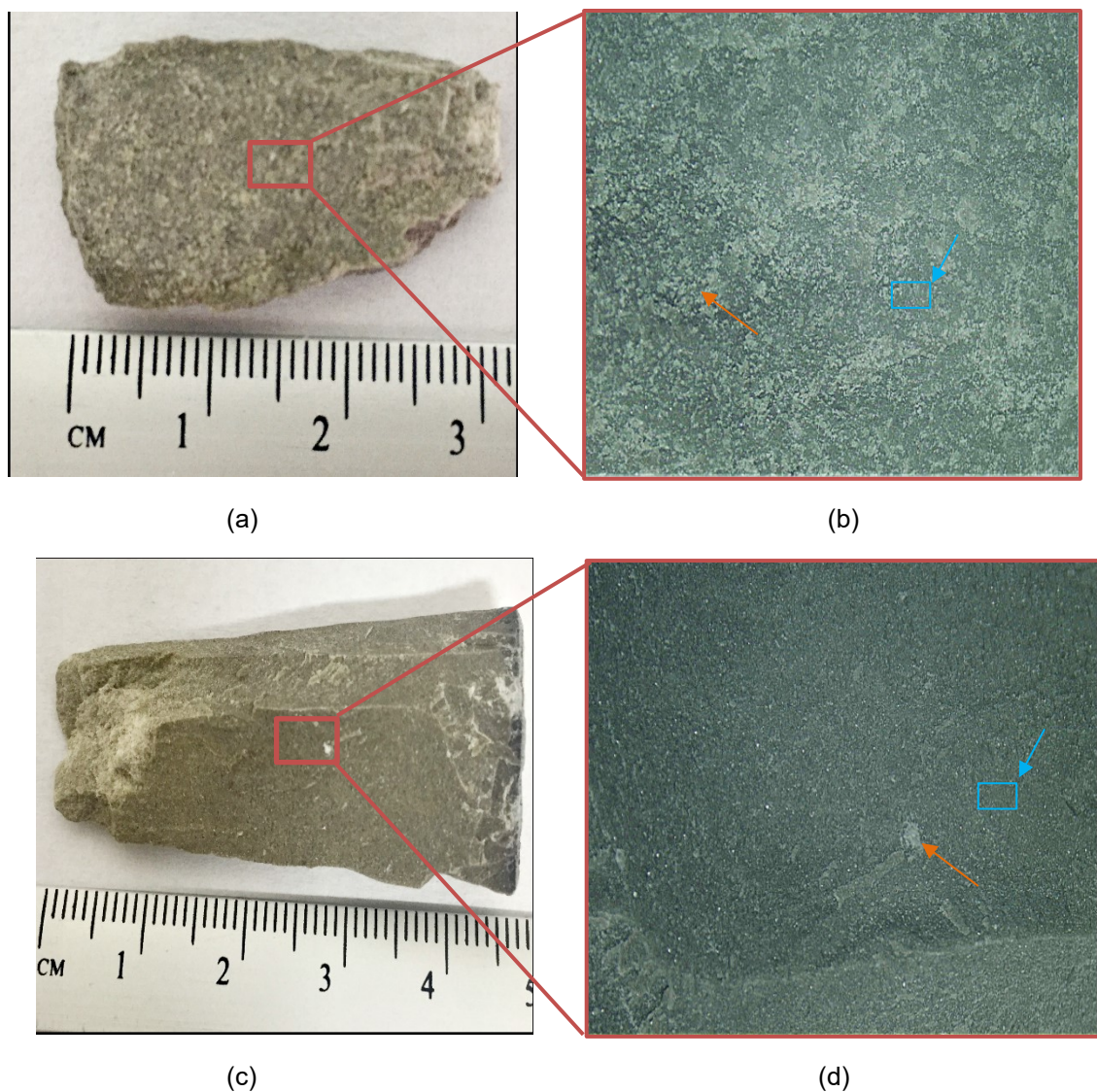
Fonte:Autor, 2021.

A figura 22a mostra grandes áreas de densificação e homogeneidade, material não reagido e irregularidade na superfície de fratura. Na figura 22b, nota-se

boa densificação, mas quantidade significativa de partículas desagregadas e não reagido. Após o tempo de 7 dias, observa-se nas figuras 22c e 22d uma irregularidade na superfície de fratura, grande área de material não reagido e boa densificação do material.

As micrografias da Figura 23 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 60% de EAF. As setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 23 – Macro e microscopia para 60 % de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.

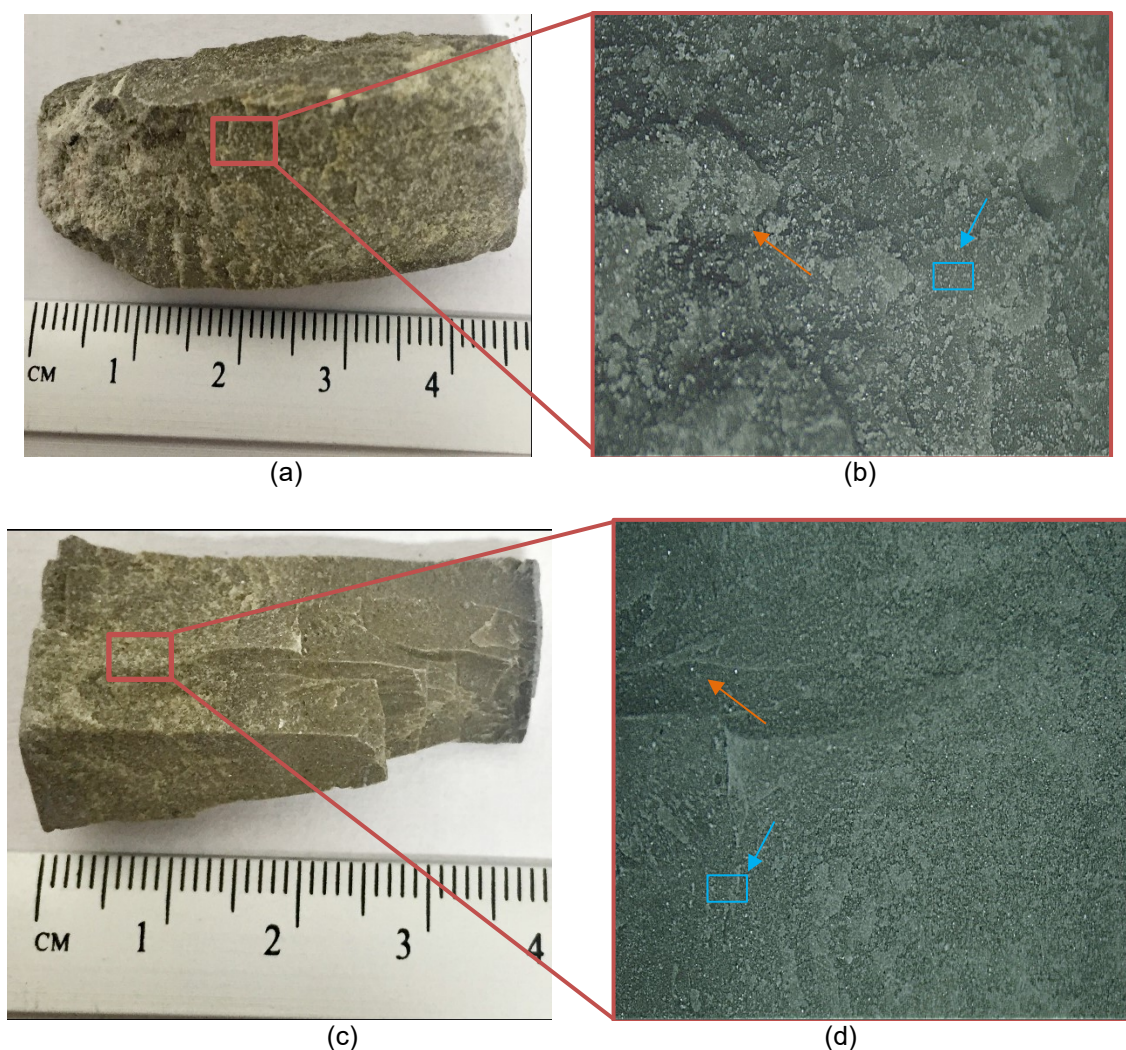


Fonte: Autor, 2021.

A figura 23a mostra quantidade significativa de materiais não reagidos e soltos na superfície. Na figura 23b, percebem-se grandes áreas de material densificado e não reagidos. Não se observa poros ou trincas. Com o passar do tempo de 7 dias, a figura 23c mostra uma melhor densificação e diminuição da quantidade de material não reagido, o que é confirmado com a figura 23d que mostra grande densificação, homogeneidade e áreas mais isoladas de material não reagido.

As micrografias da figura 24 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 65% de EAF. As setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 24 – Macro e microscopia para 65 % de EAF com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



A figura 24a mostra a superfície de fratura irregular, partes densas e com material não reagido. Enquanto que a figura 24b se pode observar o excesso de material desagregado e não reagido cobrindo áreas de densificação. Não se observa porosidade ou trincas. Com o tempo de cura de 7 dias, a figura 24c mostra áreas com menos material não reagido e soltos na superfície, já na figura 24d, é possível ver que ainda se tem grande quantidade de material não reagido, sem porosidade e com boa densificação.

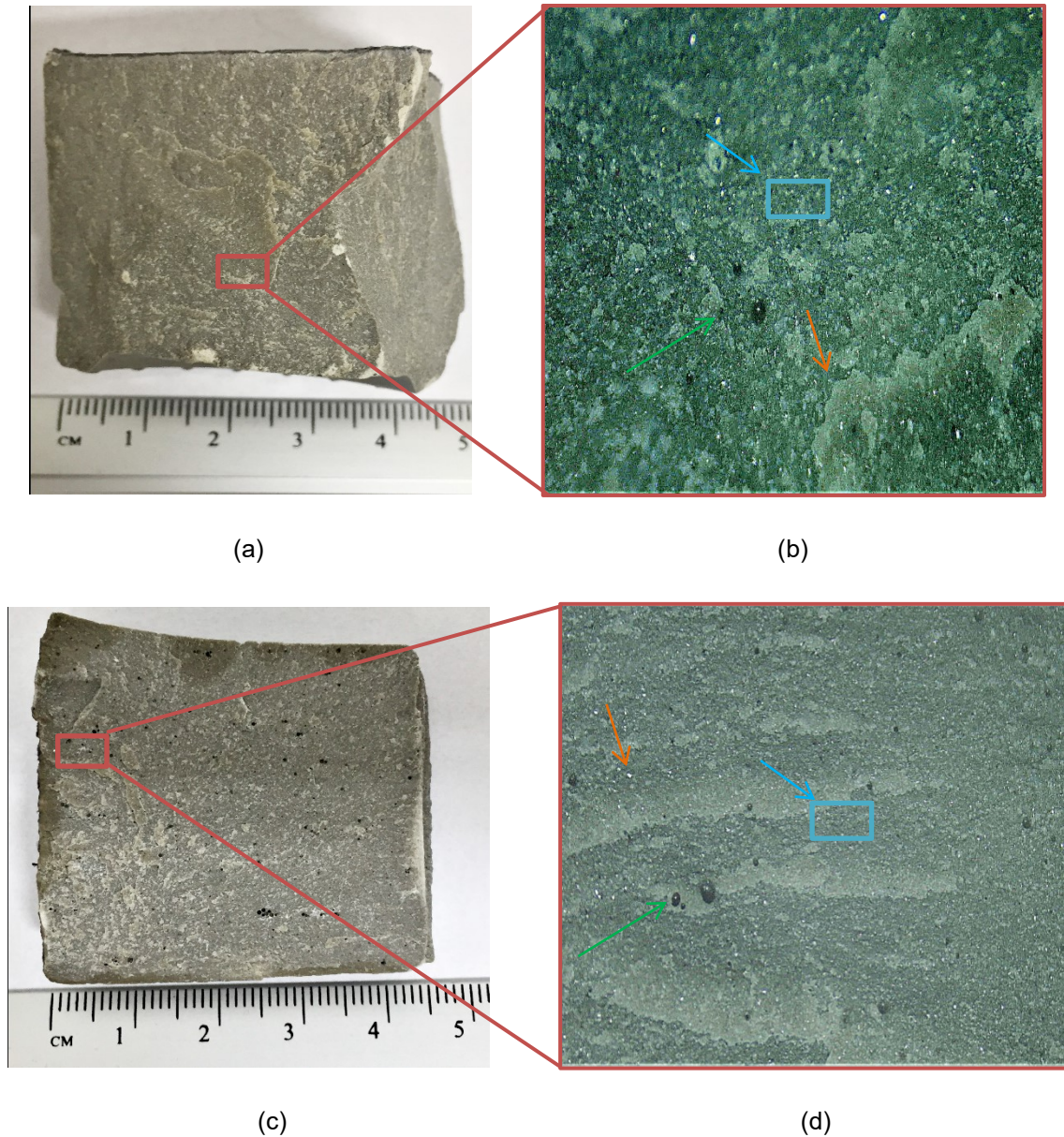
A observação da porosidade pode ser associada a não vibração das pastas e o aprisionamento das bolhas de ar dentro do geopolímero que juntamente com o aumento da quantidade de material não reagido, pode explicar a diminuição na resistência a compressão dos valores a partir de 45% de escória de acordo com os estudos de Porto (2019).

Os estudos de Pereira *et. al.* (2018) mostra que com o aumento da quantidade de EAF, o geopolímero apresenta maiores áreas homogêneas até o limite de saturação do ativador alcalino o que pode justificar a partir de 45% de EAF as figuras apresentam quantidade excessiva de material desagregado e não reagido.

4.3.2 Microscopia óptica da argamassa geopolimérica

As micrografias da figura 25 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 0% de areia. As setas verdes mostram microporos, as setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 25 – Macro e microscopia para 0% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.

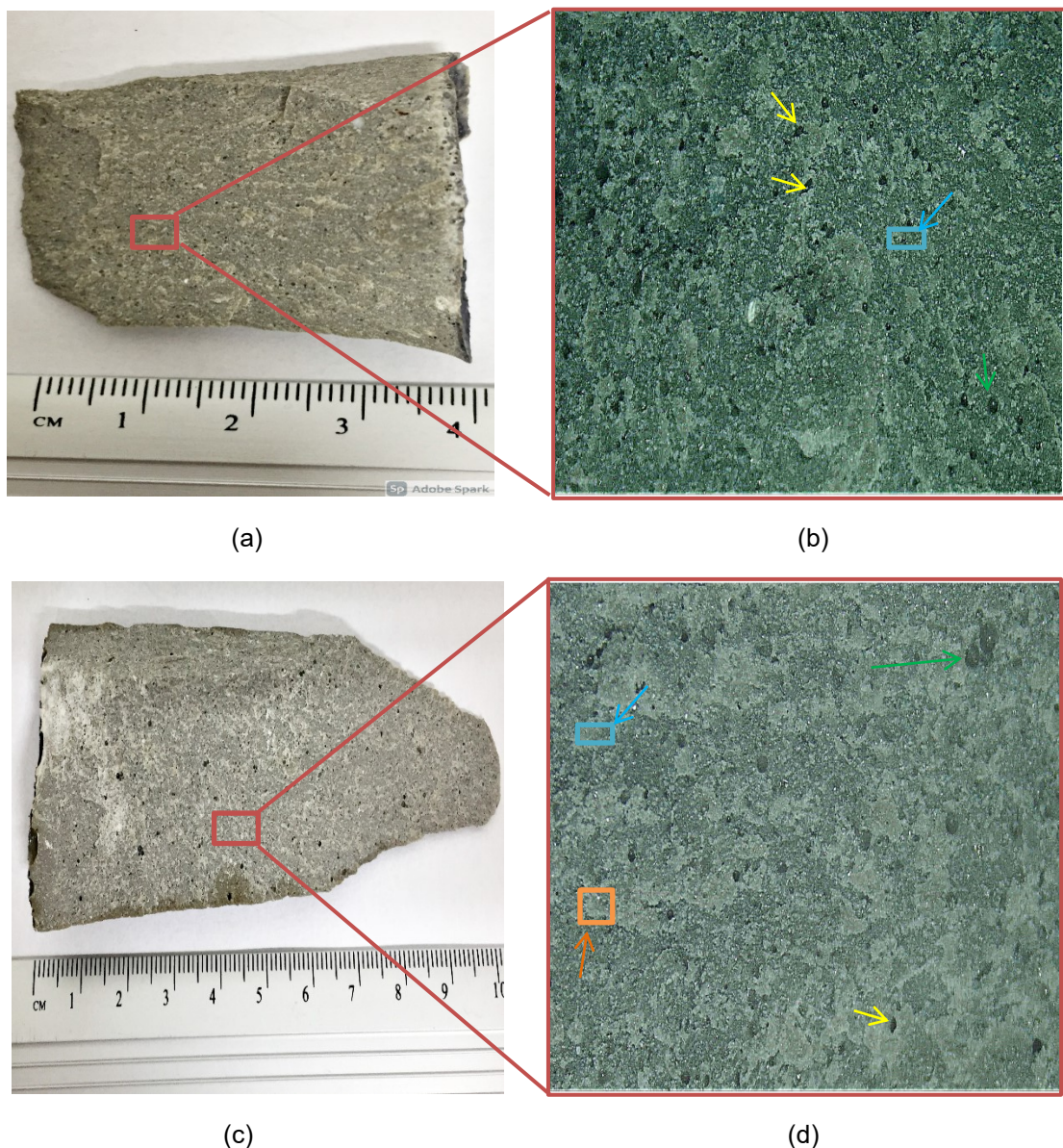


Fonte: Autor, 2021.

A figura 25a mostra grande parte da superfície homogênea, não apresenta porosidade aparente e não se observa a presença de trincas. Com a ampliação, na figura 25b, observa-se a áreas densas, a presença de microporosidade e quantidade de material não reagido. Com o tempo de cura de 7 dias, a figura 25c mostra porosidade aparente, áreas de densas e material não reagido, o que pode ser melhor analisado na figura 25d com a presença de microporos distribuídos não uniformes, material não reagido e áreas homogêneas.

As micrografias da figura 26 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 29% de areia. As setas amarelas mostram grãos de areia, as setas verdes mostram microporos, as setas azuis mostram áreas densas e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 26 – Macro e microscopia para 29% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura..



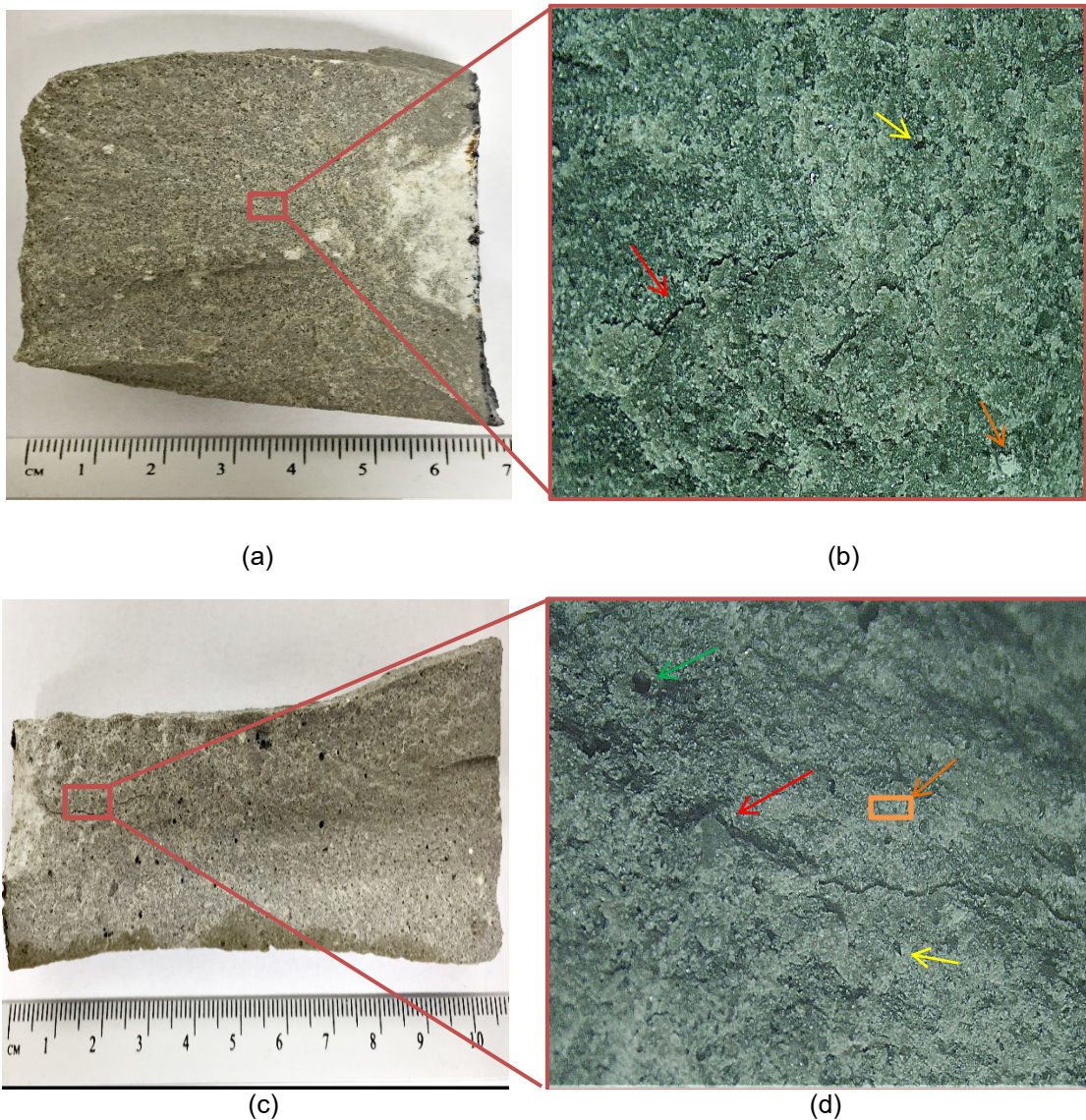
Fonte:Autor, 2021.

A figura 26a mostra uma superfície de fratura irregular, a presença de alguns microporos e a presença de material não reagido. Com o aumento, na figura 26b é possível observar a presença de grãos de areia, áreas de densificação e

microporosidade. A figura 26c mostra que com o passar da idade a quantidade de porosidade aparente aumentou como também, a presença de material não reagido. Esse aumento pode ser devido ao aumento de EAF. Na figura 26d, observa-se a distribuição de areia na amostra, áreas de densificação e microporosidade.

As micrografias da figura 27 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 59% de areia. As setas vermelhas mostram trincas, as setas verdes mostram microporos, as setas amarelas mostram grãos de areia e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

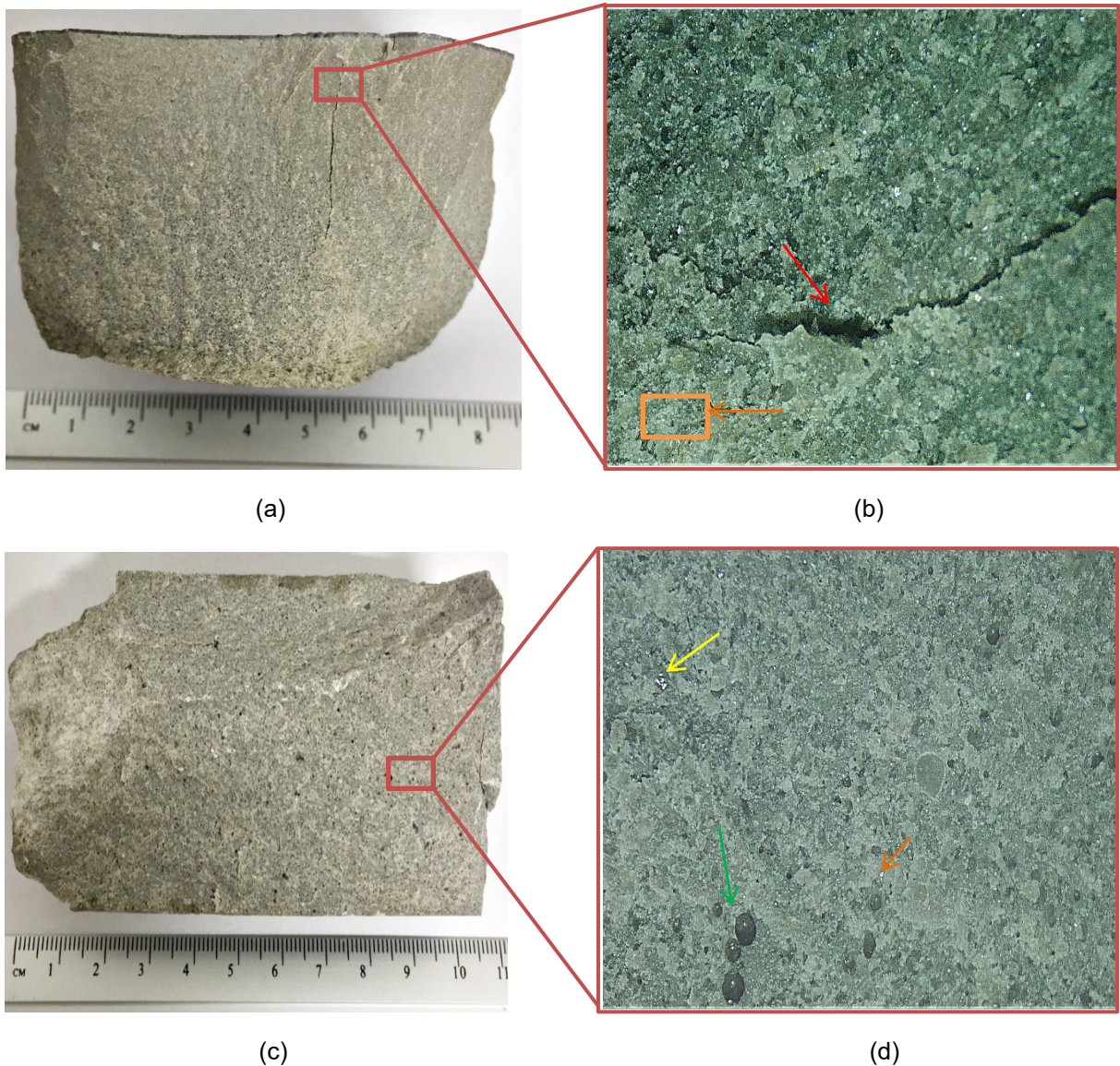
Figura 27 – Macro e microscopia para 59% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



Na figura 27a, observa-se superfície de fratura irregular, áreas de densificação e quantidade de material não reagido. Com a aplicação na figura 27b, nota-se a presença de trincas e grande quantidade de material não reagido assim como a presença de grãos de areias distribuídas não uniformes na amostra. De acordo com a figura 27c, nota-se que com o tempo de cura é possível observar porosidade, áreas densas e materiais não reagidos. Com a aplicação da figura 27d é possível ver a presença de poros, trinca, areia, áreas densas e material não reagido.

As micrografias da figura 28 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 69% de areia. As setas vermelhas mostram trincas, as setas verdes mostram microporos, as setas amarelas mostram grãos de areia e as setas laranjas mostram materiais não reagidos.

Figura 28 – Macro e microscopia para 69% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



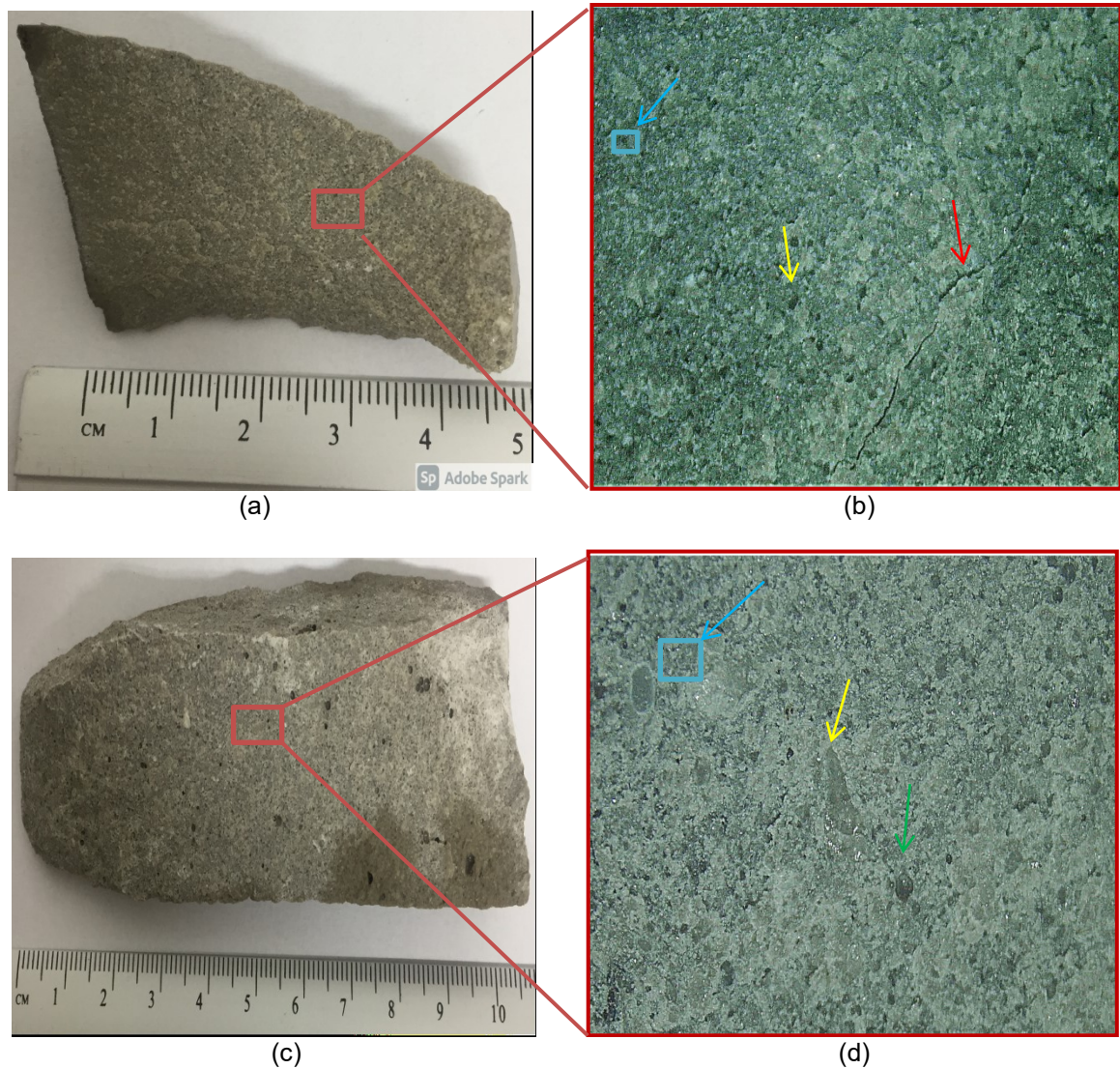
Fonte: Autor, 2021.

Na figura 28a se percebem áreas maiores de densificação, uma provável trinca e quantidade de material não reagido e superfície de fratura irregular. A figura 28b mostra uma trinca e material não reagido ao redor. Com o tempo de cura de 7 dias, a figura 28c mostra que aparentemente a quantidade de material não reagido é alta, além de observar a presença de areia e porosidade. Com a ampliação, na figura 28d é possível ver a presença de poros, areia e áreas mais densas.

As micrografias da Figura 29 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de cura para a proporção de 75% de areia. As setas vermelhas mostram trincas, as

setas verdes mostram microporos, as setas azuis mostram áreas densas e as setas amarelas mostram grãos de areia.

Figura 29 – Macro e microscopia para 75% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



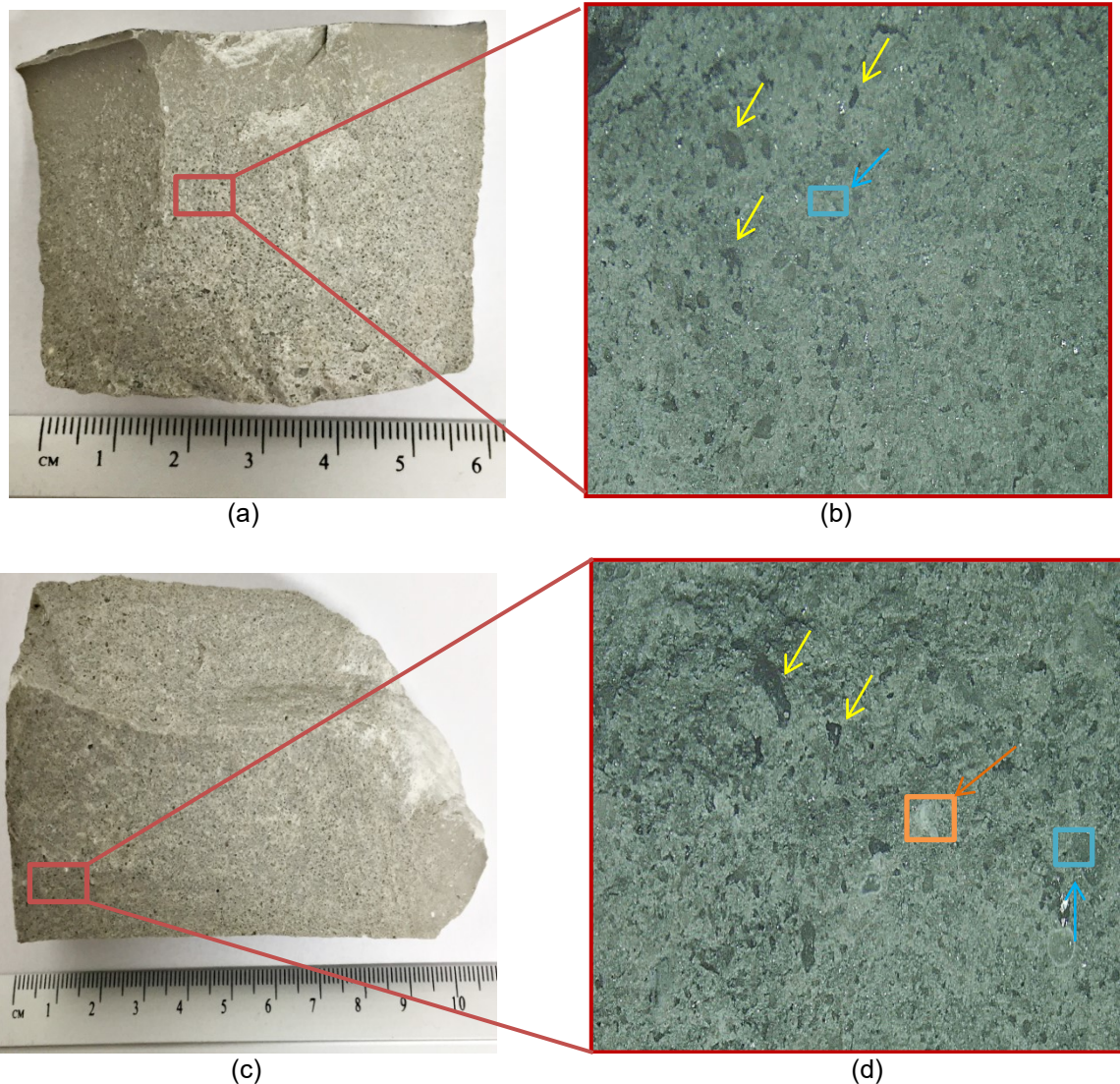
Fonte:Autor, 2021.

É possível observar na figura 29a a quantidade de material não reagido, áreas homogêneas e com o aumento na figura 29b, nota-se a presença da propagação de uma trinca assim como areia e pontos de material não reagido. Na figura 29c, observa-se porosidade, algumas manchas de óleo usadas para desmoldar e pontos de material não reagido. Com a aplicação, a figura 29d mostram agregados miúdos, regiões densas e alguns poros.

As micrografias da Figura 30 mostram a comparação da imagem macroscópica com a imagem microscópica, com o aumento de 10x nos dias 1 e 7 de

cura para a proporção de 81% de areia. As setas azuis mostram áreas densas, as setas laranjas mostram materiais não reagidos e as setas amarelas mostram grãos de areia.

Figura 30 – Macro e microscopia para 81% de areia com aumento de 10X: a) Macro com 1 dia de cura, b) Micro com 1 dia de cura, c) Macro com 7 dias de cura, d) Micro com 7 dias de cura.



Fonte:Autor, 2021.

A figura 30a mostra grande área de aglomeração de agregado miúdo, observa-sea presença de poros e áreas densificadas. Na figura 30b é possível observar grande quantidade de areia, distribuídas não uniformes e áreas densas. A figura 30c mostra irregularidade na superfície de fratura, porosidade aparente e pontos escuros que se deduz ser areia. Na figura 30d, nota-se a grande quantidade de areia, material não reagido e áreas densas.

De acordo com os estudos de Riahi et al. (2021), em geopolímeros à base de metacaulim, quanto menor for a razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ a estrutura terá menos áreas homogêneas, com partes não reagidas e poros maiores. Enquanto que, quando a razão molar for acima de 3,25, a estrutura será mais densa e homogênea. Entretanto, para valores acima de 3,75, a estrutura pode vir a formar pequenos poros e trincas, devido à retração dos materiais.

Rocha (2017), em seu estudo com argamassas e diferentes tipos de ativadores, observa que quanto maior a quantidade de areia, maior vai ser a aglomeração e certas regiões, isso pode ter ocorrido devido a metodologia utilizada para a fabricação dos CP's, como observado a partir de 69% de areia.

De acordo com o autor Silva (2011) para os estudos de argamassa geopolimérica, o resultado ideal encontrado para porcentagem de areia foi de 60%, enquanto que para Araújo (2017) e Helene & Terzian (1993), os percentuais ideais variam dependendo de sua aplicação, entre 30% a 75%, relacionando com o tempo de pega. Seguindo esses parâmetros, o melhor resultado de compressão para a argamassa de Porto (2019) foi com a adição de 69% de areia.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs fazer um estudo de microestrutura para pastas e argamassas geopoliméricas usando resíduo industrial como forma de uma possível solução para um material que é prejudicial para o meio ambiente, contribuindo para a redução de matérias-primas não renováveis. A partir dos resultados, pode-se concluir:

- As análises por DRX demonstram que houve a transformação de caulim para metacaulim, devido as regiões amorfas apresentadas e a Escória de alto forno apresentou o comportamento de acordo com a literatura para a aplicação em geopolímeros;
- Pode-se observar que as pastas geopoliméricas a partir de 45% de EAF apresentaram uma quantidade excessiva de partículas despregada na superfície de fratura e muito material não reagido. O que pode estar associado a proporção entre ativador alcalino e pó ou na concentração do ativador alcalino;
- Para a argamassa, pode-se concluir que com a adição de areia foram encontradas maiores quantidades de trincas, a partir de 69% a quantidade de material não reagido e solto na superfície de fratura é maior;
- Com a análise microscópica feita, é possível concluir o potencial do resíduo de escória de alto forno na utilização para geopolímeros de alto desempenho.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Testar formulações com diferentes ativadores alcalinos e concentrações para diminuir a quantidade de material não reagido;
- Fazer o ensaio de compressão axial e flexão;
- Analisar, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV, poros, trincas e regiões de material não reagido e utilizar a Espectroscopia de Raios X – EDS por energia dispersiva para avaliar quais materiais não estão reagindo;
- Produção de concreto de cimento geopolimérico a partir dos melhores resultados de pasta e argamassa fazendo análises de compressão axial e flexão além de MEV/EDS.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro. Abril. 2009.
- ABNT- Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Brasília, 2008.
- ADESANYA, D.A.; RAHEEM, A.A. **Development of corn cob ash blended cement**. Constr. Build. Mater. 2009, 23, 347–352.
- ALEEM, A. M. I; ARUMAIRAJ, P.D. **Geopolymer concrete- a review**. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, Feb 2012. Volume 1, Issue 2, pp: 118-122.
- ARAÚJO, L. E. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso de resíduo de construção e demolição**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. 2017.
- ARCELLORMITTAL. **Escória de alto-forno**. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>. Acessado em: 17/12/2020.
- AZEVEDO, A. G. S; STRECKER, K. ARAUJO, A. G; SILVA, C. A. **Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂ O e Na₂ SiO₃**. Cerâmica 63 (2017) 143-151.
- AZIMI, E. A., ABDULLAH, M. M., MING, L. Y., YONG, H. C., HUSSIN, K., & AZIZ, I.H. **Processing and Properties of Geopolymers of Geopolymers as Thermal Insulating Materials: A Review**. Reviews on Advanced Materials Science, Vol. 44 - Nº 3, 273-285, 2016.
- BAN, C.C.; RAMLI, M. **The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview**. Resour. Conserv. Recycl. 2011, 55, 669–685.
- BELL, JL, & Kriven, WM (2004). **Nanoporosidade em aluminossilicato, cimentos geopoliméricos**. *Microscopy and Microanalysis*, 10 (SUPPL. 2), 590-591. <https://doi.org/10.1017/S1431927604884496>
- BERNARDO, L; DANTAS, A.B; VOLTAN, P. E. N. **Trabalhabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Ldibe Editora, 2011. 453 p
- BHARATH, R. R. **Rheology of geopolymer concrete**. Ano 2017. Disponível em: <http://www.kscst.iisc.ernet.in/spp/37_series/spp37s/synopsis_seminar/025_37S1026.pdf>. Acesso em: 20/01/2021.

BITENCOURT, C. S. **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita.** São Paulo, v. 58, n. 345, Mar. 2012.

BORGES, P. H. R; LOURENÇO, T. M. F; FOUREAUX, A. F. S; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II).** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

BRITO, W. S. **ATIVAÇÃO ALCALINA PARA A PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE RESÍDUO INDUSTRIAL.** Dissertação de mestrado da Universidade Federal Do Pará – PA. 2018.

BRITO, W; SILVA, R. F; SILVA, A. L. M; SOUSA, J. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir da ativação alcalina de cinza volante.** XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 23 A 26 DE SETEMBRO DE 2018.

BRITO, W. S. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Belém, 2018.

CABALLERO, L.R. **Comportamento físico-mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim reforçadas com fibras de aço.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ano 2017.

CÂNDIDO, V. S., SILVA, R. A., SIMANASSIB, T. N. **Mechanical and microstructural characterization of Geopolymeric concrete subjected to fatigue.** 566-570p. Revista JournalofMaterialsResearchand Technology. 2018.

CASCAES, M.E.L. **Desenvolvimento de geopolimeros a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz.** Trabalho de conclusão de curso em curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Joinville, 2016.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de açúcar.** 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Estruturas. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

CEMENT TECHNOLOGY ROADMAP 2019: **Carbonemissionsreductionsupto 2050.** Paris (França) e Genebra (Suíça): International Energy Agency (IEA): Conches-Geneva; Suíça: World Business Council for SustainableDevelopment (WBCSD). 2019. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050> . Acessado em: 04/05/2021.

CORDEIRO, G.C.; KURTIS, K.E. **Effectofmechanicalprocessingon sugar cane bagasse ashpozzolanicity.** Cem. Concr. Res. 2017, 97, 41–49.

COSTA, M.J. **Avaliação do uso da areia artificial em concreto de cimento portland: aplicabilidade de um método de dosagem.** Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Tecnologia da UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2005.

CUNHA, M. F.; FORTI, B. A.; SILVA B. I. **Tendências da normalização de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho.** Reunião Anual do Ibracon 52 - Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável, 2010; Anais IBRACON. 2010: 46-53.

DAVIDOVITS, J. **Properties of Geopolymeric Cements.** Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, pp. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of successes and failures in geopolymer applications. market trends and potential breakthroughs.** Geopolymer institute. Geopolymer. Melbourne, Australia: Conference, oct. 28-29. 2002.

DENG, M.; ZHANG, G.; ZENG, Y.; PEI, X.; HUANG, R.; LIN, J. **Simple process for synthesis of layered sodium silicates using rice husk ash as silica source.** Journal of Alloys and Compounds, v. 683, p. 412– 417, 2016.

DUXSON, P. G.C.; LUKEY, J.S.J.; VAN DEVENTER, **thermal conductivity of metakaolingeopolymers used as a first approximation for determining gel interconnectivity** . Ind. Eng.Chem. Res, v. 45 p. 7781–7788. 2006.

FAZZAN, J. V.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. **Estudo da viabilidade de utilização do resíduo de borracha de pneu em concretos estruturais.** Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista. Brasil, v.12, n. 6, p. 118 – 132, 2016.

FENG, D., TAN, H. & VAN DEVENTER, JSJ. **UltrasoundEnhancedgeopolymerisation.** *JournalofMaterials Science* 39, 571–580 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000011513.87316.5c>

FREITAS, S. M. A. **Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável.** Tese de Doutoradoapresentado a UFOP-UEMG, ano 2018.

FREITAS, S.M.B.A.**Adição de geomanta e tecido não tecido de polipropileno em cimentos geopoliméricos de pega rápida.** 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

FRÍAS, M. **Evolution of mineralogical phases produced during the pozzolanic reaction of different metakaolinite by-products: influence of the activation process, Appl.** Clay Sci, v. 56 p. 48-52. 2012.

GERALDO, R. H; FERNANDES, L. F. R; CAMARINI, G. **Water treatment sludge and Rice husk ash to sustainable geopolymer production.**Journal of cleaner production.v.149, p. 146-155, abr. 2017.

GESTÃO DE COPRODUTOS. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. (Nota Técnica). 28 p: il.

HAGEMANN, S. E. **Materiais de construção básicos**. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense; Universidade Aberta do Brasil, 2011. Disponível em: <http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/_pdf/apostila_mcb.pdf>. Acesso em: 22/01/2021.

HAMED I. RIYAP, CHRISTELLE N. BEWA, CHARLES BANENZOUÉ, HERVÉ K. TCHAKOUTÉ, CLAUS H. RÜSCHER, ELIE KAMSEU, MARIA C. BIGNOZZI & CRISTINA LEONELLI (2019) **Microestrutura e propriedades mecânicas, físicas e estruturais de base de metacaulim leve sustentável cimentos e argamassas de geopolímero empregando casca de arroz**, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 7: 2, 199-212, DOI: [10.1080 / 21870764.2019.1606140](https://doi.org/10.1080/21870764.2019.1606140)

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. **Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC1**. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, 2005.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1993. 349p. 1 ed. São Paulo: Pini, 1993.

HOS, JP, MCCORMICK, PG & Byrne, LT. **Investigação de um polímero inorgânico de aluminossilicato sintético**. *Journal of Materials Science* **37**, 2311–2316 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1015329619089>

INSTITUTE, Geopolymer. **Visit to Geopolymer Concrete Airport and Eco-Building**. 2020. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/news/visit-airport-eco-building/>>. Acesso em: 10/12/2020.

JAQUES, J.V. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de concreto reciclado como agregado graúdo em concreto de cimento portland**. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado a Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2013.

JULIO, A. L., GRUB, J., BAGNARA, D., DIPP, G.H., ABREU, A. G. **Utilização de cinzas provenientes da queima de madeira em caldeira de agroindústria**. In: VI SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DO ESPÍRITO SANTO, 9., 2011, Vitória. Anais... FAESA, 2011.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. **Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry**. *Minerals Engineering*, p.1261–1277, 2007.

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, 2010.

KRETZER, B. A. **Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por**

solução alcalina de silicato. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina. Ano 2020.

KRIVENKO, P. **Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability.** in: H. Justnes (Ed.), Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, Amarkai and CongrexGöteborg, Gothenburg, Sweden, 1997.

LANGARO, E.A. **Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal.** Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de PósGraduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ano 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1891/1/CT_PPGECC_M_Langaro%2C%20Eloise%20Aparecida_2016.pdf . Acessado em: 20/05/2021.

LEA, F. M. (1971). **The Chemistry of Cement and Concrete.**(N.Y. USA): p 414.

LIMA, J.S.T.; FIGUEREDO, M.H.; SILVA, D.C.; BORJA, E.V.; GOMES, V.L.; VARELA, M.L. **Estudo da potencialidade do resíduo de exploração e beneficiamento do caulim na produção de metacaulim para uso em concreto substituindo parcialmente o cimento.** 60o Congresso Brasileiro de Cerâmica 15 a 18 de maio de 2016, Águas de Lindóia.

MADRID, J. A.C; GARCÍA, J.I. E; BORGES, P. C. **Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno.** Revisão do estado da arte. Revista ALCONPAT, Volumen6, Número 1, Enero - Abril 2016, Páginas 64 – 83.

MALHOTRA, V. M. AND MEHTA, P. K. (1996). **Pozzolanic and cementitious materials.** Advances in Concrete Technology.(UK): p. 102.

MEHTA, P. K ; PAULO, J. M. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibra de celulose e pva.** Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica de São Paulo – SP, 128p., 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, L. N. **Avaliação do lodo de ETA como material precursor em geopolímeros.** Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade IMED-RS. Ano 2019.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete.** Conference on Constitution and Building Technol International.p.15. 2014.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M.W.; BLANCO, M.T. **Alkali-Activated Fly Ashes a Cement for the Future**. Cement and Concrete, Elsevier A cienciaLtda, p. 1323-1329. 1999.

PEREIRA, D. S. T., SILVA, F. J., PORTO, A.B., MONTEIRO, S. N., CANDIDO, V. S., SILVA, A. C. R. , FILHO, F. C. G. **Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymetric concrete and portland concrete**. Revista JournalofMaterialsResearchand Technology.v. 7, p. 606-611. 2018.

PEREIRA, A. P. S; RAMOS, F. J. H. T. V; SILVA, M. H. P. **Processo de geopolimerização de escória de alto forno e de aciaria**. Contribuição técnica ao 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland** / Eladio G. R. Petrucci. – 13. ed. rev. por Vladimir AntonioPaulon – São Paulo: Globo, 1998.

PIMENTEL, M. G; VASCONCELOS, A. L. R; PICANÇO, M. S; SOUZA, J. V. B; MACÊDO, A. N.**Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC'2017 Hangar Convenções e Feiras da Amazônia - Belém - PA 8 a 11 de agosto de 2017.

PINTO, E. N. M. G.**Aditivção de pastas geopoliméricas com tetraborato de sódio e látex não iônico para cimentação de poços de petróleo**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 96p, 2007.

PIRES, E. F. C. **Propriedades de fratura e análise não-linear de vigas pré-moldadas de concreto geopolimérico: estudo comparativo**. 2015. 301f. Tese de doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

PODE, R. **Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass powerplant**. RenewableandSustainable Energy Reviews, v. 53, p. 1468-1485, 2016.

PORTO, A. B. R., Candido, V. S., Monteiro, S. N., Silva, A. C. R. **Estudo das propriedades termomecânicas de geopolimeros produzidos a partir de metacaulim**. p. 864-872. In: 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-31513.

PORTO, A. B. R. **Estudo do concreto geopolimérico a partir de metacaulim da região norte com adição de escória de alto forno**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará. Ano 2019.

RATTANASAK U.; CHINDAPRASIR, P.T. **Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer**. Minerals Engineering.v .22, n. 12. 2014.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F..**Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. 2013.

ROCHA, T.S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. Dissertação apresentada ao PPGECC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Ano 2017.

RIAAHI, S. & NEMAT, ALI & KHODABANDEH, A.R. & BAGHSHAHI, SAEID. (2021). **Investigation of interfacial and mechanical properties of alumina-coated steel fiber reinforced geopolymer composites. Construction and Building Materials**. 288. 123118. 10.1016/j.conbuildmat.2021.123118.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Catarina, 135p, 2012.

SIDDIQUE, R; BENNACER, R. (2012). **Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar**. Resources, Conservation and Recycling, 69: pp. 29– 34.

SILVA, A. C. R. **Comportamento do Concreto Geopolimérico para Pavimento sob Carregamento Cíclico**. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Brasil, 2006a.

SILVA, A. C. R., “**Concreto geopolimérico para pavimento: uma alternativa ecológica para a indústria do cimento**”, Seminário sobre a indústria e o meio ambiente, Instituto Militar de Engenharia, <http://transportes.ime.eb.br> Rio de Janeiro, 2006b.

SILVA, A. C. R., **Compósitos geopolimérico com fibra de carbono para reforço de estruturas de concreto**. Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, J. V. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio**. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Ano 2019.

SILVA, I. M. C. B. **Hidróxido de sódio**. Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos. Revista Virtual de Química, v. 4, n. 1, p. 73-82, 2012.

SKAF, T. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. 2008. 118 f. Dissertação de mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia.

SONAFRANK, GH COLE, **investigating century cement production .Cold Climate**. Housing Research Center (CCHRC). Alaska, p.114, 2010.

Souza, A.E., Teixeira, S.R., Santos, G.T.A., Costa, F.B., Longo, E., 2011. **Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials**. J. Environ. Manage. 92, 2774–2780.

SOUZA, L. M. S. **Estudode hidratação da nanoidentação de pastas de cinza de casca de arroz e cinza do bagaço de cana de açúcar com hidróxido de cálcio**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.

SOUZA T. C. R. **RefractoryPropertiesofalkali-ActivatedMetakaolin**. In: BRAZILIAN MRS MEETING, 10., Gramado, 2011. Proceedings... Gramado, 2011.

Teixeira, S.R., Magalhães, R.S., Arenales, A., Souza, A.E., Romero, M., Rincón, J.M., 2014. **Valorization of sugarcane bagasse ash: producing glass-ceramic materials**. J. Environ. Manage. 134, 15–19.

THO-IN, TAWATCHAI & SATA, VANCHAI & BOONSERM, KORNKANOK & CHINDAPRASIRT, PRINYA. (2017). **Compressivestrengthandmicrostructureanalysisofgeopolymer paste usingwasteglasspowderandflyash**. JournalofCleanerProduction. 172. 10.1016/j.jclepro.2017.11.125.

RVAN DEVENTER, JSJ & LORENZEN, L. **Fatores que afetam a imobilização de metais em flyashgeopolimerizado**. *MetallMaterTrans B* 29, 283–291 (1998). <https://doi.org/10.1007/s11663-998-0032-z>

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

XIE, Z.; XI, Y. **Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash**.Cement and Concrete Research, v. 31, n. 9, p. 1245-1249, 2001.

Xu, Q.; Ji, T.; Gao, S.-J.; Yang, Z.; Wu, N. **Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials**. *Materials* 2019, 12, 39.

XU, C., NI, W., LI, K., ZHANG, S., LI, Y., XU, D. **Hydrationmechanismandorthogonaloptimisationofmixproportion for steelslag-slag-basedclinker-freeprefabricated concrete**. *ConstructionandBuildingMaterials*, [s.l.], v. 228, p.1-9, dez. 2019. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117036. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181932478X#s0055>. Acessado em: 21/05/2021.

YOUSEFI ODERJI, SAJJAD & CHEN, BING & AHMAD, MUHAMMAD & SHAH, SYED. (2019). **Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators.** Journal of Cleaner Production.225. 10.1016/j.jclepro.2019.03.290.

YIP, CHRISTINA & LUKEY, GRANT & PROVIS, JOHN & VAN DEVENTER, JANNIE.(2008). **Effect of Calcium Silicate Sources on Geopolymerisation.**Cement and Concrete Research. 38. 554-564. 10.1016/j.cemconres.2007.11.001.

YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; AL BAKRI, M. M.; HUSSIN, K. **Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review.** Progress in Materials Science, n. 83, p. 595-629, 2016.

YUNSHENG, Z., WEI, S. & ZONGJIN, L. **Comportamento de impacto e características microestruturais de placas de cinza volante reforçadas com fibra de PVA preparadas por técnica de extrusão.** *J MaterSci* **41**, 2787–2794 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10853-006-6293-5>

ZHANG, F.; ZHANG, L.; LIU, M.; MU, C.; LIANG, Y. N.; HU, X. **Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers.** *CeramicsInternational*, v. 43, p. 3811-3817, 2017.

ZUHUA, Z.; XIAO, Y.; HUAJUN, Z.; YUE, C.**Role of water in the synthesis of calcined kaolin based geopolymer.** *Applied Clay Science*.Vol.43, p. 218-223. 2009.