



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS (PPGCEM-UFPA)



KAMILA SINDY PINHEIRO DA CRUZ

**PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A
PARTIR DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS**

ANANINDEUA – PA

2023

KAMILA SINDY PINHEIRO DA CRUZ

**PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A
PARTIR DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do Campus Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre(a) em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva

Área de Concentração: Caracterização, Desenvolvimento e Aplicação de Materiais.

Linha de Pesquisa: Tecnologia dos Materiais.

ANANINDEUA – PA

2023

**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)

P654p Pinheiro da Cruz, Kamila Sindy.

Produção de Agregados Sintéticos para construção civil a partir de materiais geopoliméricos / Kamila Sindy Pinheiro da Cruz. — 2023.

111 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Campus
Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.

Campus Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.

1. Pasta geopolimérica. 2. Aluminossilicatos. 3.
Agregado sintético. 4. Geopolímero. I. Título.

CDD 620.11

KAMILA SINDY PINHEIRO DA CRUZ

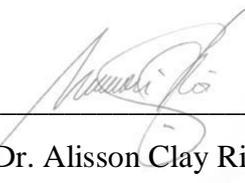
**PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A
PARTIR DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização, Desenvolvimento e Aplicação dos Materiais
Linha de pesquisa: Tecnologia dos Materiais.

Data de aprovação: 20/06/2023

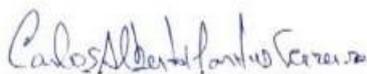
Banca examinadora



Prof.(a) Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Orientador(a) – (PPGCEM/UFPA)



Prof.(a) Dr.(a) Veronica Scarpini Candido
Examinador(a) interno(a) – (PPGCEM/UFPA)



Prof.(a) Dr. Carlos Alberto Martins Ferreira
Examinador(a) externo(a) – (PPGCTM/UERJ)

À Deus.

À nossa senhora de Nazaré.

À minha filha Maria Luiza.

Aos meus pais, Osmar e Graça.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Virgem Maria Santíssima por guiarem meus passos e me permitirem lutar todos os dias não perdendo o foco, sempre em busca dos meus objetivos. À eles, toda honra e toda glória!

À minha filha Maria Luiza que com apenas um sorriso, enche o meu dia de alegria e tranquiliza meu coração. Desde a graça de sua existência, transformou minha vida de muitas formas e me fez descobrir um amor inimaginável, que me fortalece e me mantém de pé todos os dias. Minha melhor amiga e companheira. Amo você minha princesa!

Aos meus pais que são minha fonte de inspiração e me ensinaram a nunca desistir. Essa conquista só existe porque sempre estiveram ao meu lado. Obrigado por não medirem esforços para que eu pudesse obter esse título, sempre me apoiando e cuidando da minha princesa. Amo vocês!

À minhas irmãs pelo apoio e incentivo e aos meus familiares que torceram por mim.

Ao meu orientador, professor Dr. Alisson Clay Rios da Silva por toda a paciência e orientação, ensinando o caminho da pesquisa sempre com dedicação e passando a mim todo o conhecimento necessário para que esta pesquisa fosse realizado com êxito.

À minha grande amiga Bianca Mendes, pela sua amizade e companheirismo durante toda essa jornada que tornaram o percurso mais leve e alegre. Gratidão por todos os momentos compartilhados, foram essenciais para que eu pudesse ter chegado até aqui.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa, Paulo Aranha, Luciano Almeida, Alex Modesto, Mathaus Moraes, Avener Andrade, Geovana Menezes, Damares Barbosa, Miriane Pinheiro e Olivia Leite, por proporcionarem momentos alegres onde a pesquisa se fez mais prazerosa. Obrigada por todo conhecimento compartilhado e pela disposição em ajudar.

À CAPES, pelo suporte financeiro que possibilitou minha dedicação exclusiva ao mestrado, possibilitando ingressar nesta jornada.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais PPGCEM e a professora Dr^a Verônica Scarpini que coordena o programa com excelência e dedicação a pesquisa.

Aos demais colegas que durante o curso contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento dessa dissertação.

.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

RESUMO

A indústria da construção civil é um dos setores da economia que mais consomem recursos naturais, desde a produção dos insumos até a execução da obra, o que pode afetar significativamente o meio ambiente e a qualidade de vida da população. Os geopolímeros são polímeros inorgânicos com grande potencial ecológico, produzidos a partir de aluminossilicatos e sintetizados por soluções alcalinas, proporcionando ao material melhores resistências mecânicas. O cimento geopolimérico é um material de alta tecnologia desenvolvido através de argilominerais, possuindo como características durabilidade, resistência mecânica, forte aderência, resistência ao calor, além de ser facilmente misturado e aplicado. O presente estudo buscou, através de uma correta proporção dos componentes que constituem o geopolímero, a produção de um Agregado Sintético Geopolimérico (ASG), fazendo variações com percentuais de escória de alto forno e variações na concentração alcalina de hidróxido de sódio (NaOH). Logo após, foram realizados testes físicos nos materiais em pós para verificar o índice de finura, perda ao fogo e teor de umidade do caulim, metacaulim e escória de alto forno. As amostras passaram por caracterização e, as principais análises envolvidas no processo, foram: difração de raios-x (DRX), espectroscopia do infravermelho (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS. Também foi realizado ensaio de compressão no corpo de prova do agregado sintético geopolimérico. Os resultados do ensaio de resistência a compressão, indicaram que o corpo de prova com percentual em 35% de escória de alto forno e concentração alcalina de hidróxido de sódio em 10 molar, apresentaram melhores resultados. Na análise da microestrutura da pasta, foi observada uma morfologia densa, o que confere ao material alta resistência a compressão.

Palavras-chave: Pasta geopolimérica. Aluminossilicatos. Agregado sintético. Geopolímero.

ABSTRACT

The civil construction industry is one of the sectors of the economy that consume the most natural resources, from the production of inputs to the execution of the work, which can significantly affect the environment and the quality of life of the population. Geopolymers are inorganic polymers with great ecological potential, produced from aluminosilicates and synthesized by alkaline solutions, providing the material with better mechanical resistance. Geopolymeric cement is a high-tech material developed using clay minerals, with characteristics such as durability, mechanical resistance, strong adhesion, heat resistance, in addition to being easily mixed and applied. The present study sought, through a correct proportion of the components that constitute the geopolymer, the production of a Geopolymeric Synthetic Aggregate (ASG), making variations with percentages of blast furnace slag and variations in the alkaline concentration of sodium hydroxide (NaOH). Soon after, physical tests were carried out on the powdered materials to verify the fineness index, loss on fire and moisture content of kaolin, metakaolin and blast furnace slag. The samples underwent characterization and the main analyzes involved in the process were: X-ray diffraction (DRX), infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM) and EDS. A compression test was also carried out on the geopolymer synthetic aggregate specimen. The results of the compressive strength test indicated that the specimen with a percentage of 35% blast furnace slag and an alkaline concentration of sodium hydroxide at 10 molar presented better results. In the analysis of the microstructure of the paste, a dense morphology was observed, which gives the material high resistance to compression.

Keywords: Geopolymeric Paste. Aluminosilicates. Synthetic aggregate. Geopolymer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação esquemática da estrutura dos geopolímeros.....	24
Figura 2 - Ilustrativo de utilização de geopolímeros.	34
Figura 3 - Exemplo de rochas ígneas: a) Basalto; b) Granito; c) Diabásio:	40
Figura 4 - Exemplo de rochas sedimentares: arenito e carvão.	41
Figura 5 - Exemplos de rochas metamórficas: (a) mármore; (a) quartzito.	41
Figura 6 - Valor de resistência a compressão uniaxial da amostra e os valores limites de acordo com as normas.	44
Figura 7 - Metacaulim, fonte de silício e alumínio.	46
Figura 8 - Escória de Alto Forno.	47
Figura 9 - Hidróxido de Sódio.	47
Figura 10: Silicato de Sódio.	48
Figura 11 – Obtenção do metacaulim. (a) em forno mufla; (b) cadinho incandescente.	49
Figura 12 - (a) EAF; (b) Estufa; (c) Moinho de jarro	50
Figura 13 - (a) Balança analítica; (b) peneira com fundo e tampa, vidro de relógio e pincel. .	50
Figura 14 - (a) Cadinho no forno mufla; (b) Dessecador; (c) Cadinho com caulim, metacaulim e escória granulada de alto forno.	51
Figura 15 - Teor de Umidade (a) Estufa com as cápsulas metálicas; (b) Dessecador.	53
Figura 16 - Agitador Mecânico e Série de Peneiras	53
Figura 17 - Difratorômetro de Raios-X.	55
Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura.	56
Figura 19 - (a) Molde metálico; (b) Base de apoio para os moldes; (c,d) Corpos de prova após 7 dias de cura;	57
Figura 20 - Molde cúbico preenchido com pasta geopolimérica.	58
Figura 21 - Corpo de prova cúbico pronto para ser ensaiado.	58
Figura 22 - (a) Máquina de Ensaio Universal; (b) CP (Ø2,5x5) após rompimento	59
Figura 23 - (a) Britador para ruptura dos agregados geopoliméricos; (b) Agregados após	

processo de britagem; (c) agregado pronto para uso, na graduação zero.....	60
Figura 24 - Curva granulométrica do Caulim.....	63
Figura 25 - Difração de Raios-X do Caulim.	64
Figura 26 - Espectroscopia do Infravermelho do Caulim (K2) e Metacaulim (MK2).	65
Figura 27 - MEV do Caulim a 25°C.	66
Figura 28 - Curva granulométrica do Metacaulim	69
Figura 29 - Difractometria do Metacaulim.	69
Figura 30 - MEV do Metacaulim.....	71
Figura 31 - Curva Granulométrica da Escória de Alto Forno.	73
Figura 32 - Difração de Raios-X da Escória de Alto Forno.....	74
Figura 33 - Espectroscopia do Infravermelho da EAF.	75
Figura 34 - MEV Escória de Alto Forno.....	76
Figura 35: Estudo de resistência a compressão das pastas geopoliméricas com as variações em percentuais de EAF.	77
Figura 36 - Corpo de prova com 35% EAF de (Ø2,5x5) cm. (a),(b),(c) e (d) rompimento com ruptura cisalhada lateral; (e) rompimento com ruptura colunar.	78
Figura 37 - Pasta Geopolimérica com 35% de EAF. (a) Aumento de 69X; (b) Aumento de 277X; (c)Aumento de 2700kx (d) Análise de EDS.....	79
Figura 38 - Pasta Geopolimérica com 60% de EAF. (a) Aumento de 69X; (b) Aumento de 277X; (c)Aumento de 3000kx (d) Análise de EDS.....	80
Figura 39 - Estudo de resistência a compressão com variação de molaridade.....	82
Figura 40 - Ensaio de compressão em corpos de prova cúbicos	83
Figura 41 - Ensaio de compressão dos CP's cúbicos com 7 dias de cura. (a) CP preste a ser ensaiado; (b) CP após rompimento.....	84
Figura 42 - Pasta Geopolimérica com concentração de NaOH de 10 molar. (a) Aumento de 92X; (b) Aumento de 138X; (c)Aumento de 1.11kx (d) Análise de EDS.	86
Figura 43 - Pasta Geopolimérica com concentração de NaOH de 18 molar. (a) Aumento de 69X; (b) Aumento de 277X; (c)Aumento de 1.11kx (d) Análise de EDS.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do Agregado Graúdo quanto à dimensão.	38
Tabela 2 - Rochas ornamentais – Classificação por origem	39
Tabela 3 - Ensaios e análises para caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento.	42
Tabela 4 - Especificações para granito ABNT e ASTM.....	43
Tabela 5 - Valores médios obtidos por ensaios tecnológicos de alguns tipos de rochas.	43
Tabela 6 - Especificações do Hidróxido de Sódio.....	48
Tabela 7- Especificações do Silicato de Sódio.....	48
Tabela 8 - Perda ao Fogo do Caulim.....	61
Tabela 9 - Teor de Umidade do Caulim.....	62
Tabela 10- Análise Granulométrica do Caulim.....	62
Tabela 11 - Resultados de finura do metacaulim	66
Tabela 12 - Perda ao Fogo do Metacaulim.....	67
Tabela 13 - Teor de Umidade do Metacaulim.....	68
Tabela 14 - Análise Granulométrica do Metacaulim.....	68
Tabela 15 - Resultados de finura da escória de alto forno	71
Tabela 16 - Perda ao Fogo da EAF.....	72
Tabela 17 - Teor de Umidade da EAF.....	72
Tabela 18 - Análise Granulométrica da Escória de Alto Forno.	73
Tabela 19 - Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão uniaxial.	85

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

Al	Alumínio
CaCO ₃	Calcita
CaO	Óxido de Cálcio
Fe ₂ O ₃	Magnetita
H ₂ O	Água
K ⁺	Ion de Potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
M	Metal alcalino ou alcalino-terroso;
MgO	Óxido de Magnésio
N	Grau de policondensação
Na ⁺	Ion de Sódio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
OH	Hidroxila
Si	Silício
SiO ₂	Oxido de Silício
SiO ₄	Silicato
Si/AL	Razão Silício e Alumínio
w	Número de moléculas de água

ABREVIATURAS

ASG	Agregado Sintético Geopolimérico
CP	Cimento Portland
CP's	Corpos de Prova
CCP	Concreto de Cimento Portland
DRX	Difração de Raios-X
EAF	Escória de Alto Forno
FTIR	Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier
K2	Caulim
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MK	Metacaulim
PG	Pasta Geopolimérica
RCD's	Resíduos de Construção e Demolição

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSI	British Standard Institution
CEN	Comissão Europeia de Normalização
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NM	
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Justificativa.....	21
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	GEOPOLÍMERO.....	23
2.1.1	Aspectos Históricos	23
2.1.2	Obtenção do Geopolímero	24
2.2	MATÉRIAS-PRIMAS	25
2.2.1	Metacaulim	25
2.2.2	Cinza Volante.....	26
2.2.3	Escória de alto forno.....	27
2.2.4	Ativadores Alcalinos	28
2.2.4.1	Hidróxido de Sódio	28
2.2.4.2	Silicato de Sódio	29
2.3	PRODUTOS GEOPOLIMÉRICOS	30
2.3.1	Pasta Geopolimérica.....	30
2.3.2	Argamassa.....	31
2.3.3	Concreto.....	32
2.4	APLICAÇÕES DO GEOPOLÍMERO	33
2.5	AGREGADOS.....	35
2.5.1	Agregados naturais	36
2.5.2	Agregados reciclados	36
2.5.3	Agregados Britados	37

2.6	TIPOS DE ROCHAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS.....	38
2.6.1	Rochas Ígneas ou Magmáticas.....	39
2.6.2	Rochas Sedimentares.....	40
2.6.3	Rochas Metamórficas.....	41
2.6.4	Especificações das rochas.....	41
2.7	USO DE AGREGADOS SINTÉTICOS.....	44
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	MATERIAIS.....	46
3.1.1	Metacaulim (MK).....	46
3.1.2	Escória de Alto Forno (EAF).....	46
3.1.3	Hidróxido de Sódio.....	47
3.1.4	Silicato de Sódio.....	48
3.2	MÉTODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	49
3.2.1	Calcinação do Caulim.....	49
3.2.2	Beneficiamento da Escória de Alto Forno (EAF).....	49
3.2.3	Testes Físicos.....	50
3.2.3.1	Índice de Finura.....	50
3.2.3.2	Perda ao Fogo.....	51
3.2.3.3	Teor de Umidade.....	52
3.2.3.4	Análise Granulométrica dos Pós.....	53
3.1.1	Análises.....	54
3.1.2	Difratometria de Raios-X (DRX).....	54
3.1.3	Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	55
3.1.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	55
3.1.5	Dosagem das Pastas Geopoliméricas (PG).....	56
3.1.6	Moldagem dos Corpos de Prova (CP's).....	57

3.1.6.1	Molde cilíndrico para Pasta Geopolimérica	57
3.1.6.2	Molde cúbico para Pasta Geopolimérica	57
3.1.7	Ensaio de Compressão Uniaxial	58
3.1.8	Produção do Agregado Sintético Geopolimérico (ASG)	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1	TESTES FÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	61
4.1.1	Caulim	61
4.1.1.1	Perda ao Fogo	61
4.1.1.2	Teor de Umidade.....	61
4.1.1.3	Granulometria	62
4.1.1.4	Difratometria de Raios-X (DRX).....	63
4.1.1.5	Espectroscopia do Infravermelho (FTIR) do Caulim e Metacaulim.....	64
4.1.1.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	65
4.1.2	Metacaulim	66
4.1.2.1	Índice de Finura	66
4.1.2.2	Perda ao Fogo	67
4.1.2.3	Teor de Umidade.....	68
4.1.2.4	Granulometria	68
4.1.2.5	Difratometria de Raios-X (DRX).....	69
4.1.2.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	70
4.1.3	Escória de Alto Forno.....	71
4.1.3.1	Índice de Finura	71
4.1.3.2	Perda ao fogo	72
4.1.3.3	Teor de Umidade.....	72
4.1.3.4	Granulometria	73
4.1.3.5	Difratometria de Raios-X (DRX).....	74

4.1.3.6	Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	75
4.1.3.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	75
4.2	ESTUDOS PRELIMINARES DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS.....	76
4.2.1	Influência do Percentual de EAF na resistência a compressão.....	76
4.2.2	Influência da variação da molaridade na resistência a compressão	82
4.2.3	Corpos de Prova Cúbicos	83
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1. INTRODUÇÃO

O geopolímero surgiu na década de 1970, através do cientista Joseph Davidovits e foi classificado como um material cimentar, possuindo uma gama de aplicações na área da construção civil (AMRAN *et al*, 2020; HAGER, SITARZ e MRÓZ, 2021). Por ser um material de alta tecnologia, possui alta resistência térmica e mecânica, podendo ser aplicado em interior de automóveis e aeronaves, como isolantes térmicos, concretos, pastas e argamassas (DAVIDOVITS, 2015 ; REN *et al*, 2021; THAKUR, 2019; COLANGELO *et al*, 2018; SILVA *et al*, 2022). Em 1978, Davidovits chamou de concreto geopolimérico sua linha de pesquisa do “concreto verde”, como um dos materiais mais oportunos para a construção civil, com propriedades semelhantes ao cimento Portland (FAN *et al.*, 2018; HASSAN *et al*, 2019; MOHAMMED *et al*, 2019; LI *et al*, 2019).

O geopolímero pode ser obtido através de subprodutos ou resíduos industriais a partir da polimerização de matérias-primas aluminossilicasas, ativadas por uma solução alcalina. (KWASNY *et al*, 2018; ARNOULT *et al*, 2018). A reação dos aluminossilicatos como o metacaulim, adicionado em concentrações de hidróxido sódio e silicato de sódio resultam em um produto geopolimérico (DAVIDOVITS, 1989; WU *et al*, 2019).

O uso de novos materiais geopoliméricos tem sido mais intenso no dia a dia e em obras de engenharias, apresentando como vantagens o baixo impacto ambiental, contribuindo com o desenvolvimento sustentável e mitigando os efeitos negativos causados pela construção civil ao meio ambiente (ZHAO *et al*, 2021; MOHAMMED *et al*, 2019; REN *et al*, 2021).

Os geopolímeros são materiais cimentícios com estrutura tridimensional formados por ativação química de aluminossilicatos. Portanto, é uma alternativa atraente ao cimento do tipo Portland, e seu uso permite a reciclagem de grandes quantidades de resíduos industriais (BRITO *et al*, 2018; REN *et al*, 2021; SILVA *et al*, 2022; PORTO, 2019).

Os agregados sintéticos tem sido empregados na construção civil, como uma forma de reduzir o extrativismo mineral e sua aplicabilidade em concreto é uma alternativa viável para atender as regiões em que a brita não está disponível (GU *et al*, 2021; XING *et al*, 2021). Os agregados sintéticos apresentam maior flexibilidade em relação a forma que podem ser gerados, atendendo as necessidades e limitações do meio produtivo (TATARANNI, PIERGIORGIO e SANGIORG 2019). Os agregados são um dos componentes fundamentais na produção de concreto e argamassa. Com o avanço das construções e o crescimento da demanda por esses materiais, é necessário que se busque inovação para torná-los cada vez mais eficientes e sustentáveis. O uso de matérias-primas como o metacaulim e escória de alto forno, podem

produzir agregados sintéticos com adequadas propriedades mecânicas (WU *et al*, 2019).

Este trabalho teve como objetivo, promover o estudo do geopolímero para a produção de agregados sintéticos geopoliméricos a partir do uso de matérias-primas aluminossilicosas sintetizadas com solução alcalina, visando a substituição parcial ou total dos agregados convencionais, para a aplicação em diversas áreas da construção civil.

1.1 Justificativa

Na da indústria da construção civil, os agregados são algumas das substâncias minerais mais consumida, como exemplo temos, o seixo e pedra britada. Esse fator se intensifica em decorrência do crescimento urbano.

A relevância do tema deste trabalho se justifica pelo desenvolvimento de um agregado sintético geopolimérico com elevadas resistências mecânicas, que poderão ser utilizados na construção civil em substituição as britas ou seixos convencionais, reduzindo e mitigando os impactos ambientais causados pela extração desses minerais, além de atender as necessidades locais da região Norte do Brasil.

O uso do agregado sintético geopolimérico, visa também reduzir os custos que o processo de logística da extração de minérios necessitam e envolvem o transporte, gestão de estoques, suprimento, armazenagem, manuseio de materiais, embalagem, programação de produção e a administração de materiais.

Com relação a mitigação dos impactos ambientais gerados pelas indústrias, será utilizado para o desenvolvimento do geopolímero a escória de alto forno, que é um resíduo proveniente da mineração, como principal fonte de cálcio para as reações de geopolimerização. Dentro desse contexto, a produção de agregados sintéticos geopoliméricos também tem como justificativa a redução dos impactos ambientais, diante da utilização de resíduos industriais em sua produção.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Consistiu em produzir um agregado sintético, a partir de geopolímero, para estudar sua viabilidade de aplicação na produção de concretos de alta resistência.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar as variações percentuais de escória de alto forno nas formulações de pastas

geopoliméricas;

- Estudar o comportamento mecânico das pastas geopoliméricas através do ensaio de compressão;
- Efetuar estudo comparativo de resistência mecânica entre o agregado geopolimérico e o agregado de referência, para avaliar a possibilidade do uso deste material na construção civil;
- Realizar análise microestrutural dos agregados sintéticos geopoliméricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOPOLÍMERO

2.1.1 Aspectos Históricos

O cientista francês, Joseph Davidovits, inventou e usou pela primeira vez o termo, geopolímero, em materiais a base de compostos constituídos por Alumínio e Silício, que são simultaneamente elementos essenciais para a produção do geopolímero (DAVIDOVITS, 1991).

A ciência do geopolímero tem sido estudada há quase 4 décadas, mas foi pouco investigada nos 20 primeiros anos. Durante o período de 1979 a 1999, existem cerca de 91 publicações, somando artigos em periódicos e patentes, bem como apenas uma conferência (Geopolymer 99) onde foram publicados artigos correlatos a geopolímeros e geopolimerização (DAVIDOVITS, 2002).

No ano de 1979 José Davidovits registrou e patenteou a palavra "geopolímero" como marca, e em 1983 aplicou essa inovação na indústria de cimento. Em 1985, lançou um cimento geopolimérico chamado Pyrament, que revolucionou as propriedades do tradicional cimento Portland e dos concretos comuns fabricados. Esse avanço trouxe melhorias significativas para a construção civil. (DAVIDOVITS, 2008).

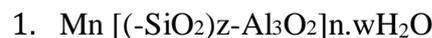
Como um novo material sustentável, o geopolímero pode fornecer uma alternativa ao cimento Portland comum (CPC), que é formado por materiais aluminossilicatos alcalinos ativados como metacaulim, cinza volante de carvão e escória metalúrgica após cura em temperatura ambiente ou temperatura entre 60 e 120 °C (DAVIDOVITS, 2002; PEREZ *et al* 2020; MOHAMMED *et al*, 2019). Os geopolímeros são também uma maneira efetiva de reciclar e reutilizar vários subprodutos da indústria, que podem ser utilizados como matéria-prima para sua produção (CHAU-KHUN, AWANG e OMAR, 2018; HASSAN *et al.*, 2019; AMRAN *et al*, 2020; SILVA *et al*, 2022).

Segundo Davidovits, os geopolímeros são uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos feita pelos antigos romanos e egípcios para a execução de peças estruturais. Conforme estudos, a composição química das pedras das pirâmides é semelhante às estruturas geopoliméricas atuais. Caracterizado por uma microestrutura composta de material amorfo composto por silicatos e aluminossilicatos complexos e um material criptocristalino. Estes compostos são encontrados em pirâmides, de 4.500 anos, assim como, em estruturas da Grécia, Chipre e Itália, com 9.000 anos (BRITO, 2018; DAVIDOVITS, 2002).

2.1.2 Obtenção do Geopolímero

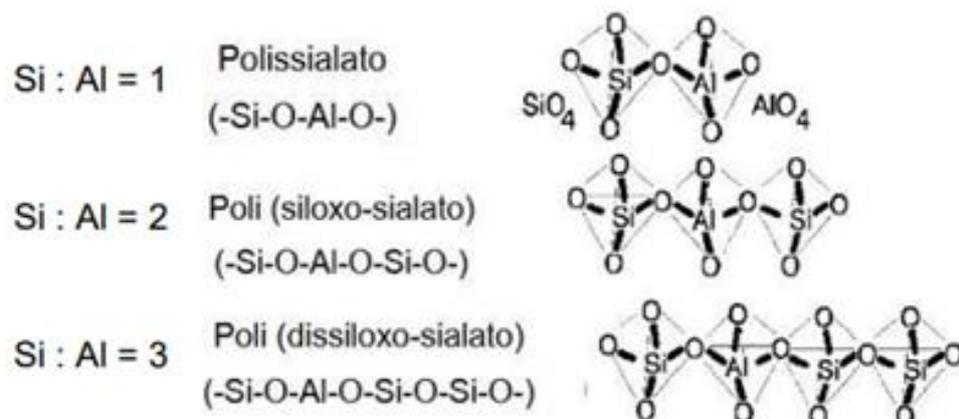
Os geopolímeros, ou polissialatos, são polímeros inorgânicos obtidos por meio da polimerização de matéria-prima contendo aluminossilicatos (poli-sílico-aluminatos). A polimerização é definida como um conjunto de reações no qual moléculas simples reagem entre si formando uma macromolécula de alta massa molar. São uma classe de materiais, descobertos por Joseph Davidovits nos anos 1970, sintetizados por ativação alcalina de aluminossilicatos em temperatura ambiente ou altas temperaturas (DAVIDOVITS, 1989; DAVIDOVITS, 1991).

Este processo de geopolimerização ocorre por meio de uma reação química que produz ligações poliméricas de átomos de silício (Si), oxigênio (O) e alumínio (Al), também chamados de sílico-óxido-aluminato (sialato), conforme equação 1, fórmula empírica dos geopolímeros (WU *et al*, 2019).



Onde, “M” é o elemento alcalino (Na⁺, K⁺ ou Ca²⁺), “z” é 1,2 ou 3, “n” é o grau de polimerização, o símbolo “-” indica a presença de uma ligação, e w é o grau de hidratação. Os geopolímeros são nomeados conforme a razão de Si/Al: Polissialato ou sialato (-Si-O-Al-O-), Polissiloxossialato (-Si-O-Al-O-Si-O-), e Polidissiloxossialato (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-), conforme representação da Figura 1 (DAVIDOVITS, 1994).

Figura 1- Representação esquemática da estrutura dos geopolímeros.



Fonte: Davidovits, (1994)

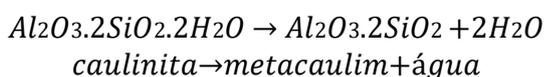
2.2 MATÉRIAS-PRIMAS

Existem muitos tipos de materiais que podem ser usados de base para os geopolímeros. Para a formação do cimento geopolimérico, são usados como fonte de aluminossilicatos, principalmente o metacaulim, a cinza volante e a escória granulada de alto forno (ZHANG *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2022; ARNOULT *et al.*, 2018). O metacaulim é a fonte de silício e alumínio e a escória granulada de alto-forno, como fonte de cálcio. Ainda, é adicionada a cinza volante, visando a melhoria das propriedades, a redução dos custos e para aliar-se às questões ambientais.

O processo de geopolimerização ocorre em condições altamente alcalinas entre silicoaluminatos que passaram por tratamento térmico e bases fortes como o hidróxido de potássio e de sódio (WU *et al.*, 2019). Aquelas são mais referenciadas na literatura, podendo ser, por sua vez, usada como ativador simples ou compostos com silicato de potássio e de sódio, tornando-se que os ativadores compostos são mais eficientes. Nessa temática serão reveladas os tipos e a atuação dos ativadores na estrutura geopolimérica, em razão de sua relevância no processo de geopolimerização (BRITO, 2018; BLANCO, IGNAZIO e CATAURO, 2022).

2.2.1 Metacaulim

O metacaulim é um mineral aluminossilicoso oriundo da calcinação de variados tipos de argilas, como as cauliniticas e os caulins de alta pureza (LI *et al.*, 2019; MATTOS e GONÇALVES, 2019). Durante a calcinação, ocorre o processo de desidroxilação, onde a caulinita produz o metacaulim e água. Na presença de água, o metacaulim, formado de sílica e alumina, reage com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, para formar compostos com propriedades cimentícias (FUNAHASHI *et al.*, 2022; LERMEN *et al.*, 2022).



Segundo Davidovits (1994), com a transformação do caulim em metacaulim o material se torna muito mais reativo, com propriedades pozolânicas. Além disso, o produto obtido pode ter diferentes graus de finura, superfície específica e também apresentar colorações variadas. Essas características dependem da composição química e mineralógica do caulim de base.

Para Davidovits (1999) o método para calcinação do caulim é simples, podendo ser realizado em laboratório de médio porte. Ele atribuiu o nome de “kandoxi” para a matéria-prima

resultante da calcinação realizada. Em seus estudos calcinou a caulinita a 750 - 800°C por 6 horas, temperatura que considera ideal. Relata ainda, que, temperaturas entre 550-650°C ou maiores que 900°C, provocam um déficit na desidroxilação. Quando calcinadas em temperaturas maiores 1000-1100°C, o material resultante será composto em grande quantidade de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Para que haja a reação de polimerização é necessário que se tenha uma quantidade suficiente de íons lixiviados de silício e alumínio na estrutura (SANTOS, ALBUQUERQUE e RIBEIRO, 2020). Quanto mais íons disponíveis para reagir, maior será a resistência mecânica do polissialato. Já que o metacaulim dispõe de grande quantidade de silicoaluminato amorfo, é de formidável importância sua adição como uma das matérias-primas da pesquisa em questão (BRITO, 2018; LERMEN *et al*, 2022; AZEVEDO e LOMBARDI, 2018).

De acordo com Teixeira (2020), a substituição parcial de metacaulim no cimento para produção de concretos, obteve suas propriedades macroestruturais otimizadas em relação aos valores de referência. Azevedo e Lombardi (2018), estudaram um geopolímero à base de metacaulim (MK) com substituição parcial do MK por cerâmica vermelha (CV), a adição da CV promoveu aumento da densidade nos corpos de prova, todavia, com análise superficial dos corpos de prova, houve a presença de micotrincas e partícula de CV não reativas no gel aluminossilicato.

Santos (2020) analisou a variação de 0%, 5%, 10% e 15% de metacaulim sobre as propriedades mecânicas de carbonatação e porosidade em relação a massa de cimento. O metacaulim adicionado a mistura, atenuou o processo de carbonatação do concreto, atribuiu ao concreto maior resistência a compressão axial e uma redução na absorção capilar.

2.2.2 Cinza Volante

A cinza volante é um resíduo proveniente da produção do alumínio que pode gerar vários impactos ao meio ambiente (ABDULLAH *et al*, 2021; HAGER *et al*, 2018). Por tornar-se um problema de armazenamento, a cinza volante tem sido investigada por vários autores com o propósito de utilização como ligante polimérico (SHAHANE *et al*, 2020; GUO *et al.*, 2021; SUN *et al*, 2019).

A utilização de cinzas volantes e argilas como materiais de partida na síntese de materiais geopoliméricos têm sido relatadas por vários autores (DAVIDOVITS *et.al.*, 1991; HUI-TENG *et al*, 2022). Embora existam opiniões divergentes quanto ao mecanismo exato responsável por estas reações, é evidente que em muitos casos em que são utilizados materiais tais como cinzas volantes ou mesmo argilas, a dissolução dos materiais de partida não é

completada antes da formação da estrutura endurecida final. (HU *et al.*, 2018; XUE *et al.*, 2018). E, em muitos casos, uma reação superficial é responsável pela união do material não dissolvido. (DAVIDOVITS, 1979; GUO *et al.*, 2021; SEVINÇ, HAYRULLAH, e DURGUN 2020).

A cinza volante é um material oriundo da combustão do carvão pulverizado em usinas termoelétricas modernas, para a geração de energia (ABDULLAH *et al.*, 2021; XUE *et al.*, 2018). Possui textura fina, com composição mineralógica predominantemente vítrea, obtida por precipitadores eletrostáticos ou mecânicos, onde suas partículas são tipicamente esféricas, e seu diâmetro varia de 1 a mais de 150 μ m, estando geralmente abaixo de 45 μ m (SEVINÇ, HAYRULLAH, e DURGUN 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

A cinza volante é um material ideal para a produção de materiais álcali ativados. (HAGER *et al.*, 2018; SUN *et al.*, 2019). Por se tratar de um resíduo, apresenta vantagens ecológicas, contudo, a problemática na utilização da cinza se dá pela variação das características químicas das cinzas, dependendo da origem, uma vez que cada usina possui suas particularidades, causando problemas no controle de parametrização e qualidade do produto final, desse modo, torna-se imprescindível a caracterização das mesmas para avaliar a eficácia nas misturas de geopolímeros (HU *et al.*, 2018; GUO e PAN, 2018; HUI-TENG *et al.*, 2022).

Witzke, Correia e Junior (2019), investigaram a resistência a compressão e a abrasão superficial do concreto utilizando cinza volante. Os corpos de prova foram moldados a partir de nove misturas diferentes com a relação água/aglomerante (A/A: 0,28; 0,33 e 0,40), agregado/aglomerante (AG/A: 2,70; 3,10 e 3,70) e teores de substituição de cimento por cinza volante (TC: 10, 20 e 30%). O fator água/aglomerante influenciou a resistência a compressão, independente do teor de cinza. A resistência a abrasão demonstrou-se satisfatória nas proporções A/A inferior a 0,32, TC entre 10 e 26% e AG/A de 3,1.

2.2.3 Escória de alto forno

A escória de alto-forno (EAF) é um subproduto da produção do ferro gusa que é produzido em grande quantidade (CORRÊA, 2021; CORREIA, 2018; PORTO, 2019). No processamento do minério de ferro o óxido de ferro é reduzido pela reação do carbono do carvão, ao passo que a sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) se fixam com a cal e o óxido de magnésio do fundente, formando uma escória que sobrenada no banho e é extravasada a cada corrida. A estrutura da EAF é de natureza vítrea, constituída principalmente de aluminossilicatos de cálcio (BRITO, 2018; PAGIO *et al.*, 2022).

Para o cientista Davidovits (2011), a reatividade da escória a torna apta para sofrer ativação alcalina, segundo ele as escórias são rentáveis e é possível produzir materiais

poliméricos a partir de escórias em pequena variação de tempo e em temperatura ambiente. Quando o precursor tiver alto índice de cálcio, como a escória granulada de alto forno, será produzido um gel do tipo C-A-S-H, e quando o índice de cálcio for baixo, como exemplo a cinza volante e o metacaulim, será produzido um gel do tipo N-A-S-H. A solidificação e o endurecimentos desses géis que formam o geopolímero são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência (SINGH, 2019; OZCAN e KARAKOC, 2019).

As escórias de alto forno são resíduos gerados pela indústria do aço e tem como seus principais constituinte SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO e Fe_2O_3 (PAGIO *et al*, 2022). São potencialmente reativas no estado amorfo para sofrer ativação alcalina e produzir geopolímeros, por possuírem 95% de material vítreo em sua microestrutura (OZCAN e KARAKOC, 2019) A explosão vítrea ocorre quando o ácido argiloso do minério de ferro (SiO_2 e Al_2O_3) e óxidos básicos (CaO e MgO). Combinam-se em altas temperaturas, cerca de 1600-1700°C, e é resfriado repentinamente a menos de 800°C (NAGARAJAN e SHASHIKALA, 2019).

2.2.4 Ativadores Alcalinos

Os materiais geopoliméricos são geralmente sintetizados usando soluções ativadoras a base de álcalis de sódio ou potássio, (soluções de hidróxidos alcalinos ou uma mistura de soluções de silicato alcalino e de hidróxido alcalino), a diferença entre estes dois ativadores é que o primeiro não adiciona sílica ao sistema, enquanto o segundo tem essa concentração elevada (JAFARI *et al*, 2016, LUCAS, 2021).

A ativação com silicato de sódio - Na_2SiO_3 apresenta maior resistência mecânica em comparação ao silicato de potássio, porém, sua resistência residual é menor quando submetido a altas temperaturas. O ativador a ser escolhido para aplicação depende do material e está relacionado ao desempenho mecânico dos geopolímeros (TRINCAL *et al*, 2022).

2.2.4.1 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) está entre os mais utilizados se tratando de ativador na produção de geopolímeros, por apresentar dentre todos o melhor custo/benefício e ser o mais acessível e disponível no mercado para obtenção (BRITO *et al*, 2019). O emprego de NaOH como ativador na síntese de geopolímeros, de soluções de silicoaluminatos, é muito usual por ser economicamente viável e ter baixa viscosidade (JAFARI *et al*, 2016).

O hidróxido de sódio 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 (LUCAS, 2021). Os corpos de prova de pasta

geopolimérica à base de escória de alto forno contendo hidróxido de potássio, apresentaram maior resistência à compressão em várias idades até 91 dias quando comparados com os corpos de prova contendo hidróxido de sódio (JAFARI *et al*, 2016).

Segundo os estudos de Brito *et al* 2018, que avaliou o desempenho mecânico dos geopolímeros com razão de Davidovits ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2 \text{O}_3$) de 2,65, sintetizados com diferentes concentrações molares de NaOH (5, 15, 30 e 40 Molar) no ativador, encontrou resultados satisfatórios para geopolímeros sintetizados com 5 e 15 molar de NaOH apresentando alta resistência a compressão de 40,8 MPa com 28 dias de cura.

2.2.4.2 Silicato de Sódio

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) é a fonte complementar utilizada na reação de geopolimerização. É formado através da reação entre carbonato de sódio e dióxido de silício quando fundidos, sendo um sólido branco que é solúvel em água, produzindo uma solução alcalina (TRINCAL *et al*, 2022; HANDAYANI *et al*, 2021). Os ativadores a base de silicato demandam uma velocidade na reação do geopolímero, por conta de a sílica existente originar a reação com a alumina livre na solução. O silicato contribui o processo de polimerização, induzindo a um produto de reação que contenha mais Si, elevando assim a resistência mecânica (PARTSCHEFELD, 2020).

Os silicatos em geral são compostos de tetraedros $[\text{SiO}_4]^{-4}$ que se encontram isolados ou como polímeros unidos através de moléculas de oxigênio, arranjados em cadeias, camadas ou sistemas tridimensionais (HANDAYANI *et al*, 2021). Os silicatos de sódio, por sua vez, são os silicatos solúveis mais comuns e são combinações de SiO_2 , Na_2O , sob a forma $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$, podendo ter água na composição (RAJAN e KATHIRVEL, 2021).

Segundo os estudos de Jafari *et al* (2016), a presença de silicato de sódio na pasta de geopolímero à base de escória de alto forno aumenta em grande parte a trabalhabilidade e resulta no aumento da resistência à compressão. A solução de silicato de sódio melhora a taxa de dissolução de Si e Al, pois as ligações Al–O são mais fracas que as ligações Si–O na matéria-prima, o Al se dissolve rapidamente em solução alcalina. Portanto, se o íon Si for fornecido antes de estar disponível através da dissolução da matéria-prima, pode aumentar o grau de geopolimerização e melhorar as propriedades mecânicas.

Rocha (2017) avaliou o estudo de argamassas geopoliméricas desenvolvidas com diferentes ativadores alcalinos, integrando silicato (sódio ou potássio) com hidróxido (sódio ou potássio) em temperatura ambiente e elevada. O geopolímero produzido com silicato de sódio alcalino, apresentou maior resistência mecânica inicial em relação ao silicato de potássio. Em

contrapartida, o silicato de potássio apresentou maior desempenho em todas as argamassas e sua microestrutura com as paredes mais densas e pouco porosas

2.3 PRODUTOS GEOPOLIMÉRICOS

2.3.1 Pasta Geopolimérica

Existem muitos tipos de materiais que podem ser usados de base para os geopolímeros. Para a formação do cimento geopolimérico, são usados, como fonte de aluminossilicatos, principalmente o metacaulim, a cinza volante e a escória granulada de alto forno (ZHANG *et al.*, 2018). Este tipo de cimento tem um tempo rápido de endurecimento, comparando-se ao cimento Portland, assim como, são mais resistentes aos problemas relacionados à durabilidade. A maior parte de sua resistência mecânica é adquirida dentro de 24 horas, e eles formam uma forte ligação com os agregados (BRITO, 2018; ARAUJO *et al.*, 2023).

O cimento geopolimérico entre as diversas áreas de aplicações, podem ser utilizados como materiais de reparo em estruturas de concreto para recuperação de fissuras (AMRAN *et al.*, 2020). O autor Frasson *et al.* (2020), formulou uma pasta de cimento geopolimérico analisando seu desempenho mecânico e modos de fratura para ser utilizado como material para recuperação de fissuras, equiparando seu desempenho a resina epóxi. O aglomerante geopolimérico apresentou-se satisfatório e com desempenho mecânico equivalente ao epóxi tradicional.

Porto *et al.* (2019) estudou a dosagem de pastas geopoliméricas (PG) com escória de alto forno (EAF) e sem EAF. Na preparação da pasta, o metacaulim foi utilizado como fonte de alumínio e silício e a EAF como fonte de cálcio, o hidróxido de potássio e o silicato de sódio (alcalino) como solução ativadora. A pasta de cimento geopolimérico com EAF apresentou melhor resistência a compressão e microestrutura densa. A mistura sem EAF demonstrou porosidade e partículas de metacaulim não reagidos.

Porto (2018), desenvolveu pastas geopoliméricas a partir do estudo de dosagem, com a finalidade de obter produtos com propriedades refratárias. As propriedades termodinâmicas foram analisadas através de ensaios mecânicos com exposição a altas temperaturas e temperatura ambiente. Com a exposição a altas temperaturas, os polímeros inorgânicos apresentaram suas características estruturais preservadas e sua microestrutura não apresentou degradação relevante até 500°C.

2.3.2 Argamassa

Conforme a NBR 13281 (2005), a argamassa é definida como “mistura homogênea de agregado(s) miúdos(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento”. De acordo com Lima (2020), argamassa é a mistura composta de areia, água e aglomerantes, geralmente cimento Portland, destinados a assentamento de blocos cerâmicos ou de concreto, rejuntamento ou revestimentos, regularização e argamassa de reparo (ZHU *et al*, 2020; CHITHAMBARAM, KUMAR e PRASAD, 2019). O termo argamassa geopolimérica se dá pelo fato de não possuir o cimento Portland em sua composição, desse modo, o aglomerante é formado por um pó rico em aluminossilicato e solução ativadora alcalina (HAGER, SITARZ e MRÓZ, 2021; SUKSIRIPATTANAPONG *et al*, 2020).

O comportamento mecânico, químico, térmico e até mesmo a trabalhabilidade das argamassas geopoliméricas são influenciadas diretamente pelo tipo de precursor e pelo tipo e concentração da solução alcalina ativadora. As diferentes combinações desses materiais produzem geopolímeros com propriedades e características muito distintas (ROCHA *et al* 2020; CHITHAMBARAM, KUMAR e PRASAD, 2019). Argamassas geopoliméricas possuem valor de pH menor do que argamassas de cimento Portland, significando que raramente a reação álcali-agregado irá acontecer (ZHANG *et al.*, 2018).

As argamassas convencionais, dependendo da sua funcionalidade, pode haver incorporação de aditivos químicos e adições minerais (ROCHA *et al* 2020). No caso das argamassas geopoliméricas, os demais componentes são mantidos, somente o cimento é substituído pela mistura de precursores e uma solução alcalina (SUKSIRIPATTANAPONG *et al*, 2020; ZHU *et al*, 2020).

Lima (2020) avaliou as argamassas geopoliméricas no estado fresco e endurecido com algumas proporções entre os ativadores silicato de sódio, hidróxido de sódio com cinza volante e teve como referência o cimento portland. A mistura teve influência significativa nas propriedades do estado endurecido. Em seu estado fresco, apresentou resultados satisfatórios como resistência a compressão axial e tração.

Rocha (2017) apresentou que as argamassas geopoliméricas foram produzidas tendo como fonte de aluminossilicato o metacaulim e areia quartzosa e ativadores alcalinos. Obteve-se melhores resultados na amostra de metacaulim com 530g em temperatura de 600°C em 2 horas. Os corpos de prova das argamassas foram curados a temperatura ambiente por 24 horas. A variação molar refletiu diretamente na resistência mecânica das argamassas, todas

apresentaram resistência a compressão axial elevada e comportamentos distintos entre si, dependendo do ativador utilizado.

2.3.3 Concreto

O concreto geopolimérico (CCG) é uma alternativa recente que utiliza os agregados minerais comumente utilizados no setor na construção civil, como brita e areia, mas que, diferentemente do concreto convencional, utiliza um aglomerante composto por geopolímeros (SALAS *et al*, 2018; ZHANG *et al*, 2020). Esse, conhecido como cimento geopolimérico, é fabricado a partir da união de um ativador alcalino com um precursor em pó (MOHAMMED *et al*, 2019; AMRAN *et al*, 2020; LINGYU *et al*, 2021; SILVA, 2006; SILVA *et al*, 2022).

O custo do concreto geopolimérico ainda é um fator relevante quando comparado ao concreto de cimento Portland, evidenciando o motivo do material ainda não ser uma alternativa construtiva totalmente viável, problema comum associado às novas tecnologias (MOHAMMED *et al*, 2019; HASSAN *et al.*, 2019; SILVA *et al*, 2022). A resistência à compressão é um dos principais parâmetros do concreto, e, tomando como base os parâmetros para o concreto de cimento Portland, é uma propriedade que apresenta números bastante satisfatórios para os geopolímeros. De acordo com o ABNT NBR 6136/2016, o valor mínimo de resistência para blocos estruturais de concreto do é de 8 MPa, assim, o material geopolimérico já atenderia às demandas de tal produto (CHAU-KHUN, AWANG e OMAR, 2018; ZAKKA *et al* 2021; MA *et al*, 2018)

Para produção de concreto os agregados mais amplamente utilizados, particularmente no Brasil, são as areias e seixos naturais e as pedras britadas (HASSAN *et al.*, 2019; (SALAS *et al*, 2018). No entanto, como a escolha do agregado é condicionada a disponibilidade local, até por uma questão de custo, há uma variedade de outros materiais utilizados para produção de concretos (ZAKKA *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2019). Cabe ainda complementar, ressaltando que, além dos agregados acima referidos, utilizados para produção de concretos “convencionais”, há ainda agregados específicos, utilizados para produzir concretos com propriedades diferenciadas. Por exemplo, para se produzir os chamados “concretos leves”, é comum o emprego de poliuretano expandido como agregado (COLANGELO *et al*, 2018; ZHANG *et al*, 2020; ALMUTAIRI *et al*, 2021).

De acordo com os estudos de Rocha et e al (2020) que propôs avaliar as características microestruturais, físicas e mecânicas de concretos geopoliméricos tendo como agregado metacaulim isolado ou combinado com cinza de casca de arroz nas proporções de (10%; 15%; 20%), em relação a resistência a compressão o metacaulim obteve resultados similares ao

concreto de referência. A combinação de 10% com cinza da casca de arroz apresentaram melhores resultados mecânicos, físicos e estruturais

Oliveira *et al.* (2021) propôs um estudo a respeito da resistência à compressão de um concreto geopolimérico e um concreto de cimento Portland. Nas primeiras horas de moldagem, o concreto geopolimérico apresentou resistência elevada em comparação com o cimento Portland, todavia, segundo o autor, é necessário um estudo com um tempo mais prolongado para avaliação do comportamento do aglomerante e sua variabilidade de aplicação.

2.4 APLICAÇÕES DO GEOPOLÍMERO

Estes materiais obtidos a partir da geopolimerização, estão propiciando diferentes aplicações e procedimentos, transformando os processos e técnicas de fabricação já conhecidos (DAVIDOVITS, 1991; BLANCO, IGNAZIO e CATAURO, 2022). Através desta característica intrínseca dos geopolímeros o seu campo de aplicação ganha uma vertente mais ampla na indústria da construção civil, visto que o geopolímero é um aglomerante com boa resistência mecânica e rápida cura. Esta tecnologia tem também a capacidade de atribuir valor acrescentando resíduos industriais (cinzas volantes) que são causadores de problemas ambientais e muitas das vezes esses resíduos tem uma elevada concentração de metais pesados em sua composição (BRITO, 2018; WU *et al.*, 2019).

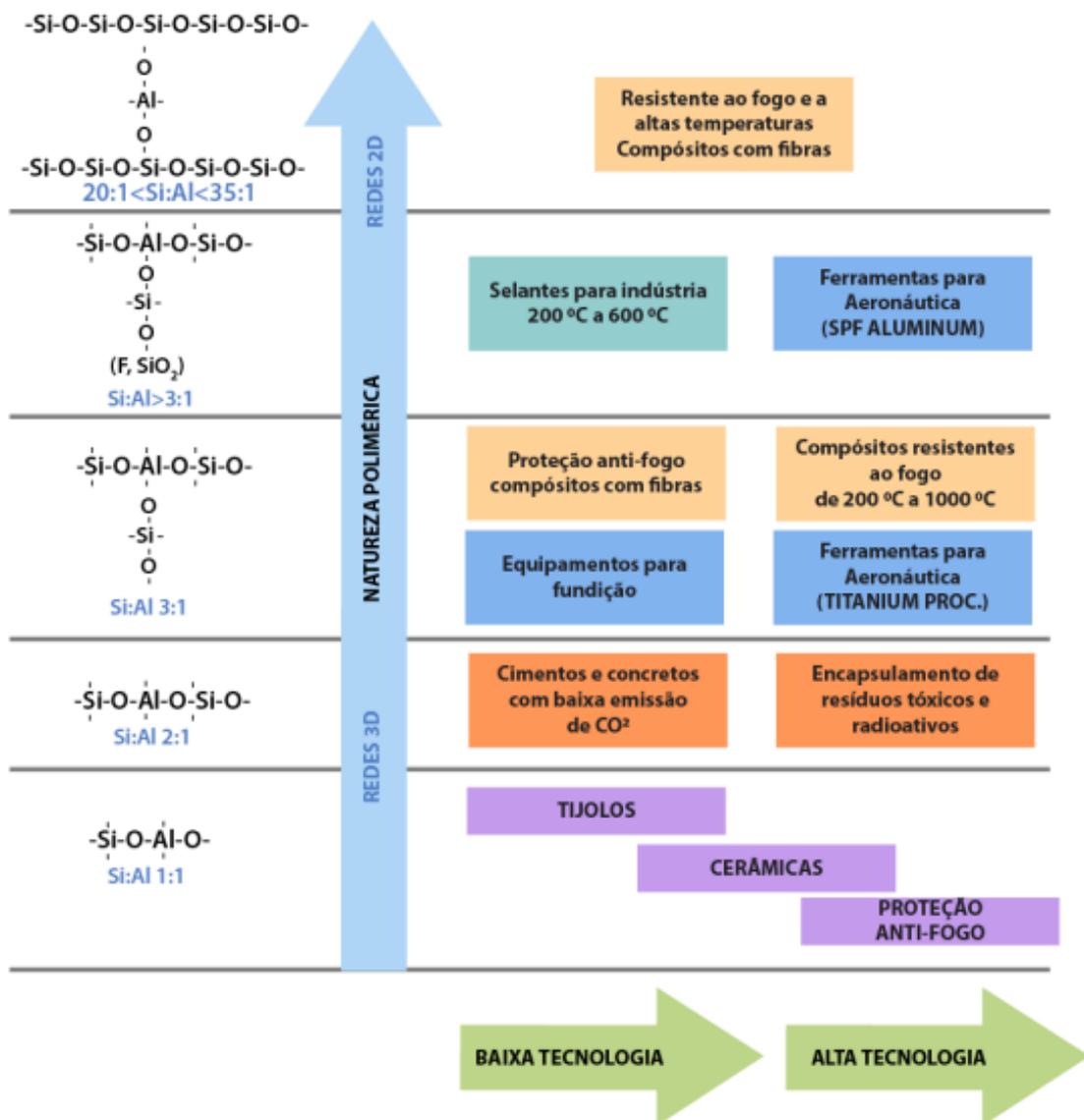
O campo de aplicação dos geopolímeros encontra-se limitado ainda, por ser uma tecnologia recente, no entanto, devido às suas particularidades, pode-se relatar a respeito da sua diversidade nas aplicações industriais. Um aglomerante com propriedades como resistência à compressão, cura rápida, baixa permeabilidade, resistência a ácidos, altas temperaturas e baixo custo, terá obviamente inúmeras possibilidades de aplicações (BRITO, 2018; COLANGELO *et al.*, 2018). Os polímeros inorgânicos apresentam boa durabilidade, aderência ao concreto, resistência a altas temperaturas, demonstrando maior potencial para aplicação em novos produtos (PORTO, 2018; WU *et al.*, 2019; ALMUTAIRI *et al.*, 2021).

Geopolímeros podem ser utilizados também nos segmentos da indústria automobilística, aérea, indústria naval e de submarinos, infraestrutura e aplicações em construções, cimentação de poços de óleo e gás, armazenamento e encapsulação de materiais tóxicos e radioativos, artísticos, entre outros (BLANCO, IGNAZIO e CATAURO, 2022; SILVA, 2006).

Pode ser observado na Figura 2, que a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, é importantíssima para definição da aplicação. Os produtos gerados pela reação de geopolimerização estão diretamente

ligados a síntese utilizada e a relação Si/Al tem grande impacto nesses produtos. Relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, próximas a 2 dão origem a geopolímeros utilizados em materiais cerâmicos com propriedades de proteção antifogo, aumentando essa relação para $2 < \text{Si}/\text{Al} < 6$, é possível obter geopolímeros com características de imobilização de metais, equipamentos para fundição, aeronáutica e cerâmicas e concretos com menor emissão de CO_2 . As relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, entre 6 e 40 dão origem a selantes industriais, e relações maiores que 40 são utilizadas para produção de geopolímeros com altíssima resistência ao fogo (MOHD *et al*, 2020; ABDEL-GHANI *et al*, 2018).

Figura 2 - Ilustrativo de utilização de geopolímeros.



Fonte: Adaptado de Davidovits, 1999

2.5 AGREGADOS

Os materiais rochosos utilizados na construção civil em sua forma granular são denominados agregados, e em placas são denominados rochas ornamentais ou pedras de revestimento (BENARCHID *et al*, 2018). As rochas são utilizadas em diversas finalidades pela construção civil e podem ser usados como agregados para concreto e pavimentação asfáltica, para produção de pedras britadas, em fundações, revestimentos, uso ornamental, entre outros diversos usos. (FOURNARI e IOANNOU, 2019). As características das partículas dos agregados são dependentes da rocha de origem e do processo de produção, visto que é durante o processo de britagem que resulta a forma final dos agregados

Petrucci (1987) define agregados como material granular, sem forma ou volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia (DING *et al*, 2020). A obtenção do agregado se dá pelo processo de britagem que pode ser realizado por diferentes equipamentos. Os agregados podem ser classificados de acordo com sua origem, em naturais e artificiais. Naturais são aqueles que não necessitam de fragmentação e os artificiais são extraídos da rocha de origem e carecem de processos mecanizados para sua fragmentação.

A ABNT NBR 7211 (2022) estabelece os requisitos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland. Segundo a norma, os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, limpos, duráveis e resistentes, devendo apresentar uma resistência no mínimo superior a massa de cimento, caso contrário os grãos se romperiam antes da pasta. Além disso não devem conter substâncias de outra natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação, o endurecimento do cimento, a durabilidade, a proteção da armadura contra a corrosão ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto.

Para a aplicação na construção civil as dimensões dos agregados são classificados, de acordo com a ABNT NBR 7211 (2022) em:

- Agregados miúdos – aqueles cujos grãos passam por uma peneira com abertura de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm;
- Agregados graúdos – aqueles cujos grãos passam por uma peneira com abertura de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

Outra classificação dos agregados refere-se à distribuição dos grãos que é determinada por meio de análise de peneiramento. Amostras secas de agregado são separadas passando por diversas peneiras com aberturas que vão diminuindo de uma para outra, progressivamente

(DING *et al*, 2020).

2.5.1 Agregados naturais

Os agregados naturais são formados por grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo e produzidos por processos de britagem, como os pedregulhos, os seixos, britas, areais, etc. Os agregados artificiais necessitam uma transformação física e química do material natural para sua utilização, como a escória de alto forno e a argila expandida (KEKANOVIĆ *et al*, 2020). O conhecimento das características e a seleção crítica dos agregados graúdos, possibilita um maior controle das propriedades do concreto, produzindo um material de melhor qualidade mais resistente e durável (AGHILLOTF *et al*, 2021; SUÁREZ *et al*, 2022).

2.5.2 Agregados reciclados

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD's) podem ser utilizados como agregados reciclados em diferentes aplicações do setor da construção civil. Podem ser resíduos industriais granulares, que possuem propriedades que os tornem adequados ao uso como agregado (ULUGÖL *et al*, 2021; MESGARI *et al*, 2020). Este tipo de agregado também pode ser proveniente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, os chamados RCD's, os quais são devidamente selecionados para que possam ser utilizados para esta finalidade (KUGLER, *et al.*, 2022; WIJAYASUNDARA *et al*, 2018). Vale ressaltar que são descartados na seleção metais, madeira, restos orgânicos e outros materiais que possam apresentar comportamento prejudicial se incorporados ao concreto. São exemplos de agregados reciclados a escória de alto forno, entulhos de construção/demolição, resíduos cerâmicos provenientes de olarias, etc (NAGGAR *et al.*, 2019; REN *et al*, 2021).

Os estudos de Figueiredo (2020), expressam que a reciclagem dos resíduos de construção e demolição é encorajada dentro dos novos preceitos de sustentabilidade e economia circular, em que os benefícios se estendem ao aumento da vida útil de jazidas minerais, à conservação dos recursos naturais e à eliminação da deposição ilegal desses resíduos nas cidades (ULUGÖL *et al*, 2021). Entretanto, para produzir agregados reciclados com propriedades adequadas às aplicações, é necessário o controle das operações de cominuição no beneficiamento do RCD (NAGGAR *et al.*, 2019; ANGELO *et al.*, 2021; ZHU *et al*, 2020).

2.5.3 Agregados Britados

Brita pode ser definida como um conjunto de rochas trituradas artificialmente e reduzidas a grãos com dimensões e características estabelecidas em normas para utilização na construção civil (FLADVAD e ONNELA, 2020; HICKEL *et al*, 2018). O uso da brita está presente em concretos, argamassas, pavimentos, lastros ferroviários e outros. São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas (PETRUCCI, 1987).

A brita constitui o maior volume do concreto, com o qual se realizam inúmeras obras de engenharia. Uma de suas funções no concreto são contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, resistir ao desgaste originado pela ação de intempéries, reduzir as variações de volume de qualquer natureza e contribuir para a redução do custo do concreto (FOURNARI e IOANNOU, 2019; OLIVEIRA *et al*, 2018).

A brita é uma das principais matérias-primas utilizadas na composição do concreto (KAMANI e AJALLOEIAN, 2020). Tem a responsabilidade de estruturar a mistura, juntamente com a areia e o cimento, que conferem trabalhabilidade. Além disso, aumenta a resistência à compressão dos elementos e os protege do desgaste. Contudo suas funções podem ser afetadas por conta da qualidade da brita utilizada (DANTAS, 2019).

A brita é um agregado resultante da britagem de rochas. É um mineral resultante basicamente da fragmentação mecânica de pedras (OLIVEIRA *et al*, 2018). Não possuem volume, formas e dimensões exatos, possuindo diâmetros variados. Estes agregados representam entre 60 a 80 % do volume do concreto, deste modo devem conferir resistência às ações mecânicas (FILHO, 2017; ALVES *et al*, 2019).

A brita de calcário, por exemplo, é um tipo de pedra que tem baixa resistência mecânica, já o basalto e granito, possuem maior resistência, sendo opções ideais para pavimentações que precisam suportar grandes cargas. (OLIVEIRA *et al*, 2018). A pedra brita é um dos elementos que conferem resistência ao concreto e quando o produto for de qualidade tornará o elemento mais resistente, prolongando sua vida útil e evitando o surgimento de patologias subsequentes (DANTAS, 2019; ALVES *et al*, 2019).

A Tabela 1 apresenta a classificação dos agregados graúdos conforme apresentado na NBR-7211 (2005) e na NBR-7225 (ABNT, 1982), bem como a classificação comercial comumente utilizada pelas pedreiras.

Tabela 1- Classificação do Agregado Graúdo quanto à dimensão.

Pedra britada numerada	NBR- 7211/NBR- 7225			
	Tam. Nominal		Malha da Peneira (mm)	
Número	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
brita 0	-	-	4,8	9,5
brita 1	4,8	12,5	9,5	19,0
brita 2	12,5	25,0	19	38,0
brita 3	25,0	50,0	38	50,0
brita 4	50,0	76,0	50	76,0
brita 5	76,0	100,0	-	-

Fonte: *Adaptado de* FILHO, (2017).

2.6 TIPOS DE ROCHAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define rocha ornamental como uma substância rochosa natural que, submetida a diferentes graus de modelamento ou beneficiamento, pode ser utilizada como uma função estética qualquer. As rochas para uso na construção civil são os materiais mais lavrados no mundo, por ser tão amplamente utilizado é necessário o estudo de técnicas para sua melhor caracterização (KAMANI e AJALLOEIAN, 2020; BENARCHID *et al*, 2018). Segundo Back (2018), geralmente, materiais rochosos são selecionados de acordo com sua disponibilidade, isto é, distância de transporte entre o local de extração (pedreira) e o local da obra, além de facilidade de extração (DANTAS, 2019; CASTILHO, 2018; KEKANOVIC *et al*, 2020).

Conforme dados retirados do site do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) referentes à porcentagem de agregados utilizados no Brasil, os tipos rochosos mais empregados na produção de brita ao longo do território brasileiro é a seguinte: granito e gnaisse - 85%, calcário e dolomito - 10% e basalto e diabásio - 5%, sendo o Rio Grande do Sul responsável por 6% da produção nacional de agregado, tratando-se em sua grande maioria de basaltos e diabásios (BACK, 2018).

Quanto a sua origem, as rochas ornamentais podem ser enquadradas nos três grandes grupos existentes, tais como rochas ígneas (ou magmáticas), rochas metamórficas e rochas sedimentares. Conforme apresentado na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Rochas ornamentais – Classificação por origem

Nomenclatura	Origem	Exemplos (Rochas Ornamentais)
Ígneas ou Magmáticas	Provêm da solidificação do magma. Podem ser originadas no interior da crosta terrestre (plutônicas ou intrusivas) ou na superfície (vulcânicas ou extrusivas).	Granitos Dioritos Riolitos Basalto
Metamórficas	São oriundas de outras rochas que sofreram alterações de temperatura e pressão, e tiveram sua textura modificada ocorrendo em alguns casos modificações na composição mineralógica.	Mármore Gnaisses Ardósia Quartzitos
Sedimentares	Formadas de materiais originados da decomposição mecânica ou química, desagregação e transporte de outros tipos de rocha.	Arenitos Folhetos Calcários Travertinos

Fonte: Fontes, 1984.

2.6.1 Rochas Ígneas ou Magmáticas

Grande parte das rochas magmáticas ou ígneas como, por exemplo, o granito, o sienito, o diorito, o gabro e muitas outras são geradas em profundidade na crosta ou no manto, e, por tal razão, designam-se também por rochas plutônicas (GROTZINGER e JORDAN, 2013; STRZALKOWSKI *et al*, 2021). As rochas plutônicas também designadas por rochas intrusivas, pois os magmas instalam-se, de modo mais ou menos forçado, em rochas mais antigas a profundidades dentro da crosta terrestre, e que depois solidificam lentamente abaixo da superfície, embora possam ser posteriormente expostas pela erosão. As rochas vulcânicas ou extrusivas, como os basaltos, resultam da consolidação de magmas que brotam à superfície (CARVALHO, 2018; GROVE e BROWN, 2018; OSTERLE *et al*, 2020).

As rochas ígneas ou magmáticas são originadas a partir do resfriamento e solidificação de material rochoso, parcialmente ou totalmente fundido, denominado magma, gerado no interior da crosta terrestre (BABAZADEH *et al*, 2022; GROVE e BROWN, 2018). A

cristalização pode ocorrer tanto no interior da crosta terrestre quanto em sua superfície, gerando dois tipos distintos de rocha, as ígneas plutônicas ou intrusivas e ígneas vulcânicas ou extrusivas, respectivamente (BACK, 2018). São exemplos de rochas ígneas granito, basalto e diabásio (Wojahn, 2018), conforme especificado na figura 3.

Figura 3 - Exemplo de rochas ígneas: a) Basalto; b) Granito; c) Diabásio:



Fonte: Wojahn, 2018

Dentre as rochas ígneas, dada a sua aparência, abundância e boas características físicas e mecânicas, que favorecem o emprego em obras civis, os granitos *sensu stricto* são as mais apreciadas para uso como rocha ornamental e para revestimento, especialmente pela grande variedade de cores, definidas pelo tipo de feldspato existente e impurezas neles presentes (VIDAL, 2013; STRZALKOWSKI *et al*, 2021; GUO *et al*, 2021; OSTERLE *et al*, 2020).

2.6.2 Rochas Sedimentares

Rochas sedimentares são formadas, em grande parte, a partir dos fenômenos que constituem o ciclo sedimentar: intemperismo, erosão, transporte, deposição, soterramento e diagênese/litificação (GROTZINGER e JORDAN, 2013). As rochas sedimentares são classificadas em função dos sedimentos que as dão origem, sendo, portanto, diferenciadas em rochas clásticas ou detríticas (ou ainda, siliciclásticas) e químicas e bioquímicas (WAKABAYASHI *et al*, 2019; ZHOU *et al*, 2018).

As principais rochas sedimentares aloquímicas usadas em revestimentos são os calcários e os dolomitos, rochas carbonáticas compostas por mais de 50% (geralmente entre 80% a 100%), de calcita ou dolomita, respectivamente. São exemplos de rochas sedimentares arenito, calcário e carvão (WOJAHN, 2018; VIDAL, 2013; ZHOU *et al*, 2018). Exposto na figura 4 abaixo.

Figura 4 - Exemplo de rochas sedimentares: arenito e carvão.



Fonte: Wojahn, 2018

2.6.3 Rochas Metamórficas

As rochas metamórficas são resultantes da transformação, no estado sólido, de rochas preexistentes que, no decorrer dos processos geológicos, sofreram mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, em resposta a alteração das condições de pressão, temperatura e fluidos mineralizantes impostas em profundidades (BACK, 2018; WANG *et al.*, 2019). O metamorfismo pode envolver a recristalização de minerais pré-existentes, mudanças de textura com tamanho e arranjo dos grãos de rochas e recristalização de minerais através da combinação de elementos químicos. (VIDAL, 2013; WANG *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2020). São exemplos de rochas metamórficas gnáisse, quartzito, mármore e ardósia (Wojahn, 2018). A figura 5, apresenta as rochas metamórficas.

Figura 5 - Exemplos de rochas metamórficas: (a) mármore; (a) quartzito.



Fonte: Wojahn, 2018

2.6.4 Especificações das rochas

A determinação das propriedades das rochas é realizada por meio da execução de ensaios e análises normalizados, em laboratórios especializados, que objetivam a obtenção dos

parâmetros petrográficos, físicos e mecânicos característicos, cuja análise permitirá a recomendação do uso mais adequado no revestimento de edificações, bem como subsidiarão a elaboração de projetos arquitetônicos (VIDAL, 2013; KEKANOVIC *et al*, 2020).

A avaliação da qualidade da rocha é identificada através das propriedades tecnológicas e os métodos realizados para caracterização desses materiais, são normalizados por várias entidades internacionais como a American Society for Testing and Materials (ASTM); Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); British Standard Institution (BSI); Comissão Europeia de Normalização (CEN) e Deutches Institut für Normung (DIN). Como parâmetros neste trabalho serão utilizados como referência a (ASTM) e (ABNT).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, define na norma NBR 15012:2013, rocha ornamental como "material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária". O termo rocha para revestimento é definido pela ABNT como "rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento e utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas" (VIDAL, 2013; CASTILHO, 2018).

Para a realização dos ensaios deve-se seguir a especificação da norma vigente, a qual padroniza os ensaios tecnológicos. Na NBR 15845-5 (2015) apresenta as rochas de revestimento para ensaio de compressão uniaxial e NBR 15844, classifica as rochas para revestimento em granito, conforme as tabela 3 e 4 apresentadas abaixo, que descrevem alguns ensaios tecnológicos, de acordo com suas especificações.

Tabela 3 - Ensaios e análises para caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento.

Ensaio (unidade)	Normas		
	ABNT	ASTM	CEN
Análise petrográfica	NBR 15845-1:2015	C1721	EN 12407
Dilatação térmica	NBR 15845-3:2015	-	EN 14581
Desgaste Abrasivo	NBR 12042:2012	C241 / C1353	EN 14157
Compressão Uniaxial	NBR 15845-5:2015	C170	EN 1926
Módulo de ruptura (Mpa)	NBR15845-6:2015	C99	EN 12372
Módulo de Elasticidade (Mpa)	NBR 10341:2016	C1352	EN 14146 EN 14850

Fonte: *Adaptado de Abirochas, (2020).*

Tabela 4 - Especificações para granito ABNT e ASTM

Propriedade	Norma	
	ABNT NBR 15844	ASTM C 615
Densidade Aparente	>2.550	≥2560
Porosidade Aparente	1,0	n.e.
Absorção d'água (%)	<0,4	≤0,4
Compressão Uniaxial (Mpa)	>100	131
Módulo de Ruptura / carregamento em 3 pontos (Mpa)	>10,0	10,34
Flexão / carregamento em 4 pontos (Mpa)	>8,0	8,27
Coefficiente de dilatação térmica	<8,0	n.e.
Impacto de corpo duro (m)	>0,3	n.e.
Desgaste Amsler (mm/1000m)	<1,0	n.e.
Nota: n.e. = não especificado		

Fonte: VIDAL, (2013).

De acordo com Birochas (2020), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT realizou ensaios tecnológicos em diversas regiões do Brasil para litologia com fins ornamentais e de revestimento para diferentes tipos de rochas. A tabela 5 discrimina os diferentes ensaios e os resultados exigíveis para cada um deles.

Tabela 5 - Valores médios obtidos por ensaios tecnológicos de alguns tipos de rochas.

ENSAIOS	ME (kg/m ³)	AB (%)	DE (mm)	IM (mc)	CO (Mpa)	MD (Mpa x 1000)	MR (Mpa)	CD (mm/m °C x 10 ⁻³)
Granito	2630	0,3-0,4	0,5-0,6	40-60	150-200	40-50	15-20	9,7-9,9
Monzonito	2750	0,2-0,3	0,7-0,8	40-60	130-150	40-45	20-25	9,8-9,9
Charnockito	2680	0,4-0,5	1,0-1,2	50-60	90-100	40-45	15-20	8,8-11,6
Sienito	2700	0,3-0,4	1,0-1,2	-	90-100	45-50	dez/15	-
Basalto	2900-3100	0,1-0,3	0,6-0,8	40-50	200-300	50-70	25-35	9,4-10,1
Mármore	2700-2900	0,1-0,6	1,4-3,3	-	60-170	20-70	out/15	3,1-11,9

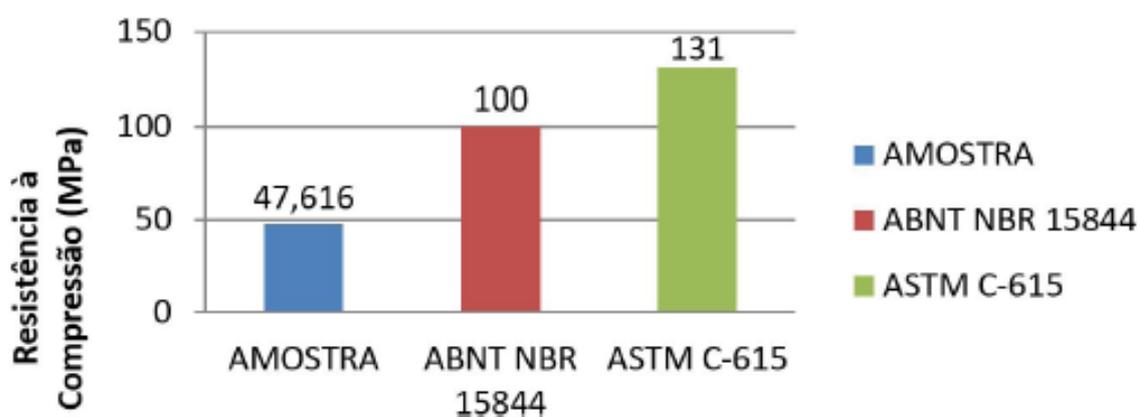
Convenções: ME: massa específica aparente; AB: absorção de água; DE: desgaste Amsler; IM: impacto de corpo duro; CO: compressão uniaxial; MD: módulo de deformabilidade estática; MR: módulo de ruptura (ASTMC99); CD: coeficiente de dilatação térmica linear.

Fonte: Abirochas, (2020).

Rodrigues *et al*, (2018) estudou as propriedades tecnológicas de uma rocha ornamental granítica analisando a resistência à compressão uniaxial em uma prensa hidráulica com capacidade de 20 toneladas, segundo a ABNT NBR- 15.844:2010 e ASTM C-615. Na rocha ornamental em estudo, foram observados valores menores que os limites mínimos de resistência considerados nas normas, isto implica que a rocha não deve ser utilizada em situações onde

sofrerá esse esforço, tais como as aplicações estruturais, como mostra a figura 6.

Figura 6 - Valor de resistência a compressão uniaxial da amostra e os valores limites de acordo com as normas.



Fonte: Rodrigues, (2018).

Batista e Ingunza (2023), realizaram uma caracterização geotécnica de resíduos de mineração de granito para fins geotécnicos, em consonância com a ABNT NBR 15845-5, 2015 e ASTM C – 170, 2009 para fins de resistência a compressão uniaxial das rochas. Os valores médios obtidos para as amostras de granitos estudadas foram de 86 MPa, 132 MPa e 104 MPa. Segundo os autores, os resíduos coletados podem ser usados em enrocamento de obras hidráulicas e construção de trechos, que cruzam cursos de água, de estradas de rodagem.

2.7 USO DE AGREGADOS SINTÉTICOS

Atualmente as atividades industriais e da construção civil vêm ganhando destaque com as suas relações envolvendo a preservação do meio ambiente e do desenvolvimento sustentável. Por isso, a destinação correta e ambientalmente adequada dos resíduos gerados se torna essencial para mitigar os impactos ambientais. Neste contexto, a reutilização e a conversão de resíduos como a escória de alto forno e a cinza volante, em insumos, se tornam uma alternativa viável para aplicação na construção civil, transformando esses materiais em agregados sintéticos (OLIVEIRA *et al*, 2019; MOHAMMED *et al*, 2021; SANTOS, 2019).

Xing et e al (2021) propôs através da escória de silicomanganês e cinza volante 20%, preparar agregado não inflamável pelo método de ligação a frio. A ativação alcalina ocorreu através de ativadores líquidos (silicato de sódio 16,2%) e sólidos (hidróxido de sódio 15%). A cura do material em temperatura ambiente foi considerada ideal e o agregado não inflamável preparado com a silicomanganês, apresentou boas propriedades. A granulação do ativador

sólido apresentou maior eficiência que o ativador líquido.

Tatarani e Sangiorgi (2019) prepararam duas amostras de um ligante polimérico de concreto poroso de baixo impacto. Uma amostra foi produzida com 21 % agregados sintéticos artificiais em substituição dos agregados naturais, utilizando o pó de basalto residual com proporção de silicato de sódio e hidróxido de sódio (SS/SH=4), curados por 12h em 60°C na estufa. A presença do agregado sintético pode ter provocado um aumento da rigidez em temperaturas mais altas e nas mais baixas diminuiu.

Santos (2019) propôs um agregado sintético a partir de lama vermelha, sílica e argila para utilização desses agregados incorporados a massa de concreto. O processo de sinterização a 1300°C dos agregados apresentaram uma porosidade baixa, porém, não influenciou a interface cimento/agregado, permitindo uma boa aderência nesta região. A temperatura obtida entre 1200°C a 1300°C nas quais a fase mullita esteve presente em todos os corpos de prova, atribuiu aos agregados sintéticos maior resistência.

Teixeira *et al* (2020) analisou a inserção de agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) e metacaulim em concreto, equiparando as possíveis desvantagens do RCD como agregado. Com substituição parcial de metacaulim no cimento, obteve-se melhores propriedades macroestruturais em relação aos valores de referência e o emprego do RCD (substituição parcial) indicaram melhor resistência mecânica e absorção capilar.

Oliveira *et al* (2019), produziram um agregado sintético de argila calcinada com a incorporação de resíduo de vidro de embalagem à base de SiO₂, Na₂O e CaO, com o intuito de substituir britas para uso em concreto, os testes foram feitos com incorporações de 0 a 20% de vidro. Na temperatura de 1000 °C a massa contendo 20% de vidro apresentou a mesma resistência mecânica (200 MPa). Os resultados tecnológicos das argilas estudadas comprovam que é possível produzir agregado sintético a partir das argilas estudadas.

Mohammed *et al* (2021), utilizaram resíduos de construção e demolição (C&D) como agregado de concreto reciclado (RCA) alternativo ao natural, e concluíram que não apenas diminuí os problemas ambientais, mas também leva à conservação dos recursos naturais. Segundo os autores, o agregado leve sintetizado pelo método de colagem a frio pode ser aplicado com sucesso para fabricar um concreto leve de resistência moderada.

A presente pesquisa visa colaborar com o uso do geopolímeros na construção civil que tem se mostrado uma solução promissora e sustentável para suprir a demanda cada vez maior por materiais de construção, oferecendo características mecânicas com alta resistência e durabilidade, o que contribui para a construção de estruturas mais seguras e eficientes, visando uma indústria mais sustentável.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta unidade são apresentados os materiais e métodos usados na produção das pastas geopoliméricas, além dos procedimentos para caracterização dos materiais, definição das formulações, moldagem dos corpos de prova, análises e ensaios.

3.1 MATERIAIS

Para elaboração das pastas geopoliméricas, foram utilizados como matérias-primas o metacaulim, a escória de alto forno e a solução alcalina de hidróxido de sódio e silicato de sódio.

3.1.1 Metacaulim (MK)

Uma das matérias-primas utilizadas foi o metacaulim, como a principal fonte de silício e alumínio para obtenção das pastas geopoliméricas. O material foi obtido comercialmente na forma de caulim, fornecido pela empresa Vivace e está apresentado na figura 7. O processo de transformação de caulim para metacaulim, está descrito no ítem 3.2.1.

Figura 7 - Metacaulim, fonte de silício e alumínio.



Fonte: Autora, (2023).

3.1.2 Escória de Alto Forno (EAF)

O resíduo utilizado neste trabalho foi a escória de alto forno empregada como fonte de cálcio no geopolímero. A escória de alto forno foi adquirida comercialmente em forma granulada e o processo de cominuição foi realizado em laboratório conforme o ítem 3.2.2. A figura 8 demonstra a escória de alto forno.

Figura 8 - Escória de Alto Forno.



Fonte: Autora, (2023).

3.1.3 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio foi utilizado na preparação da solução alcalina ativadora, necessária para o processo de álcali-ativação. O hidróxido de sódio utilizado foi obtido comercialmente, sua embalagem contém 1000g do material, na forma de escamas, e sua composição possui 97,5% de pureza. A figura 9 apresenta o hidróxido de sódio usado no preparo da solução ativadora.

Figura 9 - Hidróxido de Sódio.



Fonte: Autora, (2023).

As características do hidróxido de sódio estão apresentadas na tabela 6, conforme especificações do fabricante.

Tabela 6 - Especificações do Hidróxido de Sódio.

Determinação	Especificação
Aparência	Escamas
Cor	Branco
Concentração Min.	97,5%
Carbonato de Sódio Máx.	0,6%
Cloreto de Sódio Máx.	0,03%

Fonte: Êxodo Científica

3.1.4 Silicato de Sódio

O silicato de Sódio contribui para o processo de geopolimerização, sendo uma fonte complementar de SiO_2 . A composição do silicato de sódio utilizado foi o comercial e é apresentado na figura 10. Com relação as especificações do material, as mesmas estão apresentadas na tabela 7, conforme informações do fabricante.

Figura 10: Silicato de Sódio.



Fonte: Autora, (2023)

Tabela 7- Especificações do Silicato de Sódio.

Determinação	Especificação
Aparência	Pó
Cor	Branco
Voláteis	0%
PH	11 - 13
Solubilidade em Água	Total
Na_2O	23 - 26%
SiO_2	56 - 60%

SiO ₂ /NaO ₂	2.8 – 2.4 %
------------------------------------	-------------

Fonte: Êxodo Científica

3.2 MÉTODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a produção das pastas geopoliméricas do estudo, foi necessário utilizar algumas etapas de beneficiamento térmico e mecânico das matérias-primas, como o caulim e a escória, afim de obter mudanças estruturais necessárias, nos referidos materiais, para que as reações geopoliméricas ocorressem.

3.2.1 Calcinação do Caulim

Para a calcinação do caulim foi utilizado um forno mufla da marca SOLIDSTEEL 16L, com capacidade de aquecimento de até 1200°C. O processo de calcinação ocorreu na temperatura de 850°C por um período de 2 h. A temperatura e o tempo empregados, foram com base nos estudos de Porto (2019). O material obtido através da calcinação do caulim é o metacaulim. A figura 11 apresenta o forno mufla utilizado para a exposição térmica e o cadinho incandescente logo após sua retirada.

Figura 11 – Obtenção do metacaulim. (a) em forno mufla; (b) cadinho incandescente.



(a)

(b)

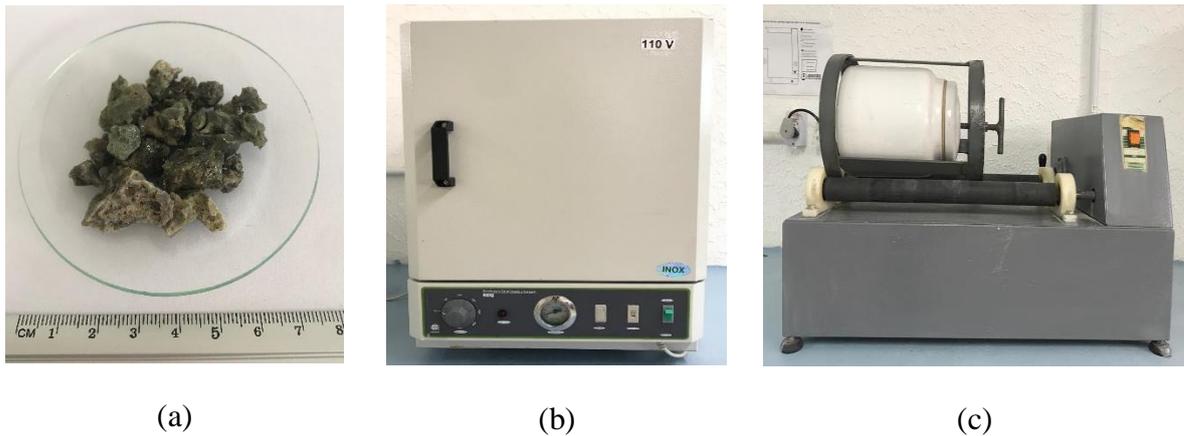
Fonte: Autora, (2023).

3.2.2 Beneficiamento da Escória de Alto Forno (EAF)

O beneficiamento da escória de alto forno, consistiu na secagem em estufa da marca

(STERILIFER), por 24 horas em temperatura controlada $100 \pm 5^\circ \text{C}$, após esse período, a escória passou por um processo de cominuição no moinho de jarro da marca (MARCONI). Para obter a granulometria desejada, foi usada a peneira de #200 mesh (abertura de $75 \mu\text{m}$). A figura 12 demonstra a escória antes de ser beneficiada, a estufa e o moinho de jarro utilizados para o processo de secagem e moagem da EAF.

Figura 12 - (a) EAF; (b) Estufa; (c) Moinho de jarro



Fonte: Autora, (2023).

3.2.3 Testes Físicos

Para o estudo físico dos materiais em pó, metacaulim e escória de alto forno, foi realizado os ensaios de índice de finura, perda ao fogo, teor de umidade e análise granulométrica, com o objetivo de determinar a massa e a granulometria de cada material.

3.2.3.1 Índice de Finura

Este ensaio é determinado pela norma ABNT NBR 11579 (2012) e tem como objetivo medir o percentual de massa do material retido em peneira com malha de $75 \mu\text{m}$ (200 mesh) através de peneiramento a seco pelo procedimento manual e mecânico. A figura 13 apresenta o equipamento e os materiais utilizados para a realização do ensaio.

Figura 13 - (a) Balança analítica; (b) peneira com fundo e tampa, vidro de relógio e pincel.



(a)

(b)

Fonte: Autora, (2023).

O índice de finura do material é calculado pela expressão:

$$IF = \frac{r \cdot Fc}{m} \times 100$$

Onde:

IF = índice de finura do cimento (%)

r = resíduo do cimento na peneira 75 μm (g)

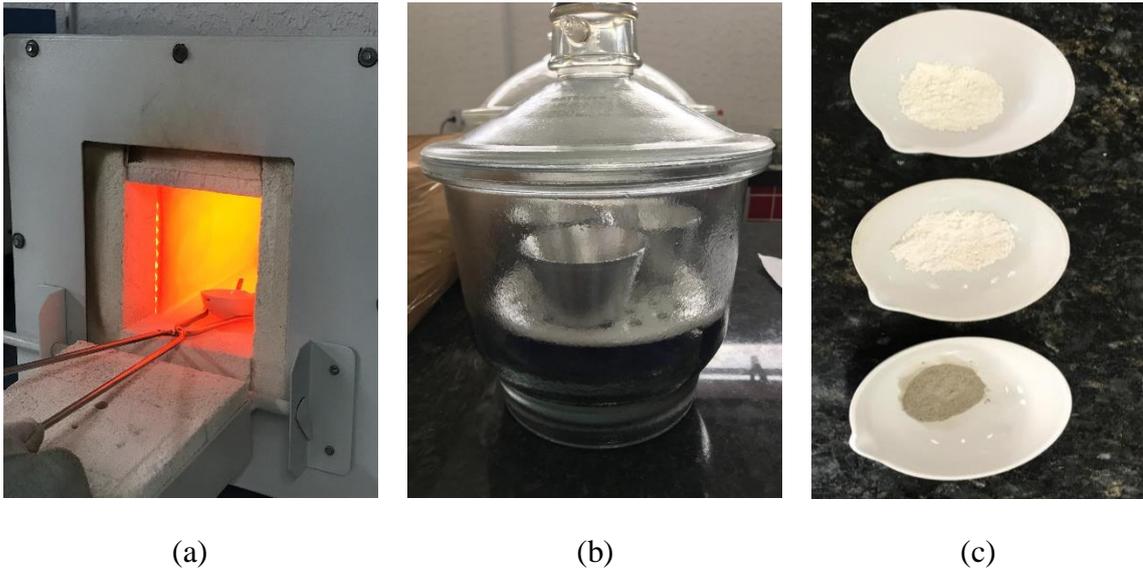
m = massa inicial do cimento (g)

Fc = fator de correção da peneira utilizada no ensaio, determinado de acordo com o disposto na ABNT NBR NM ISO 33101.

3.2.3.2 Perda ao Fogo

Este ensaio é determinado pela norma ABNT NBR NM18 (2012) Cimento Portland – Análise Química – Determinação de Perda ao Fogo. O método consistiu em pesar 1,00 g \pm 0,001g das amostras de (caulim, metacaulim e escória de alto forno), em seguida foi colocado em um cadinho de porcelana para calcinação em forno mufla à temperatura entre 950°C, por um período mínimo de 50 min. Após esse período, a amostra foi seca em dessecador e pesada. A figura 14 apresenta os cadinhos contendo as amostras de cada material.

Figura 14 - (a) Cadinho no forno mufla; (b) Dessecador; (c) Cadinho com caulim, metacaulim e escória granulada de alto forno.



Fonte: Autora, (2023).

O cálculo de perda ao fogo em porcentagem é expresso através de fórmula abaixo:

$$\frac{PC}{PF} = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100$$

Onde:

m_1 é massa do cadinho mais a massa de amostra ensaiada, em gramas;

m_2 é a massa do cadinho mais a amostra, após a calcinação, em gramas;

m é a massa de amostra utilizada no ensaio, em gramas;

Segundo a NBR, a perda ao fogo deve ser menor que 4%.

3.2.3.3 Teor de Umidade

Este ensaio é determinado pela norma ABNT NBR 6457 (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Determinação do teor de umidade de solos.

O cálculo para definir o teor de umidade é apresentado através da equação abaixo:

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

Onde:

W é o teor de umidade, expresso em porcentagem (%),

M_1 é a massa do solo úmido mais a massa do recipiente, expressa em gramas;

M_2 é a massa do solo seco mais a massa do recipiente, expressa em gramas;

M_3 é a massa do recipiente, expressa em gramas;

A ABNT NBR NM 18 estabelece que o resultado final do teor de umidade será a média de três determinações com aproximação de 0,1%. A figura 15 demonstra os procedimentos usados para o ensaio de teor de umidade.

Figura 15 - Teor de Umidade (a) Estufa com as cápsulas metálicas; (b) Dessecador.



(a)



(b)

Fonte: Autora, (2023).

3.2.3.4 Análise Granulométrica dos Pós

O estudo de granulometria dos materiais em pó (caulim, metacaulim e escória de alto forno) foi realizado através de adaptação na norma ABNT NBR 17054/2022. Os materiais foram submetidos a uma sequência de peneiramento de acordo com a norma. Foi utilizado o agitador mecânico e a série de peneiras, como demonstrada na figura 16.

Figura 16 - Agitador Mecânico e Série de Peneiras



Fonte: Autora, (2023).

No agitador mecânico, o caulim e o metacaulim foram peneirados por 10 minutos à 80 HZ, com a série de peneiras correspondente a 50#, 80#, 100#, e 200# mesh. Já a EAF foi peneirada durante um período de 15 min à 80 HZ com a série de peneira de 4#, 8#, 10#, 50#, 80#, 100#, 200# mesh.

3.1.1 Análises Microestruturais

Para verificar a morfologia dos materiais em estudo, foram realizadas análises mineralógicas, de caracterização por Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.1.2 Difratometria de Raios-X (DRX)

Através da técnica de difração de raios-x, foram identificados os minerais e suas composições mineralógicas, com a identificação de fases minerais presentes no caulim, metacaulim e escória de alto forno. As análises foram realizadas na cidade de Marabá/PA em difratômetro Shimadzu, modelo XRD- 7000 com tubo metálico de cobre, ângulo de varredura de 10 a 120° e passo de 0,02 s⁻¹. Para identificação das fases minerais nas amostras, foi utilizado o software X'pert High Score Plus, da empresa Panalytical. A figura 17 apresenta o difratômetro de raios-x.

Figura 17 - Difratorômetro de Raios-X.



Fonte: Silva, (2009).

3.1.3 Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As amostras foram analisadas através de um espectrômetro Thermo Electron, modelo Nicolet S10 do Laboratório de Espectroscopia de Infravermelho da Universidade Federal do Pará. As matérias-primas analisadas foram o caulim, metacaulim e a escória de alto forno. O equipamento realizou a varredura espectral de infravermelho médio das amostras, com 32 varreduras ao longo do intervalo de números de onda de 4000 a 400 cm^{-1} resolução de 4 cm^{-1} .

3.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises micrográficas do material foram efetuadas nas superfícies das amostras após a fratura dos ensaios mecânicos das pastas geopoliméricas e nos pós do caulim, metacaulim e escória de alto forno. As imagens foram realizadas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio, utilizando um microscópio eletrônico da marca TESCAN, modelo Mira3, equipado com EDS da marca OXFORD INSTRUMENTS X-MANN, de acordo com a figura 18.

Figura 18 - Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Autora, (2023)

3.1.5 Dosagem das Pastas Geopoliméricas (PG)

A produção das pastas teve como base o estudo de Porto (2019), que produziu os corpos de prova nos percentuais de (0%, 35%, 45%, 55%) e obteve a melhor composição de EAF em 45% com resistência a compressão de 37 MPa.

O presente estudo desenvolveu pastas com variação em percentual de escória de alto forno entre 0%, 10%, 20%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% e 60%, com o objetivo de alcançar altas resistências quando comparadas com os valores teóricos encontrados na literatura, estudos científicos e normas. A concentração alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) utilizada para o desenvolvimento das pastas foi de 7 molar.

Ainda com o objetivo de aumentar a resistência das pasta geopolimérica, foi realizado estudo de concentração alcalina dissolvendo as pastilhas de hidróxido de sódio em solução aquosa, para produzir soluções de 6, 8, 10, 12, 14 e 18 molar.

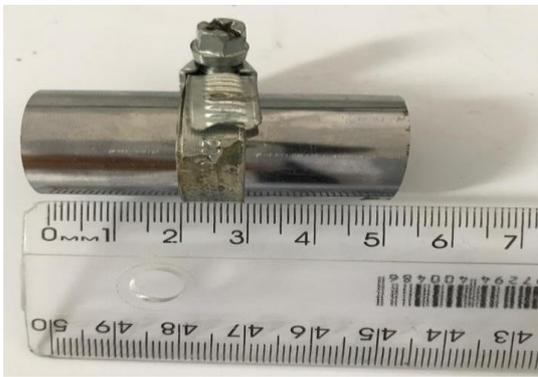
A confecção das pastas foi de acordo com a relação de proporção entre metacaulim/escória de alto forno e adição da solução alcalina. O método de mistura desses materiais, seguiu com a adição da solução alcalina, em um misturador elétrico, seguido do material em pó e misturado por 3 minutos, depois foram dispostos nos moldes. A pasta geopolimérica foi preparada em um misturador elétrico no Laboratório de Práticas Tecnológicas da UFPA (Ananindeua), para posterior ensaios de caracterização mecânica e análise microestrutural.

3.1.6 Moldagem dos Corpos de Prova (CP's)

3.1.6.1 Molde cilíndrico para Pasta Geopolimérica

A partir da obtenção das pastas geopoliméricas, foram moldados 5 (cinco) corpos de prova (CP's) cilíndricos, com dimensões de 2,5x5 cm de comprimento, para a determinação da resistência a compressão, segundo a NBR 5738 (2016). Após o período de 24 horas dos CP's nos moldes, os mesmos foram desmoldados e ficaram 7 dias em cura à temperatura ambiente. A figura 19, apresenta os moldes metálicos e os corpos de prova produzidos.

Figura 19 - (a) Molde metálico; (b) Base de apoio para os moldes; (c,d) Corpos de prova após 7 dias de cura;



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora, (2023)

3.1.6.2 Molde cúbico para Pasta Geopolimérica

De acordo com a ABNT NBR 15845-5 (2015) que determina a resistência a compressão uniaxial em rochas para revestimento, foram moldados 5 (cinco) corpos de prova nas dimensões de (5x5) cm de comprimento, apresentado na figura 20.

Figura 20 - Molde cúbico preenchido com pasta geopolimérica.



Fonte: Autora, (2023)

Os corpos de prova ficaram por um período de 24 horas nos moldes e foram desmoldados, o ensaio de resistência a compressão ocorreu após 7 dias, conforme a figura 21.

Figura 21 - Corpo de prova cúbico pronto para ser ensaiado.



Fonte: Autora, (2023)

3.1.7 Ensaio de Compressão Uniaxial

Os corpos de prova foram ensaiados no laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, normatizado pela ABNT NBR 5739 (2018) para a determinação da resistência a compressão. Todos os ensaios foram realizados em prensa hidráulica elétrica da marca Contenco com capacidade de carga máxima de 100 toneladas. A Figura 22 demonstra a máquina de ensaio universal que foi utilizada.

Figura 22 - (a) Máquina de Ensaio Universal; (b) CP ($\varnothing 2,5 \times 5$) após rompimento



Fonte: Autora, (2023).

3.1.8 Produção do Agregado Sintético Geopolimérico (ASG)

A produção do agregado sintético geopolimérico, visa reduzir a necessidade de extração dos recursos naturais que são utilizados na construção civil, como os materiais de origens rochosas, que após o processo de britagem tornam-se um agregado. Os resíduos de escória de alto forno utilizados para a confecção do ASG, contribuem com a destinação ambientalmente adequada. Os agregados apresentam diversos usos dentro da engenharia como na produção de concretos e argamassas, são elementos essenciais (GU *et al*, 2021; XING *et al*, 2021; WU *et al*, 2019).

Para a obtenção dos agregados sintéticos geopoliméricos, foi realizado o rompimento dos corpos de prova da pasta geopolimérica. Este procedimento ocorreu no laboratório de Tratamento de Minérios do Instituto Federal do Pará (Campus Belém), a ruptura dos corpos de prova foi efetuada utilizando um britador de mandíbula primário, reduzindo a granulometria do material, conforme ilustra a figura 23.

Figura 23 - (a) Britador para ruptura dos agregados geopoliméricos; (b) Agregados após processo de britagem; (c) agregado pronto para uso, na graduação zero.



Fonte: Autora, (2023).

Com o intuito de alcançar a granulometria desejável para o estudo, após o rompimento dos CP's o material foi agitado e peneirado no agitador mecânico, juntamente com as séries de peneiras #120 mesh (abertura de $4,8 \mu\text{m}$) para obtenção dos agregados, conforme ilustra a figura 16 do ítem 3.2.3.4. O agregado sintético geopolimérico foi classificado como de graduação zero, de acordo com a NBR 7211 (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TESTES FÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caulim

4.1.1.1 Perda ao Fogo

A tabela 8 apresenta os resultados de perda ao fogo do caulim em percentuais de 13%, superior as outras matérias-primas. O alto conteúdo de perda ao fogo do caulim é proveniente dos grupos de hidroxilas presentes no material.

Tabela 8 - Perda ao Fogo do Caulim.

Perda ao Fogo do Caulim				
Massa Cadinho	M	M1	M2	Resultado
31,72g	1g	32,72g	32,59g	13%

Fonte: Autora, (2023).

Segundo a literatura, os percentuais de perda ao fogo estão relacionados a presença de matéria orgânica nos caulins e também a perda de água que ocorre durante o processo de secagem e queima.

Junior (2018) relata em seus estudos valores de perda ao fogo em torno de 11,8%. Negrão (2016), encontrou em seus estudos valores de 4,48%, para amostras calcinadas a temperatura de 950C°. Os dois autores afirmam que os valores estão relacionados a perda de água do material. Já Petterle *et al* (2018), demonstra em seus estudos que o caulim apresenta perda ao fogo de aproximadamente 8,63%, provavelmente pela presença de compostos orgânicos. Assim, diante dos resultados encontrados na literatura, pode-se considerar que a perda ao fogo de 13% encontrado no estudo é considerada significativa devido a grande eliminação água de hidroxilas dos argilominerais.

4.1.1.2 Teor de Umidade

Para alcançar o teor de umidade do caulim, foi realizado o ensaio para três amostras do material, os valores estão apresentados conforme a tabela 9.

Tabela 9 - Teor de Umidade do Caulim

Teor de Umidade do Caulim				
Caulim (g)	M ₃	M ₁	M ₂	Teor de Umidade
30	20,49g	50,49g	50,15g	1,14%
30	20,14g	50,14g	49,82g	1,11%
30	20,04g	50,04g	49,71g	1,11%
Média	20,22g	50,22g	49,89g	1,12%

Fonte: Autora, (2023)

O caulim apresentou teor de umidade igual a 1,12% , resultado superior em relação ao teor de umidade das outras matérias-primas. Santana (2022), afirma que o caulim para obedecer à legislação atualmente vigente no Brasil, deve apresentar um teor de umidade inferior a 5%. Com isso, a etapa de secagem deve ser executada de modo eficiente e ser economicamente viável para contribuir na promoção do desenvolvimento sustentável, além de garantir um produto final com elevado padrão de qualidade. Com base neste estudo, o resultado do ensaio se apresentou satisfatório, indicando um percentual de 1,12%.

4.1.1.3 Granulometria

A tabela 10 apresenta os resultados encontrados do módulo de finura e diâmetro característico do caulim usado no estudo. Na figura 24 é apresentada a curva granulométrica característica do referido material.

Tabela 10- Análise Granulométrica do Caulim

Análise Granulométrica do Caulim				
ATSM	ABERTURA (mm)	MASSA (g)	RETIDA (%)	ACUMULADA (%)
50	0,297	2	2,0%	2,0%
80	0,177	6	6,0%	8,0%
100	0,149	14	14,0%	22,0%
200	0,074	28	28,0%	50,0%
Fundo	-	50	50,0%	100,0%
Módulo de Finura			0,01	
Diâmetro Máximo Característico			0,30	

Fonte: Autora, 2023.

A distribuição granulométrica do caulim passante na malha 200 mesh foi de 50%, com o percentual de 28% retido. O material passante, apresentou módulo de finura de 0,01 e diâmetro máximo característico de 0,3 mm. Com relação a curva granulométrica, os valores encontrados apresentam características de distribuição de partículas dentro dos limites mínimos e máximos. O caulim apresentou porcentagem retida acumulada de 2% em massa, inferior ao 5%,

como estabelece a norma.

Figura 24 - Curva granulométrica do Caulim



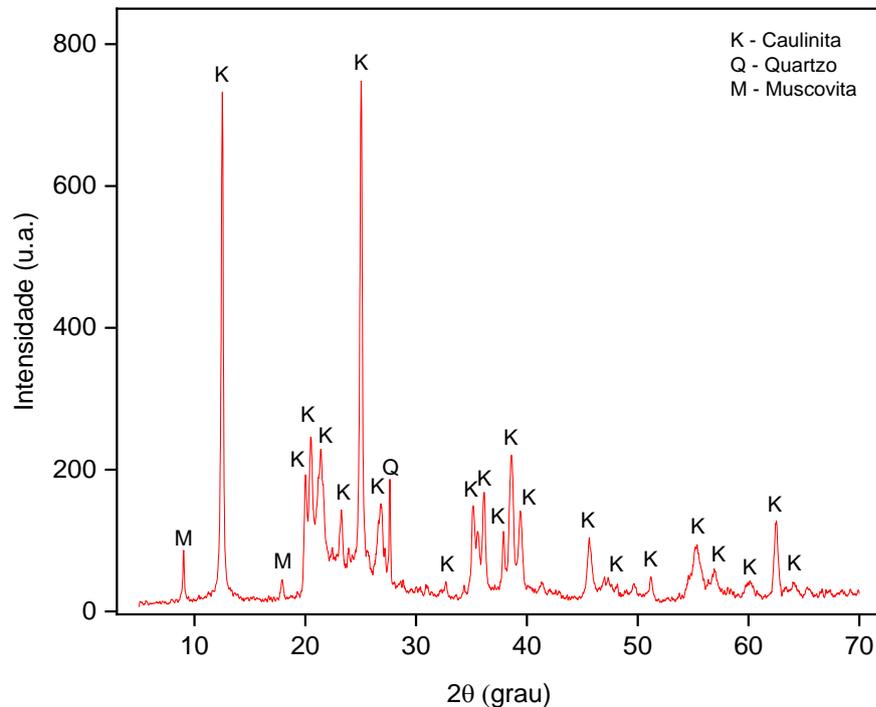
Fonte: Autora, 2023

4.1.1.4 Difratomia de Raios-X (DRX)

De acordo com Silva (2019) a caulinita é principal constituinte do caulim que normalmente ocorre associada a outros minerais sob a forma de impurezas (quartzo, mica, feldspatos e óxidos de Fe e Ti), é responsável pela plasticidade e apresenta comportamento de queima refratário. O quartzo seria a principal impureza presente nos argilominerais, atuando como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima. A muscovita é um mineral que pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos como K_2O , desde que apresente tamanho de partícula reduzido (ROUABHIA *et al*, 2018).

O difratograma da figura 25, demonstra o caulim usado no trabalho, onde pode-se observar os picos de difração correspondente a estrutura cristalina da argila. Como a intensidade do pico é diretamente proporcional à concentração das espécies, conclui-se que a argila é formada predominantemente por caulinita e em menores quantidades por quartzo e mica, que são argilominerais (SILVA, 2019; FRIZZO, 2018; MEDEIROS, 2020).

Figura 25 - Difração de Raios-X do Caulim.



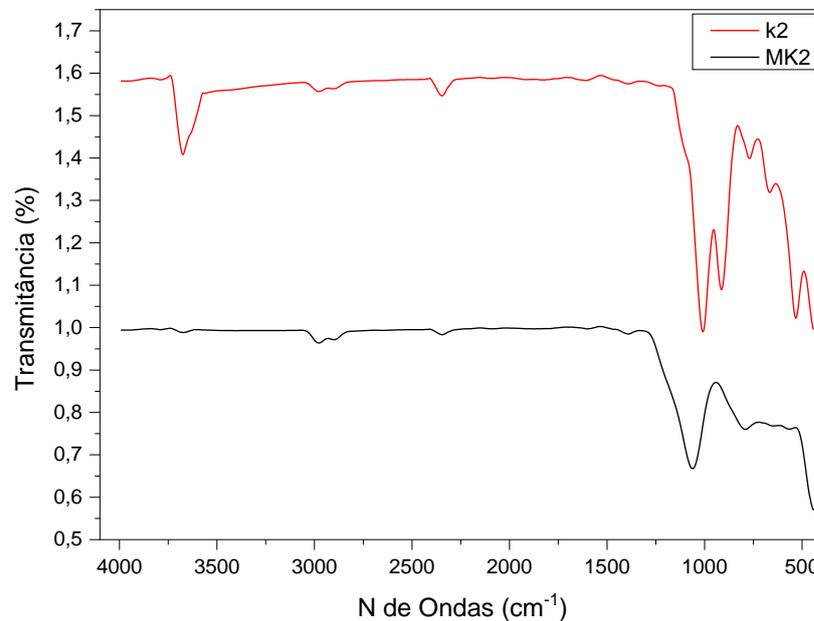
Fonte: Autora, (2023).

De acordo com os autores citados, as análises por difratometria de raios-x das amostras, apresentam picos característicos da caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e quartzo (SiO_2), e secundariamente picos da mica muscovita ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), demonstrando que o caulim é essencialmente caulinitico.

4.1.1.5 Espectroscopia do Infravermelho (FTIR) do Caulim e Metacaulim

A Figura 26 apresenta os espectros vibracionais na região do infravermelho, na faixa de $4000\text{-}500\text{ cm}^{-1}$, para as matérias-primas argilosas. Na região do espectro que compreende as absorções de água características da caulinita, as bandas em $3683\text{ a }3100\text{ cm}^{-1}$, são referentes a estiramentos da ligação OH. As bandas entre $1100\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ são referentes a vibração da ligação Si-O; em 910 cm^{-1} banda de deformação Al-OH. Em $800, 752\text{ e }530\text{ cm}^{-1}$ as bandas são atribuídas a vibração da ligação Si-O-Al e, a $693, 465\text{ e }425\text{ cm}^{-1}$ as bandas características da ligação Si-O. Ou seja, bandas referentes a estrutura da argila (SILVA *et al*, 2021).

Figura 26 - Espectroscopia do Infravermelho do Caulim (K2) e Metacaulim (MK2).



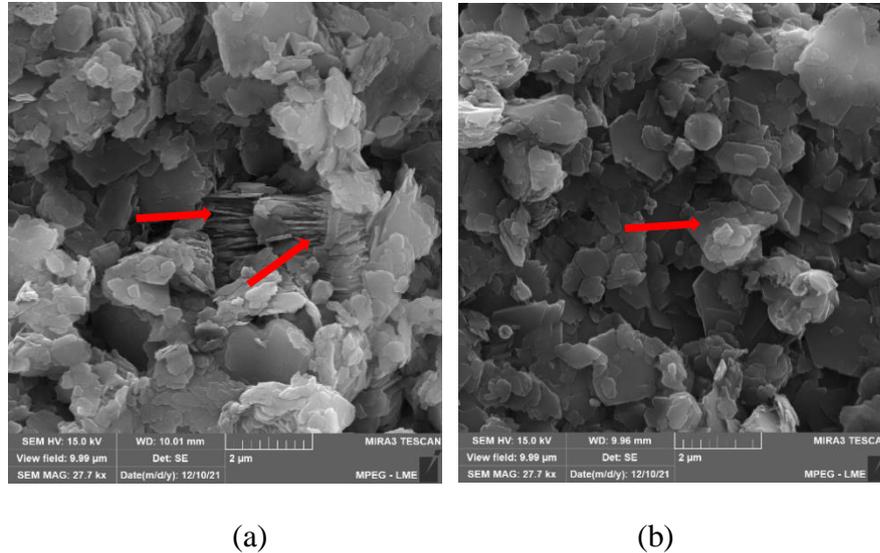
Fonte: Autora, (2023).

4.1.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As características microestruturais do caulim, como recebido, usado no trabalho foram avaliadas por MEV e são apresentadas na figura 27. A partir da análise morfológica da estrutura do caulim, a figura 27 (a) e (b) demonstra que o material sem tratamento térmico, constituíu-se em maior parte por partículas aglomeradas com empilhamento do tipo lamelas, característicos da caulinita.

Os estudos de Souza 1989 e Gonçalves e Maia 2018, confirmam a orientação marcante da caulinita, constituindo ao caulim uma espécie defoliação. A morfologia do material apresenta cristais com formato pseudo-hexagonal, confirmando a presença desse argilomineral em sua estrutura. A figura 27 (a) e (b), apresenta a micrografia da estrutura do caulim, com ampliações de 27.7 KX.

Figura 27 - MEV do Caulim a 25°C.



Fonte: Autora, (2023).

4.1.2 Metacaulim

4.1.2.1 Índice de Finura

Através de peneiramento manual e mecânico, foi possível obter o índice de finura do metacaulim. O ensaio iniciou com uma massa de 50g, o processo de peneiramento foi realizado oito vezes até se obter o valor passante de 0,04g e o valor retido na peneira de 2,5g. O resultado obtido do valor percentual em massa do metacaulim foi de 5%.

De acordo com a NBR 11579:2012, o valor obtido está dentro dos limites determinado pela norma, que estabelece um valor de percentual até $\leq 5\%$. A tabela 11, apresenta dos resultados do ensaio.

Tabela 11 - Resultados de finura do metacaulim

Finura			
Massa Inicial	Resíduo	Fator Correção	Finura
50,00g	2,5g	1	5%

Fonte: Autora, (2023).

De acordo com Rocha (2005), o metacaulim possui finura suficiente e reatividade química com o hidróxido de cálcio livre presente na pasta de cimento para proporcionar redução

da porosidade da pasta e conseqüentemente aumento de durabilidade através da melhoria de diversos parâmetros do concreto.

A NBR 15894-3:2010 - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm , exige limite de finura em porcentagem de metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta de $\leq 10\%$.

Para Ferreira (2017), a reatividade do metacaulim é influenciada diretamente pela sua finura, ou seja, sua superfície específica. Assim quanto maior for sua superfície específica maior será o teor de hidróxido de cálcio consumido na reação e maior será a reatividade e em conseqüência qualidade do concreto.

Os estudos de Dias (2018), afirmam que a finura do metacaulim, propicia o melhor empacotamento das partículas, resultando em uma composição coesa e com baixa presença de poros, impossibilitando assim, a penetração de composições químicas prejudiciais tanto ao concreto como à armadura da estrutura. Devido ao índice de finura dos grãos, minerais como o metacaulim, atuam diretamente no melhor empacotamento das partículas, originando um concreto mais coeso, com menor índice de vazios e mais durável.

4.1.2.2 *Perda ao Fogo*

Os resultados de perda ao fogo do metacaulim são apresentados na tabela 12. De acordo com o resultado, o metacaulim apresentou 1,2% de perda ao fogo. A normatização NM 18, estabelece que os parâmetros químicos de teor de perda ao fogo para o metacaulim deverá ser inferior $\leq 4,0\%$ para garantir que a matéria-prima foi calcinada adequadamente. Esse parâmetro fornecido pela norma, confirma que os resultados obtidos estão dentro dos padrões.

Tabela 12 - Perda ao Fogo do Metacaulim.

Perda ao Fogo do Metacaulim				
Massa Cadinho	M	M1	M2	Resultado
36,59g	1g	37,59g	37,58g	1,2%

Fonte: Autora, (2023).

Para o autor Eleutério (2018), que afirma que obteve na composição do metacaulim baixa perda ao fogo e a proporção molar referente a $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,64$, o resultado pode ser um indicativo da presença de matéria orgânica e afirma que a presença de matéria orgânica é prejudicial às propriedades do geopolímero, especialmente à resistência mecânica.

A diminuição do tamanho médio da partícula pode ter origem durante a queima, onde

as partículas à altas temperaturas perderam massa, ou seja, uma perda ao fogo acentuada, e consequentemente mudança na massa específica e área (MEDINA, 2011).

4.1.2.3 Teor de Umidade

Os resultados do ensaio de teor de umidade para o metacaulim estão ilustrados na tabela 13, que apresenta uma média percentual de 0,08% para três amostras. O caulim apresentou um teor de umidade de apenas 1,13%, superior em relação às outras matérias-primas. Isso também fortalece o resultado da perda ao fogo.

Tabela 13 - Teor de Umidade do Metacaulim.

Teor de Umidade do Metacaulim				
Massa do Cadinho	M ₃	M ₁	M ₂	Teor de Umidade
30,00g	20,93g	50,93g	50,90g	0,08%
30,00g	19,42g	49,42g	49,39g	0,08%
30,00g	19,80g	49,80g	49,78g	0,08%
Média	20,05g	50,05g	50,02g	0,08%

Fonte: Autora, (2023).

Eleutério (2018), aferiu a umidade dos materiais por diferença de massa antes e após 24h em estufa a 50 °C e obteve 0,5% de teor de umidade. Os dados de umidade são fundamentais para a formulação dos geopolímeros, haja vista a importância da relação sólido/líquido. A trabalhabilidade da pasta é diretamente influenciada pela facilidade com que ela interage com a água dos ativadores e a água adicionada, tendo relação direta também com o tamanho de partícula. O resultado alcançado para o teor de umidade do metacaulim, teve percentuais próximos ao de Eleutério (2018).

4.1.2.4 Granulometria

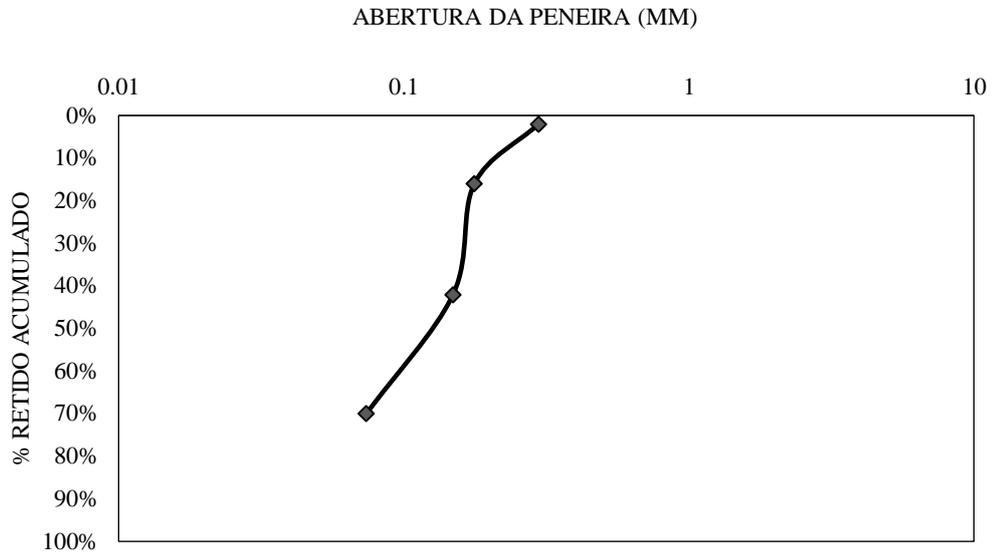
A distribuição granulométrica do metacaulim é mostradas na tabela 14 e a figura 28 representa a curva de distribuição granulométrica obtida.

Tabela 14 - Análise Granulométrica do Metacaulim

Análise Granulométrica do Metacaulim				
ASTM	ABERTURA (mm)	MASSA (g)	RETIDA (%)	ACUMULADA (%)
50	0,297	2	2,0%	2,0%
80	0,177	14	14,0%	16,0%
100	0,149	26	26,0%	42,0%
200	0,074	28	28,0%	70,0%
Fundo	-	30	30,0%	100,0%
	Módulo de finura		0,01	
	Diâmetro máximo característico (mm)		0,3	

Fonte: Autora, 2023.

Figura 28 - Curva granulométrica do Metacaulim



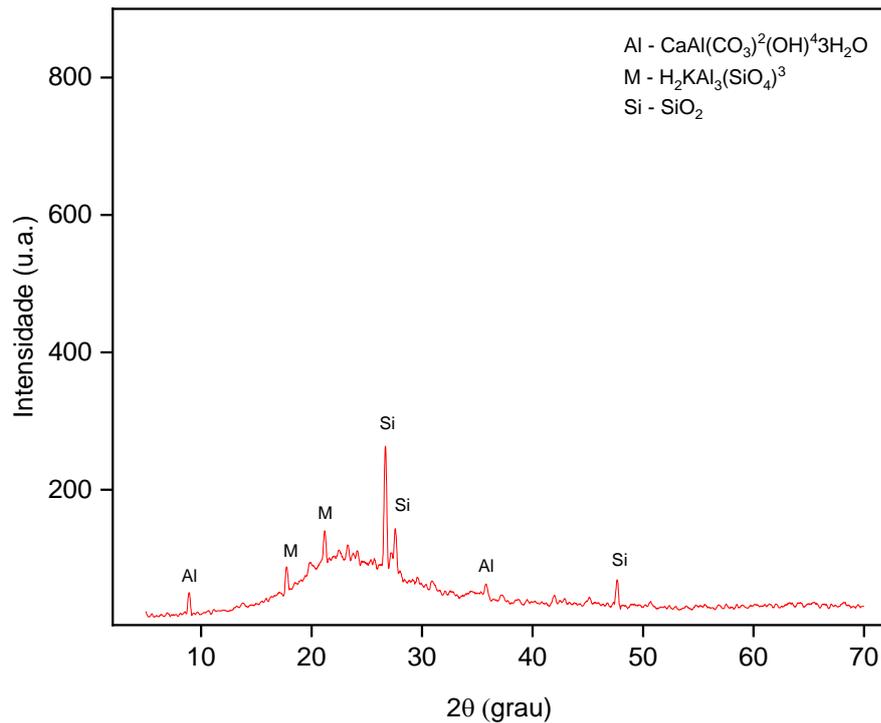
Fonte: Autora, 2023.

O metacaulim apresentou distribuição granulométrica uniforme. Observa-se que 30 % das partículas apresentam o módulo de finura a 0,01. O passante na peneira com malha de 200 mesh foi inferior ao caulim com 30%. O metacaulim utilizado apresentou distribuição granulométrica adequada para obtenção das pastas geopoliméricas com porcentagem retida acumulada de 2% em massa, inferior ao 5%, como estabelece a norma.

4.1.2.5 Difratomia de Raios-X (DRX)

Através dos estudos de Lucas (2021) e Porto (2019), as análise mineralógica por Difração de Raios-X do metacaulim, demonstrou de acordo com a figura 29, que não houve a presença de picos intensos a $2\theta \approx 12,5^\circ$, indicado pelo círculo na figura, percebe-se a perda de cristalinidade e a ausência de picos da caulinita, característicos do metacaulim. Nessa temperatura, observa-se a estrutura da caulinita de forma irregular e desordenada, indicando um material com estrutura predominantemente amorfa.

Figura 29 - Difratomia do Metacaulim.



Fonte: Autora, (2023).

O difratograma do metacaulim, após o processo de calcinação a $850^\circ\text{C}/2\text{h}$ mostra a total transformação de caulinita em metacaulinita, isso devido ao rompimento completo da estrutura cristalina. Com a calcinação, os picos característicos da caulinita sofreram uma perda na intensidade, resultante da remoção dos grupos hidroxila presentes nas folhas octaédricas da caulinita (GONÇALVES, 2018).

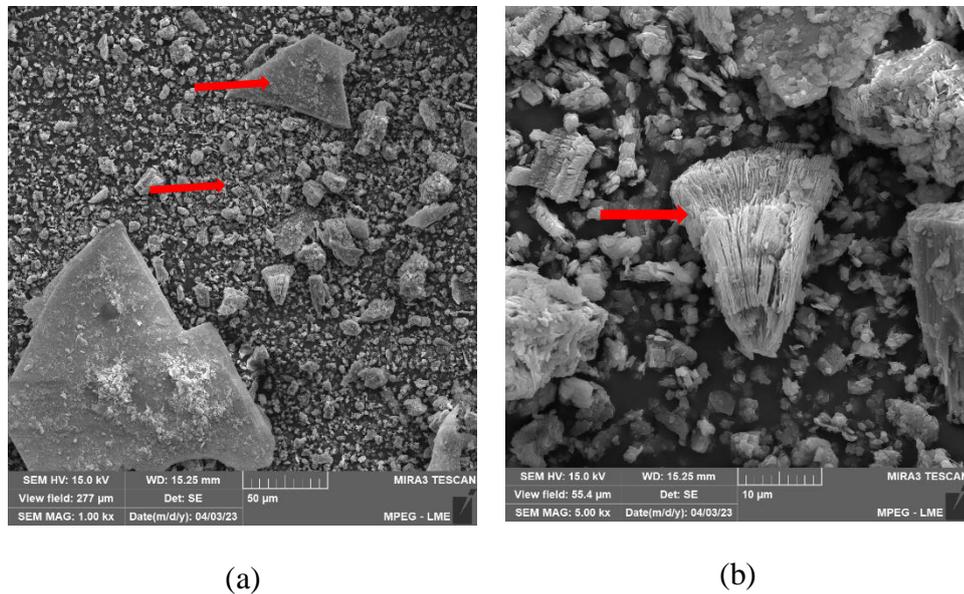
Conforme os resultados apresentado no DRX é possível comprovar que a calcinação ocorreu de forma eficiente, promovendo o processo de geopolimerização, quando o material metacaulim receber o ativador alcalino.

4.1.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A partir da análise morfológica do metacaulim na figura 30 (a) e (b), pôde-se observar que o metacaulim apresentou superfície lisa e formatos variáveis, ocorrendo também aglomeração das partículas individuais, em que as partículas menores se dispuseram em menor quantidade.

De acordo com os estudos de Santa (2016), a microscopia do metacaulim demonstrou que a estrutura das partículas do metacaulim é majoritariamente desorganizada devido à desidroxilação do caulim, não sendo possível observar as folhas tetraédricas e octaédricas características da caulinita in natura.

Figura 30 - MEV do Metacaulim



Fonte: Autora, (2023).

4.1.3 Escória de Alto Forno

4.1.3.1 Índice de Finura

O ensaio para determinação do índice de finura para a escória de alto forno, foi realizado com uma massa inicial de 50g. As etapas do processo de peneiramento foram executadas quinze vezes até se obter o valor passante de 0,03g e valor retido de 0,34g. O valor percentual em massa de escória de alto forno foi de 0,68%, de acordo com a tabela 15.

Tabela15 - Resultados de finura da escória de alto forno

Finura da EAF			
Massa Inicial(g)	Resíduo(g)	Fator Correção	Finura(%)
50,00	0,34	1	0,68%

Fonte: Autora, (2023).

De acordo com os estudos de Pimentel (2019), que analisou o índice de finura da EAF conforme a NBR 11579 (ABNT 2012), para verificar o tempo de moagem ideal dos materiais a serem utilizados nos seus experimentos e definir o melhor índice de finura, o resultado do estudo mostrou que o índice de finura da escória após 5 horas de moagem, apresentava um valor de em percentual em massa de EAF de 9,56%.

O resultado do estudo demonstrou um percentual muito abaixo dos valores encontrados na literatura, pois o processo de beneficiamento da escória de alto forno envolveu as etapas de moagem e peneiramento, contribuindo para um menor índice de finura.

4.1.3.2 Perda ao fogo

A tabela 16 apresenta o resultado do teste da escória de alto forno com percentual significativo de 0,79%. A literatura apresenta resultados diversificados para esse ensaio. Ju *et al* (2020), trouxe resultados próximos de 0,75%. Já (DAVE, SAHU e MISRA, 2020), apresentou resultados de 1,5%.

Tabela 16 - Perda ao Fogo da EAF.

Perda ao Fogo da EAF				
Massa Cadinho	M	M1	M2	Resultado
32,81g	1g	33,81g	33,80g	0,79%

Fonte: Autora, (2023).

PAGIO *et al* (2022), seguiu a normatização NBR NM 18 para o ensaio de perda ao fogo, para escória granulada de alto forno (EGAF) e escória de alto forno resfriada a ar (EAFRA), as amostras calcinaram em forno mufla com temperatura de 1.000 °C, e em seguida foram pesadas para verificação da perda de massa por calcinação. O resultado obtido para EGAF foi de 0% e de 4,2% para EAFRA.

O resultado do estudo sugere que a escória de alto forno por se tratar de um resíduo, possui baixa quantidade de água na sua composição e apresentou resultados próximos aos valores encontrados na literatura.

4.1.3.3 Teor de Umidade

A tabela 17 ilustra a média percentual encontrada para o teor de umidade da escória de alto forno para três amostras. O resultado obtido foi de 0,08%.

Tabela 17 - Teor de Umidade da EAF.

Teor de Umidade da EAF				
Massa do Cadinho	M ₃	M ₁	M ₂	w
30,00g	19,47g	49,47g	49,44g	0,08%
30,00g	20,16g	50,16g	50,14g	0,09%
30,00g	19,74g	49,74g	49,73g	0,08%
Média	19,79g	49,79g	49,77g	0,08%

Fonte: Autora, (2023).

A escória apresentou teor de umidade de 0,08% por se tratar de um resíduo de minério de ferro, os resultados de perda ao fogo demonstrando-se inferior ao caulim e ao metacaulim,. Sant'ana (2003) em seus estudos, encontrou resultados com um percentual de 0,05%. A escória de alto forno apresentou uma média semelhante aos resultado encontrados na literatura.

4.1.3.4 Granulometria

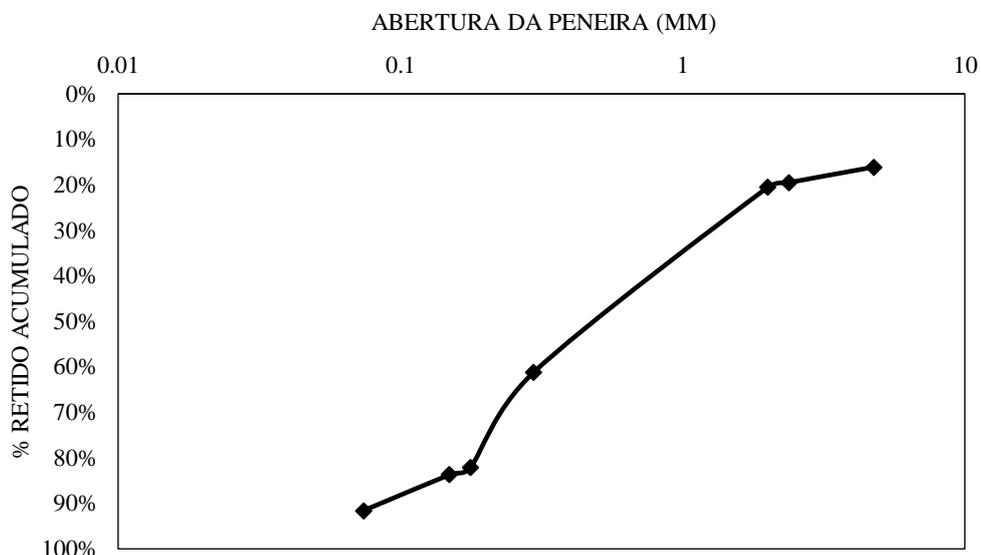
Quanto à granulometria da escória de alto forno utilizada, de acordo com o resultado da tabela 18, o módulo de finura apresentado foi de 0,04 com diâmetro característico de 2,00 (mm). A distribuição das partículas pôde ser observada na Figura 31.

Tabela 18 - Análise Granulométrica da Escória de Alto Forno.

Análise Granulométrica da Escória de Alto Forno				
ASTM	ABERTURA (mm)	MASSA (g)	RETIDA (%)	ACUMULADA (%)
4	4,75	180	16,10%	16,10%
8	2,38	38	3,40%	19,50%
10	2	12	1,07%	20,57%
50	0,297	454	40,61%	61,18%
80	0,177	234	20,93%	82,11%
100	0,149	18	1,61%	83,72%
200	0,074	88	7,87%	91,59%
Módulo de finura			0,04	
Diâmetro máximo característico (mm)			2,00	

Fonte: Autora, 2023.

Figura 31 - Curva Granulométrica da Escória de Alto Forno.



Fonte: Autora, 2023.

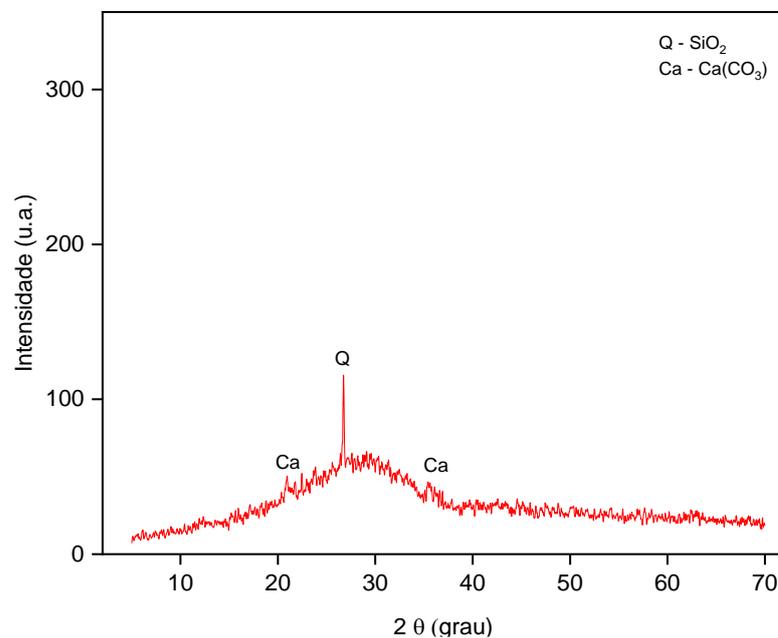
A escória de alto forno apresentou distribuição granulométrica uniforme superior aos pós de caulim e metacaulim. A escória apresentou material passante na peneira de 200 mesh de 8,41% e 7,87% retido. Os valores inferiores obtidos para as amostras de caulim e metacaulim justificam-se por conta do processo de peneiramento que a escória de alto forno passou.

4.1.3.5 Difractometria de Raios-X (DRX)

A composição mineralógica da escória de alto forno foi estudada através da difratometria de raios-x e apresenta de acordo com a figura 32, os picos de cristalinidade presentes de quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3). Verificou-se que o quartzo apresentou maior pico ascendente em relação a calcita (PIMENTEL, 2019).

De acordo com Porto (2019), o material encontra-se, em grande parte, em estado amorfo, por ser um resíduo proveniente do ferro gusa, o que indica que a sílica presente na escória é amorfa.

Figura 32 - Difração de Raios-X da Escória de Alto Forno.



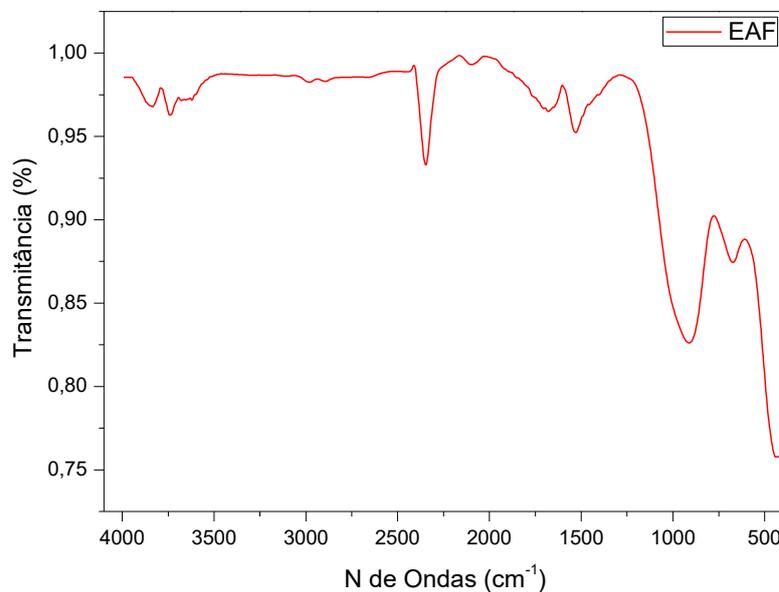
Fonte: Autora, (2023).

Com base nos estudo dos autores estudados, o pico de cálcio, influência no aumento de resistência a compressão do geopolímero. Os padrões de DRX da EAF apresentaram picos de exposição principal em 21° , $29,4^\circ$ e 46° , correspondente ao quartzo e calcita, respectivamente.

4.1.3.6 Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Com base nos espectros de FTIR das amostras de escória de alto forno, a figura 33 apresenta duas bandas com maximos em 1437 e 876 cm^{-1} , referente as vibrações da calcita (CaCO_3), comprovando que parte do calcio presente na escoria encontra-se carbonatado. Foram observadas duas bandas em 1424 e 874 cm^{-1} referentes a calcita. O resultado desta caracterização química esta de acordo com o DRX, o qual comprovou a presença de cálcio em diferentes fases, inclusive na fase calcita. O resultado se mostrou de acordo com a literatura, segundo Silva (2015) e confirmou-se a presença de cálcio na estrutura da escoria.

Figura 33 - Espectroscopia do Infravermelho da EAF.



Fonte: Autora, (2023).

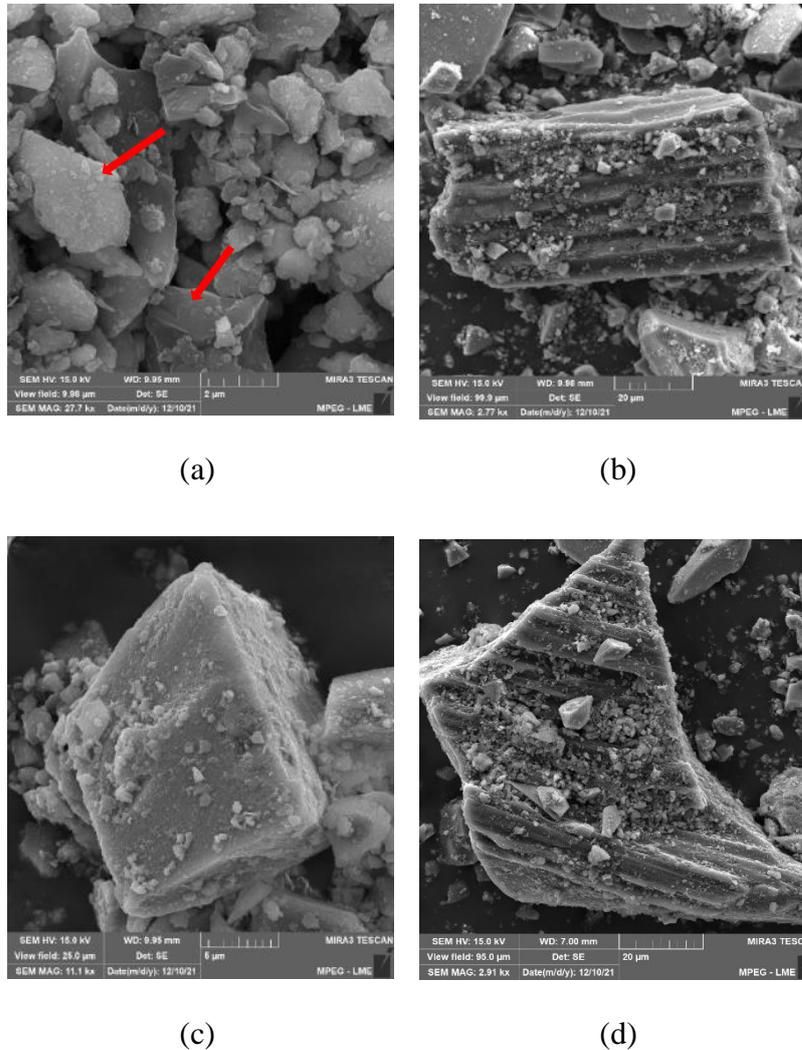
4.1.3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na micrografia da escória de alto forno da figura 34(a), verifica-se que o material é composto por partículas mais claras, possivelmente associadas ao quartzo, e partículas de coloração mais escuras que podem estar associadas ao ferro. Nas figuras 34(b), (c) e (d), é possível constatar que as partículas não apresentam um padrão morfológico, tendo as partículas formatos diferentes.

Com base nos estudos de Gonsalves (2018), é possível observar a partir das micrografias de EAF, conforme a figura 32, a morfologia homogênea com cristalitos de tamanhos semelhantes, com hábito hexagonal. Estes cristalitos estão aglomerados, mostrando uma

microporosidade. A figura 34 evidencia a morfologia da escória de alto forno nas ampliações de 27.7, 2.77, 11.1 e 2.91 KX respectivamente.

Figura 34 - MEV Escória de Alto Forno.



Fonte: Autora, (2023).

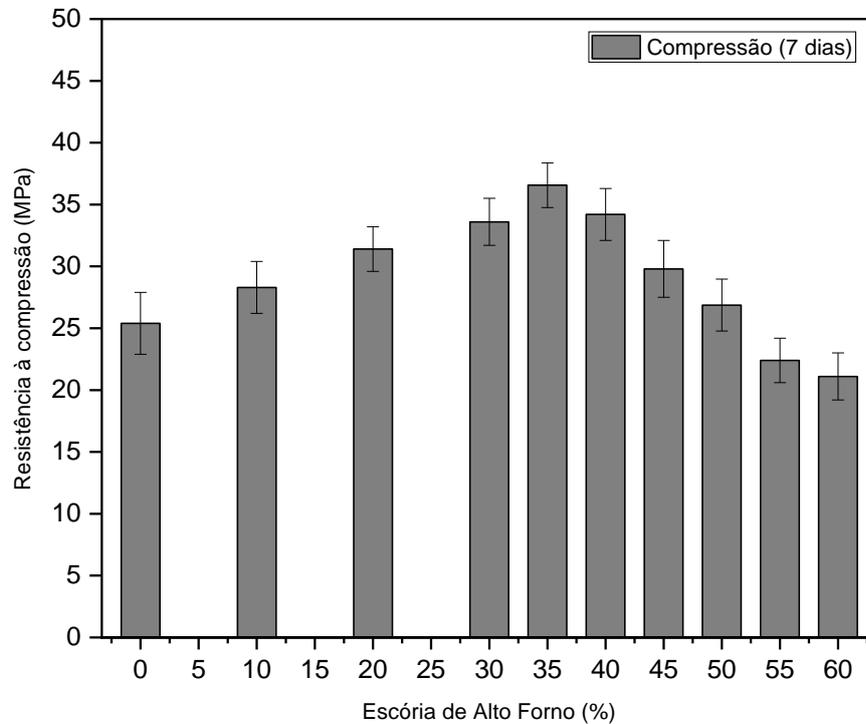
4.2 ESTUDOS PRELIMINARES DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS

4.2.1 Influência do Percentual de EAF na resistência a compressão

O estudo preliminar da pasta geopolimérica, foi realizado com variações de dosagens em percentuais de EAF de 0%, 10%, 20%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% e 60% como forma de pré-requisito para encontrar a melhor formulação. Na Figura 35, são apresentados os resultados de resistência à compressão dos corpos de provas (CP's) de pasta geopolimérica, com idade de

cura de 7 dias.

Figura 35: Estudo de resistência a compressão das pastas geopoliméricas com as variações em percentuais de EAF.



Fonte: Autora, (2023)

O gráfico da figura 35 ilustra a variação do percentual de escória de alto forno nas pastas geopoliméricas, apresentando resultados significativos na resistência mecânica. Nos percentuais entre 10% e 30%, observou-se um aumento na resistência em MPa, alcançando o melhor percentual em 35% de EAF com resistência de 36,56 MPa.

O material composto de 0% de EAF atingiu a resistência de 25,2 MPa, sendo esse o seu máximo alcançado, afirmando o estudo que a adição de escória de alto forno nas propriedades das pastas geopoliméricas, permite uma maior resistência mecânica dos corpos de prova. Ressalta-se também, que os percentuais acima de 40% de EAF, apresentaram uma redução na resistência mecânica.

Porto (2019), estudou a variação de escória de alto forno para produção de pasta geopolimérica nos percentuais de 0%, 35%, 45%, 55%, 60% e 65%, e encontrou o melhor percentual em 35% de EAF, atingindo uma resistência mecânica de 37 MPa. De acordo com a autora, a pasta geopolimérica com percentual de 0% de EAF, apresentou porosidade e partículas de metacaulim não reagido.

Com o objetivo de desenvolver um compósito cimentício que possa ser curado à

temperatura ambiente Peng *et al* (2019), utilizou pó de escória granulada de alto-forno moído incorporado ao metacaulim para a síntese de um geopolímero. Foi avaliado a influência da escória em proporções escória/metacaulim, ou seja, 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Quando a taxa de substituição da escória aumentou de 0% para 40%, a extensão da geopolimerização aumentou gradualmente. Isso deve ser atribuído à promoção da geopolimerização do metacaulim pelo comportamento exotérmico do processo de hidratação da escória.

A determinação do modo de ruptura dos CP's em estudo, pode ser identificado nos corpos de prova cilíndricos de ($\text{Ø}2,5 \times 5$) cm de comprimento, com percentual de 35% de EAF, conforme na figura 36(a), (b), (c) e (d) que apresentam o tipo de ruptura cisalhada lateral, podendo caracterizar que não houveram concentrações de tensões oriundas de falhas por moldagem.

A figura 36(e) caracteriza o tipo de ruptura colunar, que indica que pode ter havido influências no topo do corpo de prova durante o processo de preparação. O acabamento dos CP's ocorreu através de lixamento manual, o que pode ter influenciado no resultado.

Figura 36 - Corpo de prova com 35% EAF de ($\text{Ø}2,5 \times 5$) cm. (a),(b),(c) e (d) rompimento com ruptura cisalhada lateral; (e) rompimento com ruptura colunar.



(a)



(b)



(c)



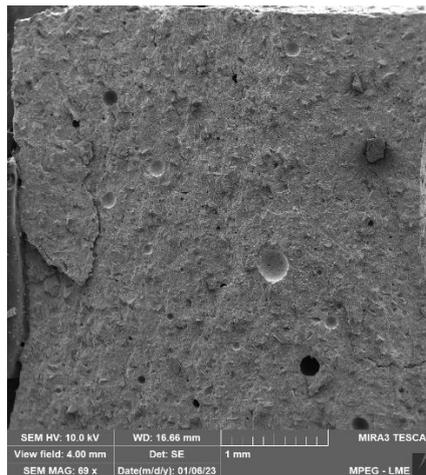
(d)

(e)

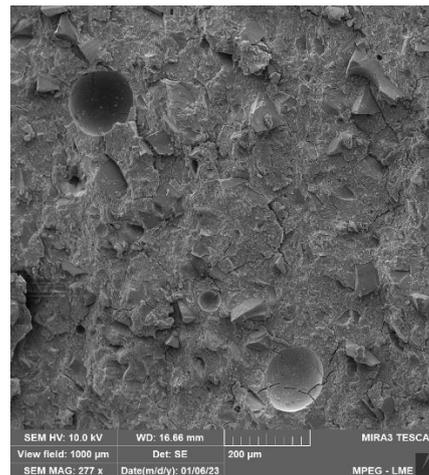
Fonte: Autora, (2023)

As figuras 37(a), (b), (c) e 38(a), (b), (c) apresentam as microestruturas das pastas geopoliméricas com percentual de EAF em 35% e 60%. As figuras 37(d) e 38(d) demonstram a análise por EDS com representação dos principais elementos químicos encontrados nas pasta geopolimérica. A figura 33 evidencia a morfologia da pasta, nas ampliações 69, 277 e 2700 X, e a figura 34 com ampliação de 69, 277 e 3000 X respectivamente.

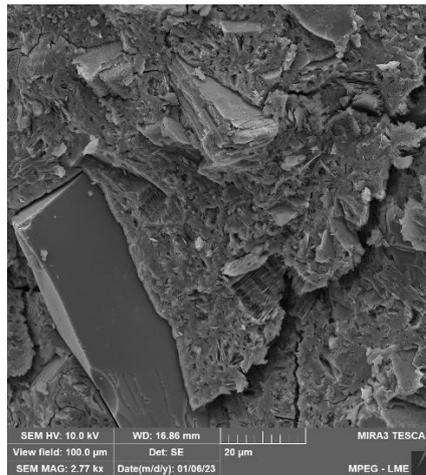
Figura 37 - Pasta Geopolimérica com 35% de EAF. (a) Aumento de 69X; (b) Aumento de 277X; (c) Aumento de 2700kx (d) Análise de EDS.



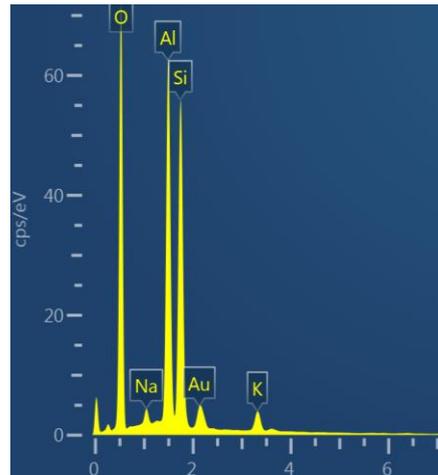
(a)



(b)



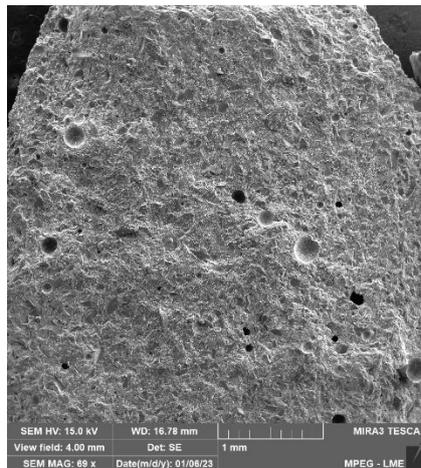
(c)



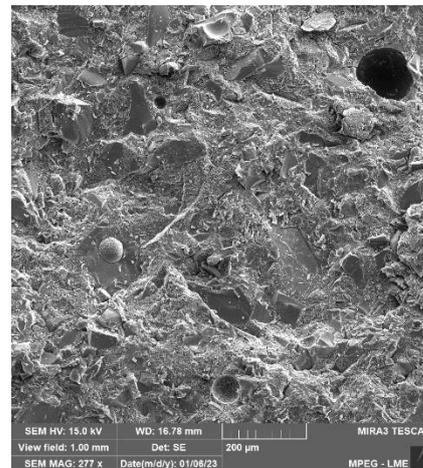
(d)

Fonte: Autora, (2023)

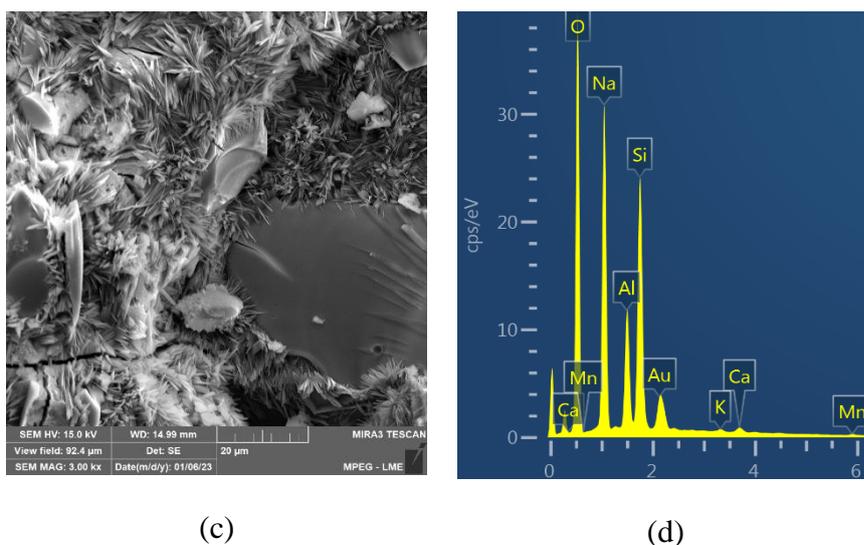
Figura 38 - Pasta Geopolimérica com 60% de EAF. (a) Aumento de 69X; (b) Aumento de 277X; (c) Aumento de 3000kx (d) Análise de EDS.



(a)



(b)



(c)

(d)

Fonte: Autora, (2023)

A partir da análise microestrutural da pasta geopolimérica com variação do percentual de EAF, a figura 37(a) apresentou uma superfície relativamente lisa e com a existência de vazios, que podem ter sido ocasionados por aprisionamento de ar. Na figura 37(b) foi identificado microfissuras na superfície do material ocorrido devido ao ensaio de compressão do CP. Há a presença de vazios na superfície do material e a presença de material não reagido. É possível observar na figura 37(c), uma estrutura em forma de lamelas ou folhas característico da caulinita, evidenciando a presença desse material na microestrutura, o que pode indicar que o processo de mistura não ocorreu de forma homogênea.

A análise de composição química por EDS na figura 37(d), identifica os elementos que estão presentes na amostra, sobressaindo os que tiveram os picos mais altos, como o alumínio, silício e oxigênio, esses elementos são exaltados como os principais, pois enfatizam a reação alumínio silicato no processo de geopolimerização. Outros elementos químicos também foram identificados, porém, com uma intensidade menor.

Em seu estudo Porto (2019), encontrou o melhor percentual de escória de alto forno em 45%. As análises por MEV apresentaram uma área superficial com pouca incidência de espaços vazios, quando comparada microestrutura com 0% de EAF. Peng *et al* (2019), afirmou que quando a taxa de substituição da escória é de 40%, uma boa microestrutura do geopolímero é formada.

Observando a micrografia da figura 38(a), com o aumento do percentual de EAF em 60%, nota-se a presença de rugosidade nas superfícies do material e o aumento de espaços vazios comparados a imagem 37(a). As figuras 38(b), (c) e (d) apresentam uma superfície com partículas de várias e formas e tamanhos, a maioria com formato hexagonal, indicando o

aumento de escória de alto forno presente na pasta.

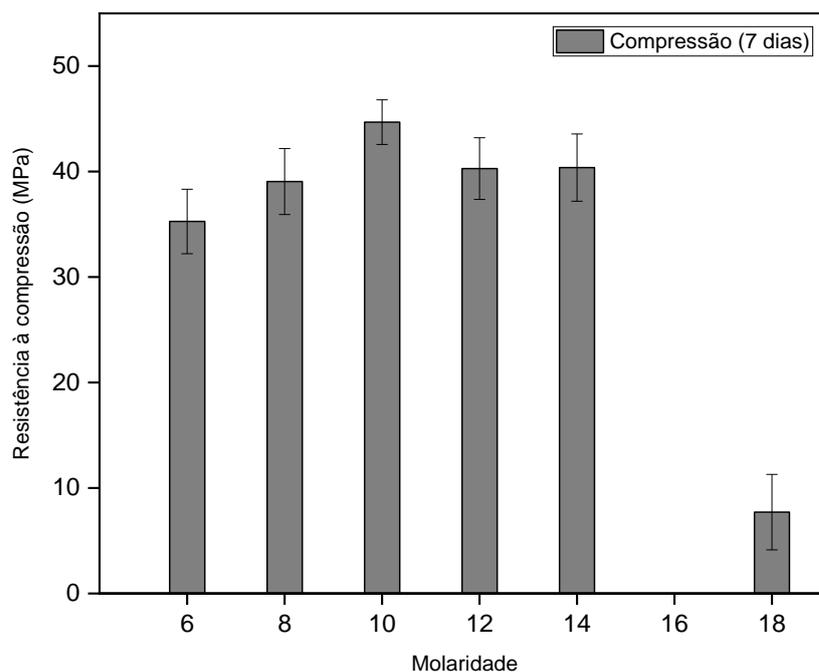
Analisando a composição química por EDS da figura 38(d), os elementos químicos que apresentaram os picos mais altos foram o silício, sódio e oxigênio. Além desses componentes, foram identificados vários outros elementos químicos considerados de baixo teor no material, e estão associados a escória de alto forno como elementos característicos da sua composição.

De acordo com Peng *et al* (2019), rachaduras foram observadas quando a taxa de substituição da escória é 60%. Quando a taxa de substituição da escória subiu para 80%, as trincas tornam-se mais proeminentes nos produtos da reação. A análise EDS também identifica um baixo teor de Na nos produtos da reação.

4.2.2 Influência da variação da molaridade na resistência a compressão

Com base no estudo de dosagem da escória de alto forno, foi encontrado o melhor percentual de EAF na pasta geopolimérica em 35%. A partir desse percentual, deu-se continuidade ao estudo de aprimoramento da pasta geopolimérica, com o objetivo de encontrar maiores resistências mecânicas. Foi realizado o estudo de concentração alcalina nas molaridades de 6, 8, 10, 14, e 18 molar. Na Figura 39, estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos corpos de provas com variações de molaridades de pasta geopolimérica, com idade de cura de 7 dias.

Figura 39 - Estudo de resistência a compressão com variação de molaridade.



Fonte: Autora, (2023)

Observa-se na figura 39, através do ensaio de resistência a compressão com variações de molaridade, que a partir do aumento de concentração alcalina NaOH de 6, 8 e 10 molares, apresentaram alta resistência a compressão, atingindo valores de 33,14, 39,05 e 44,79 MPa respectivamente. Os geopolímeros sintetizados com concentrações de NaOH superiores como 12, 14 e 18 molares, apresentaram baixa resistência a compressão entre 40,29, 40,02 e 4, 82 MPa. A concentração de hidróxido de sódio em 10mol/L obteve melhores resistências mecânicas.

Baseado nos estudos realizados por Brito *et al* 2018, que verificou a influência da concentração de NaOH no geopolímero, constatou que o excesso de hidróxido de sódio, além de causar carbonatação, diminui a resistência mecânica, aumenta a porosidade e também ocorre uma imediata reação de geopolimerização, ocasionando em uma rápida cura. O autor afirmou que as concentrações de NaOH em 5 e 10 molar, apresentam melhores resistência mecânica de 29,68 e 40,08 MPa em 28 dias de cura.

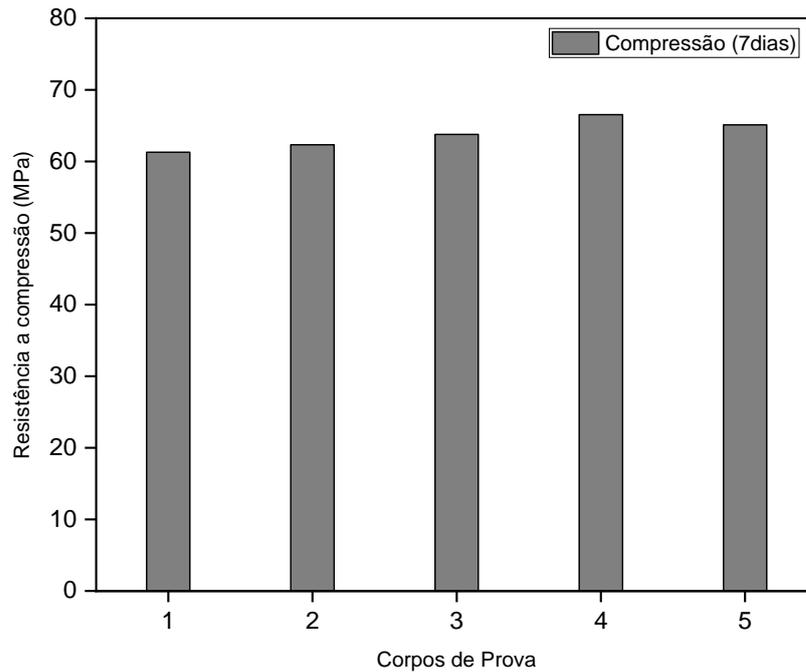
O autor Jafari *et al* (2016), também afirmou que o aumento da molaridade da solução alcalina, resultará em um geopolímero com menor trabalhabilidade, menor resistência à compressão, maior custo e aumento do risco de eflorescência.

Há uma tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento da concentração molar de hidróxido de sódio e do período de cura. Kaur (2018), estudou a variação na resistência à compressão de argamassa geopolimérica à base de cinzas volantes, variando a molaridade do hidróxido de sódio como 12 M, 14 M, 16 M e acompanhada de silicato de sódio em 2:1 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$) com as mesmas molaridades. O resultado final de resistência a compressão alcançado pelo autor foi de 40,42 MPa, obtida pela incorporação de silicato de sódio juntamente com hidróxido de sódio concentrado em 16 molar.

4.2.3 Corpos de Prova Cúbicos

Encontrado o melhor percentual de EAF em 35% e a melhor concentração de NaOH com 10 molar, foram moldados 5 (cinco) corpos de prova cúbicos medindo (5x5) cm de comprimento. Os corpos de prova foram moldados conforme a ABNT NBR 15845-5 (2015) e estão dispostos conforme demonstra a figura 40.

Figura 40 - Ensaio de compressão em corpos de prova cúbicos



Fonte: Autora, (2023)

Os corpos de prova cúbicos apresentaram uma variação na resistência a compressão, com valores entre 62,87 MPa, 63,91 MPa, 64,89 MPa, 66,78 MPa e 65,64 MPa. Obtendo uma média de 64,82 MPa. A figura 41 demonstra o ensaio dos CP's cúbicos.

Figura 41 - Ensaio de compressão dos CP's cúbicos com 7 dias de cura. (a) CP preste a ser ensaiado; (b) CP após rompimento.



(a)



(b)

Fonte: Autora, (2023)

Com base nos estudos de Quirino (2018), os corpos de prova cúbicos já possuem as faces adequadas para a realização do ensaio, devido à aplicação da carga de ruptura ser

perpendicular à direção de moldagem. Já os corpos de prova cilíndricos, por serem ensaiados na mesma direção da moldagem, podem apresentar faces rugosas e desniveladas.

Do mesmo modo, Paiva (2019) observou-se em seu estudo que a média das resistências obtidas nos corpos de prova cúbicos foi superior às encontradas nos cilindros. Segundo o autor, tal fato, se deve a uma maior área que o corpo de prova cúbico possui, em relação a altura e a base equivalente à superfície dos lados.

De acordo com Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses - ISRM (1977), as rochas podem ser classificadas com base na resistência à compressão. Essa classificação varia de extremamente branda, apresentando uma tensão em MPa menor que 1, até extremamente resistente com tensão em MPa superior a 250. A média entre 50 e 100 MPa, indica que a rocha é resistente, de acordo com a tabela 19.

Tabela 19 - Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão uniaxial.

Classificação	Tensão (MPa)
Extremamente branda	<1
Muito Branda	1 – 5
Branda	5 – 25
Resistência Média	25 – 100
Resistente	50 – 100
Muito Resistente	100 - 250
Extremamente Resistente	>250

Fonte: ISRM, (1977)

A resistência a compressão dos CP's cúbicos, atendeu aos padrões do ISRM (1977), com uma resistência média de 64,82 MPa, titulando o geopolímero como um material resistente.

Neste contexto, os agregados geopoliméricos desenvolvidos se apresentam como produtos que têm potencial para serem usados na construção civil como blocos intertravados para pavimentação, com a vantagem de poderem ser elaborados com um material precursor de fácil acesso e abundante no meio ambiente além da utilização de resíduos. O pavimento intertravado é constituído de peças de revestimento assentadas em uma camada de areia, onde a contenção lateral e o atrito entre as peças resultam no travamento delas.

Elói (2020) salienta a possibilidade para aplicações de geopolímeros de rejeitos de minério de ferro com adição de sílica ativa produzidos pelo método one part sem ativação térmica ou mecanoquímica do precursor pois durante o seu estudo foi alcançada resistência

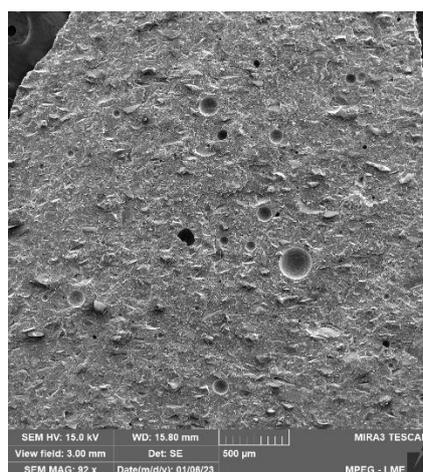
mecânica suficiente para aplicação em alguns campos do setor construtivo, como produção de blocos intertravados, blocos e tijolos.

Silva (2019) estudou o comportamento do concreto em blocos intertravados para pavimentação, optou-se pela incorporação de cinzas pesadas, que são resíduos gerados significativamente por meio de uma usina termoeétrica, na composição do mesmo concreto. O autor obteve a resistência média à compressão para corpos-de-prova cilíndricos em 7 dias de 18,99 MPa. Destaca-se que todos os valores estão abaixo de 35 MPa, que é o mínimo exigido pela norma NBR 9781(ABNT, 2013).

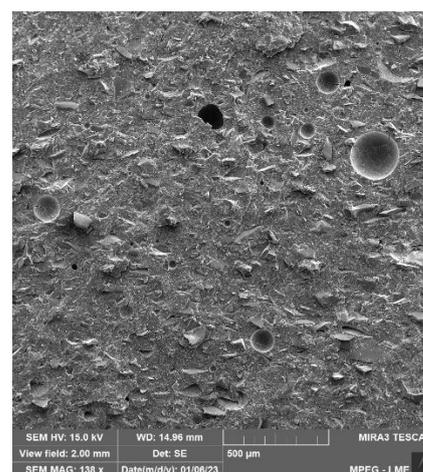
Lima *et al* (2020) desenvolveu blocos intertravados de concreto com substituição parcial do agregado natural pelo plástico. O bloco não atingiu a resistência mínima exigida pela norma, que estabelece um índice de no mínimo 35 MPa. O paver referência obteve o resultado de 6,20 MPa, ou seja, 81% abaixo do valor estabelecido, não sendo possível utilizá-lo em calçadas com alto tráfego de pedestres e veículos. Em 28 dias o bloco atingiu a resistência de 15 MPa.

As figuras 42(a), (b), (c) e 43(a), (b), (c) apresentam as microestruturas das pastas geopoliméricas com variação de concentração de NaOH de 10 e 18 molares. As figuras 42(d) e 43(d) demonstram a análise por EDS com representação dos principais elementos químicos encontrados nas pasta geopolimérica. A figura 42 evidencia a morfologia da pasta, nas ampliações 92, 138 e 1100 X, e a figura 43 com ampliação de 69, 277 e 1100 X respectivamente.

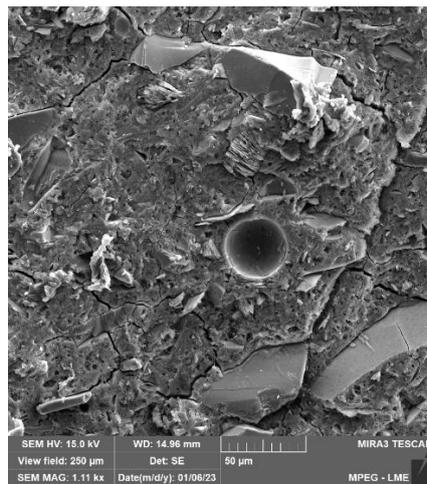
Figura 42 - Pasta Geopolimérica com concentração de NaOH de 10 molar. (a) Aumento de 92X; (b) Aumento de 138X; (c)Aumento de 1.11kx (d) Análise de EDS.



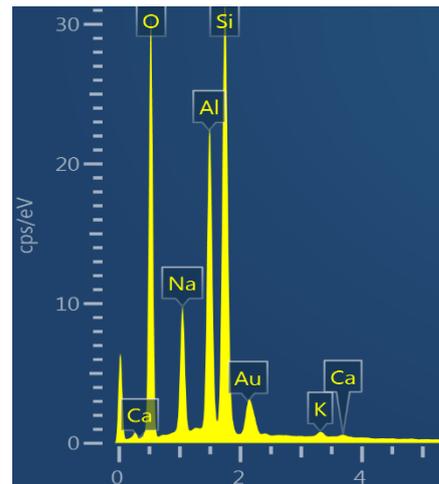
(a)



(b)



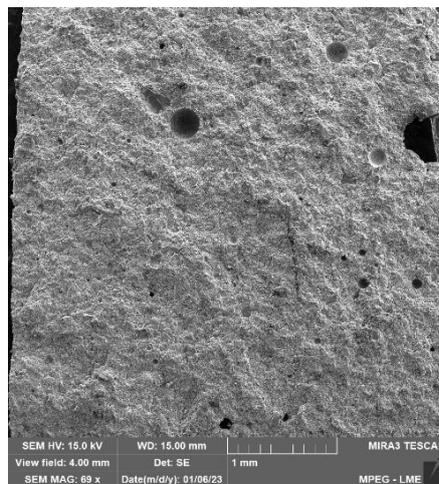
(c)



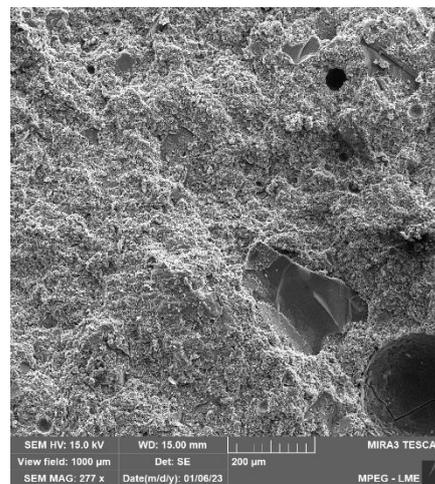
(d)

Fonte: Autora, (2023)

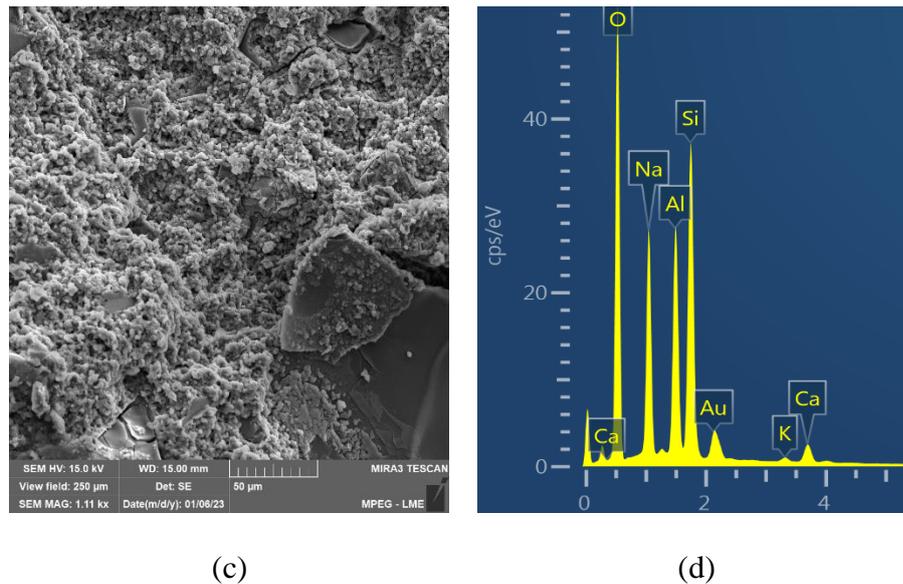
Figura 43 - Pasta Geopolimérica com concentração de NaOH de 18 molar. (a) Aumento de 69X; (b) Aumento de 277X; (c) Aumento de 1.11kx (d) Análise de EDS.



(a)



(b)



(c)

(d)

Fonte: Autora, (2023)

Com base na análise da microestrutural da pasta geopolimérica com variação na concentração NaOH de 10 molar, as figuras 42 (a) e (b) apresentaram uma morfologia densa, o que confere ao material alta resistência a compressão. A superfície do material se apresentou relativamente uniforme, com alguns espaços vazios, ocasionado por aprisionamento de ar. A figura 42 (c) apresentou microfissuras, provavelmente ocasionadas pelo ensaio de compressão e partículas com formatos e tamanhos diferentes, a mesma encontrada na figura 37(b).

O espectro do EDS da figura 42(d) apresenta os elementos de silício, alumínio, oxigênio nos pontos mais altos. Em níveis mais baixos, compõem o material o sódio, potássio, cálcio e ouro. A presença do Na no espectro pode ser devido ao ativador a base de hidróxido de sódio.

Segundo Brito *et al* 2018, através das análises de microscopia eletrônica, o autor identificou que um aspecto morfológico mais denso e uniforme apresenta ao geopolímero maior desempenho mecânico, indicando que o processo de geopolimerização ocorreu de forma homogênea em todo material.

Neto (2019) afirmou que em concentração alcalina de 8 molar não há a dissolução por completo dos aluminossilicatos, mas o aumento da concentração de 8 M para 12 M demonstra uma estrutura mais compacta e parte do produto final reagido de forma mais eficiente. No entanto, ao aumentar ainda mais essa concentração para 16 M, reconduziu-se quimicamente a dissolução de forma inacabada, assim como na amostra de 8 M, porém com uma estrutura mais lisa e compacta, indicando uma resposta benéfica desse aumento nas propriedades endurecidas.

Na micrografia das figuras 43 (a) e (b), com a concentração de NaOH em 18 molar, é

possível observar um aspecto morfológico rugoso e com espaços vazios. A figura 43(c) apresenta um aglomerado de partículas que revestem toda a superfície do material, esse processo na microestrutura pode indicar que a grande concentração do ativador alcalino, influenciou no processo de geopolimerização.

A análise de composição química por EDS indicada pela figura 43 (d), apresenta um grande percentual de silício, alumínio, oxigênio e sódio. O elevado nível de Na no material, pode indicar ser devido as grandes concentrações do ativador alcalino utilizado na formulação.

De acordo com Neto (2019), existe uma concentração limite, ao aumentar de 12 molar para 16 molar, o excesso de hidroxilas causa a precipitação do material antecipadamente, resultando em um compósito álcali-ativado mais cristalino e, em consequência, um material de menor resistência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de resistência a compressão no estudo de influência do percentual de EAF nas pastas geopoliméricas, mostraram que a melhor composição encontrada de EAF foi em 35%, resultando em uma pasta com 36,56 MPa para geopolímeros moldados em CP's cilíndricos e com ensaio de resistência a compressão de 7 dias. Percentuais acima desse valor, demonstraram decréscimo na resistência.

A variação da concentração alcalina de NaOH nas pastas geopoliméricas, foi realizada com o melhor percentual de EAF encontrado. Os resultados revelam que os corpos de prova cilíndricos de pasta de geopolímero contendo concentração alcalina de NaOH com 10 molar, apresentou resistência a compressão de 44,79 MPa. Com o aumento da molaridade chegando a 18 molar, a resistência diminuiu para 3,58 MPa.

Os corpos de prova cúbicos, apresentando uma resistência a compressão de 64,82 MPa. De acordo com ISRM (1977), o agregado sintético geopolimérico pode ser classificado como resistente.

O agregado sintético geopolimérico se mostrou promissor para aplicação na construção civil para blocos intertravados para pavimentação, segundo a legislação NBR 9781 (2013), a resistência mínima à compressão aos 28 dias é 35 MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e 50 MPa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Os resultados obtidos através dos ensaios físicos nos materiais precursores, se mostraram satisfatórios e de acordo com a normas técnicas, permitindo a utilização dessas matérias-primas no geopolímero.

As análises de caracterização dos materiais, confirmaram a eficiência no processo de calcinação que ocorreu a 850 °C por 2 horas. As imagens da microestrutura da pasta apresentaram uma morfologia densa, o que confere ao material alta resistência a compressão. A superfície do material se apresentou relativamente uniforme, com pouco índice de espaços vazios. Por fim, pode-se concluir ao final deste trabalho, que o agregado geopolimérico em estudo, apresentou boa resistência a compressão e padrões normativos aceitáveis.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da resistência a compressão, após as idades de 14 e 28 dias;
- Investigar o comportamento mecânico dos agregados geopoliméricos com tratamento térmico;
- Estudar o comportamento dos materiais geopoliméricos utilizando como ativador alcalino o hidróxido de potássio (KOH);
- Desenvolver o concreto com a utilização do agregado sintético geopolimérico;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-GHANI, Nour T, Hamdy A Elsayed, and Sara AbdelMoied. "**Geopolymer Synthesis by the Alkali-activation of Blastfurnace Steel Slag and Its Fire-resistance.**" *HBRC Journal* 14.2 (2018): 159-64. Web.
- AGHILILOTF, Milad, Massoud Palassi, and Amir Mohammad Ramezaniapour. "**Mechanical and Durability Assessment of Unconfined Recycled Concrete Aggregates and Natural Aggregates Used in Road Constructions.**" *The International Journal of Pavement Engineering* 22.12 (2021): 1518-530. Web.
- AGUIAR FILHO, Jorge Leorne. **A importância da britagem na forma dos agregados utilizados nos revestimentos asfálticos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
- ALMUTAIRI, Ahmad L., Bassam A. Tayeh, Adeyemi Adesina, Haytham F. Isleem, and Abdullah M. Zeyad. "**Potential Applications of Geopolymer Concrete in Construction: A Review.**" *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021): E00733. Web.
- ALVES, Raul, Paulina Faria, and Ana Brás. "**Brita Lavada – An Eco-efficient Decorative Mortar from Madeira Island.**" *Journal of Building Engineering* 24 (2019): 100756. Web.
- AMRAN, Y.H. Mugahed, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar, and Mohamed El-Zeadani. "**Clean Production and Properties of Geopolymer Concrete; A Review.**" *Journal of Cleaner Production* 251 (2020): 119679. Web.
- APOLONIO, P. H. *et al.* **Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica.** *Cerâmica* [online]. 2020, v. 66, n. 378, pp. 172-178.
- ARAÚJO, L. G.C.A. **Caracterização destrutiva e não destrutiva de concreto geopolimérico álcali-ativado com base em metacaulim.** Conclusão de Curso Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2018.
- ARAÚJO, Lucas Benício Rodrigues, Ana Karoliny Lemos Bezerra, Leonária Araújo Silva, Andressa Cristina Borges Chaves, Heloína Nogueira Da Costa, and Lucas Feitosa De Albuquerque Lima Babadopulos. "**Estudo Das Propriedades Reológicas E Microestruturais De Ligante Geopolimérico à Base De Cinza Volante.**" *Ambiente Construído* 23.2 (2023): 181-94. Web.
- ARTUR K., WŁODZIMIERZ K., MARCIN K. **Influence of raw concrete material quality**

on selected properties of recycled concrete aggregates. Procedia Engineering 172 (2017).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 7211: **Agregado para concreto**”, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15012: **Rochas para revestimentos de edificações – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15844: **Rochas para revestimento - Requisitos para granitos.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15845-5: **Rochas para revestimento parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15894-3: **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781: **Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2012.

AZEVEDO, A. G. de S. *et al.* **Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃**. *Cerâmica* [online]. 2017, v. 63, n. 366, pp. 143-151.

AZEVEDO, A.; STRECKER, K. **Influência da Composição Química das Soluções Alcalinas Ativadoras na Produção de Geopolímeros a Base de Cinza Volante**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 12, p. 39–46, 2017.

AZEVEDO, AG De S, K. Strecker e CT LOMBARDI. **"Produção De Geopolímeros à Base De Metacaulim E Cerâmica Vermelha."** *Cerâmica* 64.371 (2018): 388-96. Rede.

AZEVEDO, AG de S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. **Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 64, p. 388-396, 2018.

AZEVEDO, J. S.; DIAS, D. P.; SOARES, J. C. **Efeito da temperatura em resinas geopoliméricas à base de metacaulim ativado por diferentes combinações entre silicatos e hidróxidos**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, p. 1–13, 2019.

BABAZADEH, Shahrouz, Davood Raeisi, Massimo D'Antonio, Miao Zhao, Leon E. Long, John M. Cottle, and Soroush Modabberri. **"Petrogenesis of Miocene Igneous Rocks in the Tafresh Area (central Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Iran): Insights into Mantle Sources and Geodynamic Processes."** *Geological Journal (Chichester, England)* 57.7 (2022): 2884-903. Web.

BACK, A. H. *et al.* **Avaliação das propriedades químicas e geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do estado do RS**. 2018.

BATISTA, Albert Jonatha; INGUNZA, Maria Del Pilar Durante. **Characterization of granite mining waste for geotechnical purposes**. *Northeast Geosciences Journal*. v. 9, nº 1, 2023.

BENARCHID, Youssef, Yassine Taha, Rabei Argane, and Mostafa Benzaazoua. **"Application of Quebec Recycling Guidelines to Assess the Use Feasibility of Waste Rocks as Construction Aggregates."** *Resources Policy* 59 (2018): 68-76. Web.

BLANCO, IGNAZIO, and CATAURO. **"Geopolymers-Design, Preparation, and Applications."** *Polymers* 14.5 (2022): 853. Web.

BRAYMAND, S. *et al.* **Separation and quantification of attached mortar in recycled**

concrete aggregates. Waste and Biomass Valorization, v. 8, n. 5, p. 1393-1407, 2017.

BRITO, W. S. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belém, 2019.

BRITO, WASHINGTON DA SILVA *et al.* **Avaliação do comportamento reológico e mecânico de geopolímero sintetizado com reaproveitamento de resíduo.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, 2018.

BRITO, WASHINGTON DA SILVA, ANDRÉ LUIS MILEO FERRAIOLI SILVA, KRISTOFF SVENSSON, HERBERT PÖLLMANN, ROZINEIDE APARECIDA ANTUNES BOCA SANTA, HUMBERTO GRACHER RIELLA, AND JOSÉ ANTÔNIO DA SILVA SOUZA. **"Influência da concentração de NaOH na síntese de geopolímero com reaproveitamento de resíduo industrial."** Tecnologia Em Metalurgia, Materiais E Mineração 16.1 (2019): 45. Web.

BURKHARD, ALAIN RAMON. **Utilização do rejeito do beneficiamento do caulim para ativação alcalina.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

CABALLERO, L.R. **Comportamento físico-mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim reforçadas com fibras de aço.** 2017. Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia e Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

CARDOSO, A. C. **Efeito da adição de agregados reciclados na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado.** 2018. Dissertação de Mestrado. - Universidade Federal do Pará. Belém, 2018.

CARVALHO, AM GALOPIM. **Rochas magmáticas ou ígneas.** Revista de Ciência Elementar, v. 6, n. 4, 2018.

CASTILHO, EVANIZIS DIAS FRIZZERA. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais: práticas laboratoriais.** 60 p. Vitória, ES: Edifres, 2018.

CAVALCANTI, L. F. M. *et al.* **Granito Azul Sucuru: caracterização tecnológica por meio do aproveitamento do material.** Revista Principia, v. 33, p. 11-20, 2017.

CHAU-KHUN, MA, ABDULLAH ZAWAWI AWANG, AND WAHID OMAR. **"Structural and Material Performance of Geopolymer Concrete: A Review."** Construction & Building Materials 186 (2018): 90-102. Web.

CHITHAMBARAM, S. Jeeva, Sanjay KUMAR, and M.M PRASAD. "**Thermo-mechanical Characteristics of Geopolymer Mortar.**" *Construction & Building Materials* 213 (2019): 100-08. Web.

COLANGELO, F., G. Roviello, L. Ricciotti, V. Ferrándiz-Mas, F. Messina, C. Ferone, O. Tarallo, R. Cioffi, and C.R Cheeseman. "**Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Geopolymer Composites.**" *Cement & Concrete Composites* 86 (2018): 266-72. Web.

CORRÊA, Thiago. **Estudo morfológico preliminar de materiais geopoliméricos com escória de alto forno submetidos a altas temperaturas.** Orientador: Alisson Clay Rios da Silva. 2021. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2021.

CORREIA, SIVALDO LEITE. **Desenvolvimento sustentável de cimentos de geopolímeros a partir de rejeitos industriais.** *Essa*, v. 12, 2018.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições Mineraias. In. ISAIA. Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232. Vol. 1. 2011.

DANTAS, A. R. S. **Influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto confeccionado com brita calcária e aditivo plastificante.** 2019. Trabalho de Graduação em Engenharia Civi - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró, 2019.

DAVE, N.; SAHU, V.; MISRA, A. K. **Development of geopolymer cement concrete for highway infrastructure applications.** *Journal of Engineering, Design and Technology*, v. 18, n. 5, p. 1321–1333, 4 maio 2020.

DAVIDOVITS, J. **30 anos de sucessos e fracassos em aplicações de geopolímeros.** Tendências de mercado e descobertas em potencial. em: Keynote Conference on Geopolymer Conference, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Application of Ca-based Geopolymer With Blast Furnace Slag, a Review.** Geopolymer Institute. In.: *Proceedings. INTERNATIONAL SLAG VALORISATION SYMPOSIUM*, 2. Saint-Quentin, França, 2011.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement review.** In.: *Geopolymer Science and technics. Technical Paper.* Geopolymer Institute Library. Vol. 21, p. 1-11. 2013.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications.** 4ª. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2015.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers and Geopolymeric materials**. Journal of Thermal Analysis, v. 35, p. 429-441, 1989.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. P.V. Krivenko (Ed.), Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Ukraine, p. 131–149. 1994.

DAVIDOVITS, J. **Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs**. in Keynote Conference on Geopolymer Conference. 2002

DAVIDOVITS, J., **Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites**. SPE PACTEC, 1979. 79: p. 151-154.

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymers: Inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis. Vol. 37, p. 1633-1656, 1991.

DIAS, D. P.; DÉsir, J. M.; SILVA, P. F. (2005) **Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Mortars Made from Alkali-Activated Metakaolim**. IV Internayional ACI/CANMET Conference on quality of Concrete Structures and recent advances in concrete materials and testing. Brasil. Fire Resistance. 9: 420-429.

DIAS, Maurio Cesar. **Análise da Influência da Incorporação de Metacaulim nas Propriedades do Concreto Autoadensável**. Universidade Feevale - Novo Hamburgo, 2018.

DING, Zhan, Peilong Li, Xu Wu, Peng Gao, Jinfei Su, and Shengfei Sun. "**Evaluation of the Contact Characteristics of Graded Aggregate Using Coarse Aggregate Composite Geometric Indexes**." Construction & Building Materials 247 (2020): 118608. Web.

ELEUTÉRIO, Rafael Vidal. **Desenvolvimento de Geopolímeros a Base de Metacaulim Incorporando Resíduos da Indústria de Papel e Celulose**. 2018. Dissertação (mestrado) - Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina- Florianópolis, 2018.

ELÓI, Fernanda Pereira da Fonseca. **Ativação alcalina do rejeito de barragem de minério de ferro com adição de sílica ativa**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2020.

FAN, Fenghong; LIU, Zhen; XU, Guoji; PENG, Hui; CAI C.S. **Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers**. Construction and Building Materials. Vol. 160, p. 66-81, 2018

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. **Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator**. Cement And Concrete Research, Madrid, v.29. p.1204-1209, May. 2009.

FERREIRA, Éverton Henrique. **Desempenho estrutural e viabilidade econômica do uso do metacaulim em concreto dosado em central**. Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Santa Cruz do Sul 2017.

FIGUEIREDO, P. O. *et al.* **Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto**. Ambiente Construído [online]. 2020, v. 20, n. 2

FILHO, J. C. P, **Análise da resistência à compressão e consistência de concreto produzido com brita calcária e aditivo plastificante**. 2017. 66 f. Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Mossoró, 2017.

FLADVAD, Marit, and Tero ONNELA. **"Influence of Jaw Crusher Parameters on the Quality of Primary Crushed Aggregates."** Minerals Engineering 151 (2020): 106338. Web.

FONSECA, J. M. M. **Estudo da adição de silicato de sódio alcalino em componentes cimentícios**. 2021. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2021

FONTES, M. P. F. (1984). **Introdução ao estudo de minerais e rochas**. Viçosa, Imprensa Universitária da UFV. 1984, 23p.

FOURNARI, Revecca, and Ioannis IOANNOU. **"Correlations between the Properties of Crushed Fine Aggregates."** Minerals (Basel) 9.2 (2019): 86. Web.

FRASSON, B. J., PELISSER, F. e SILVA, B. V. **“Concrete crack repair analysis with metakaolin-based geopolymer cement”**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais [online]. 2020, v. 13, p. 298-313, 2020.

FRIZZO, Rafael Guelfi. **Piroplasticidade em cerâmica de composição albita-feldspato potássico-caulim**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

FROTA, C. A. *et al.* **Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada**. Cerâmica [online]. 2007, v. 53, n. 327, pp. 255-262.

FUNAHASHI Júnior, Eduardo Issamu, Patrícia Guedes Gambale, Solanda Oliveira, and Nicole

Pagan Hasparyk. **"Influência Do Metacaulim Na Elevação Da Temperatura E Na Formação De Etringita Tardia Em Compósitos Cimentícios."** *Matéria* 27.2 (2022): *Matéria*, 2022, Vol.27 (2). Web.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F.; SILVA, N. V.; MORAES, K. A. M.; ÂNGULO, S. C.; **Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados.** *Ambiente Construído*, v. 15, n. 3, 2015, pp. 31-46

GONÇALVES, A. L.; MAIA, A. A. B. **Síntese de sodalita a partir de rejeito de Caulim da Amazônia através de extrusão da mistura reacional seguido por processo Hidrotermal.** BOMGEAM. Belém, ano 5, n.2, p. 1-16. 2018.

GONSALVES, A. L. **Utilização de um resíduo de caulim da amazônia na síntese da zeólita ferrierita.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará – Abaetetuba, 2018.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GROVE, Timothy L., and Stephanie M. BROWN. **"Magmatic Processes Leading to Compositional Diversity in Igneous Rocks: Bowen (1928) Revisited."** *American Journal of Science* (1880) 318.1 (2018): 1-28. Web.

GUO, Xiaolu, and Xuejiao PAN. **"Mechanical Properties and Mechanisms of Fiber Reinforced Fly Ash–steel Slag Based Geopolymer Mortar."** *Construction & Building Materials* 179.C (2018): 633-41. Web.

GUO, Y.B, G.F GAO, L. JING, and V.P.W Shim. **"Dynamic Properties of Granite Rock Employed as Coarse Aggregate in High-strength Concrete."** *International Journal of Impact Engineering* 156 (2021): 103955. Web.

HAGER, Izabela, Mateusz SITARZ, and Katarzyna MRÓZ. **"Fly-ash Based Geopolymer Mortar for High-temperature Application – Effect of Slag Addition."** *Journal of Cleaner Production* 316 (2021): 128168. Web.

HANDAYANI, L., S. Aprilia, Abdullah, C. Rahmawati, A M Mustafa Al Bakri, I H Aziz, and E A Azimi. **"Synthesis of Sodium Silicate from Rice Husk Ash as an Activator to Produce Epoxy-Geopolymer Cement."** *Journal of Physics. Conference Series* 1845.1 (2021): 12072. Web.

HASSAN, Amer, Mohammed Arif, and M. Shariq. **"Use of Geopolymer Concrete for a Cleaner and Sustainable Environment – A Review of Mechanical Properties and Microstructure."** *Journal of Cleaner Production* 223 (2019): 704-28. Web

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

HENRIQUES, A.M.E.; TELLO, J.M.S.N. **Manual da Pedra Natural para a Arquitetura**. Lisboa, (Portugal): Direção Geral de Geologia e Energia, 2006. 199 p.

HICKEL, G. C., G. C. BOAVENTURA, R. A. Souza, L. M. CALÇADA, J. M. Casali, A. M. BETIOLI, and A. L. OLIVEIRA. "**Influence of Crusher Type in the Shape of Fine Crushed Aggregate Grains**." *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais* 11.4 (2018): 902-30. Web.

HUI-TENG, Ng, Heah Cheng-Yong, Liew Yun-Ming, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Phakkhananan Pakawanit, Ridho Bayuaji, Ng Yong-Sing, Khairunnisa Binti Zulkifly, Ooi Wan-En, Hang Yong-Jie, and Ong Shee-Ween. "**Comparison of Thermal Performance between Fly Ash Geopolymer and Fly Ash-ladle Furnace Slag Geopolymer**." *Journal of Non-crystalline Solids* 585 (2022): 121527. Web.

ISRM -International Society Rock Mechanics (1977). **Suggest methods for determining tensile strength of rock materials**. *Int. Jour. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech Abstr.* Vol 15, N°3, pag:99 - 103.

JAFARI Nadoushan, Mohsen, and Ali Akbar Ramezaniapour. "**The Effect of Type and Concentration of Activators on Flowability and Compressive Strength of Natural Pozzolan and Slag-based Geopolymers**." *Construction & Building Materials* 111 (2016): 337-47. Web.

JU, M. *et al.* "**Mechanical Behavior of Fine Recycled Concrete Aggregate Concrete with the Mineral Admixtures**". *Materials*, v. 13, n. 10, p. 2264, 14 maio 2020.

JUNIOR, Nelson de Assis Medeiros. **Desenvolvimento de massa de revestimento cerâmico, relacionando o desempenho do Caulim e Argila Mataraca**. Universidade Federal da Paraíba - JOÃO PESSOA, 2018.

KAMANI, Mojtaba, and Rassoul AJALLOEIAN. "**The Effect of Rock Crusher and Rock Type on the Aggregate Shape**." *Construction & Building Materials* 230 (2020): 117016. Web.

KAUR, Mandeep, Jaspal Singh, and Manpreet Kaur. "**Synthesis of Fly Ash Based Geopolymer Mortar considering Different Concentrations and Combinations of Alkaline Activator Solution**." *Ceramics International* 44.2 (2018): 1534-537. Web.

KEKANOVIĆ, Milan, Neđo Đurić, and Sreten Pištalo. "**Natural crushed rock as aggregate for ultra high strength cement concretes**." *Archives for Technical Sciences* 1.21 (2020):

Archives for Technical Sciences, 2020, Vol.1 (21). Web.

KOHLER, Rogério Kraft. **Classificação de agregados de rochas ígneas quanto a sua alteração por meio de processamento digital de imagens.** Dissertação de mestrado em Ciências da Computação - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2021.

KWASNY, Jacek; SOUTSOS, Marios N.; MCINTOSH, John A.; CLELAND, David J. **Comparison of the effect of mix proportion parameters on behaviour of geopolymer and Portland cement mortars.** Construction and Building Materials. Vol. 187, p. 635-651, 2018.

LERMEN, Richard Thomas, Tays Lucia Remontti, and Rodrigo De Almeida Silva. **"Influência Da Quantidade De água Na Formação De Eflorescência Em Geopolímeros a Base De Metacaulim."** *Matéria* 27.4 (2022): Matéria, 2022, Vol.27 (4). Web.

LI, Ning, Caijun Shi, Zuhua Zhang, Hao Wang, and Yiwei Liu. **"A Review on Mixture Design Methods for Geopolymer Concrete."** Composites. Part B, Engineering 178 (2019): 107490. Web.

LI, Zhenming, Shizhe Zhang, Yibing Zuo, Wei Chen, and Guang Ye. **"Chemical Deformation of Metakaolin Based Geopolymer."** Cement and Concrete Research 120 (2019): 108-18. Web.

LIMA, Jesse de Jesus; QUINTINO, Pedro Henrique Maciejewsky; RICARDO, Deyvid. **Avaliação de bloco intertravado de concreto utilizando plástico como agregado miúdo.** HUMANIDADES E TECNOLOGIA (FINOM), v. 22, n. 1, p. 39-55, 2020.

LINGYU, Tian, He Dongpo, Zhao Jianing, and Wang Hongguang. **"Durability of Geopolymers and Geopolymer Concretes: A Review."** Reviews on Advanced Materials Science 60.1 (2021): 1-14. Web.

LUCAS, M. M. **Materiais cimentícios geopoliméricos a partir de escória de alto forno: um estudo morfológico preliminar.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2021.

MATOS, P. R; JUNCKES, R; PRUDÊNCIO, L. R. **Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos.** Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2019, v. 24, n. 2

MATTOS, Flávia Costa De, and Margarete Regina Freitas GONÇALVES. **"Argamassas De Cal E Metacaulim: Influência Das Condições De Cura."** Matéria 24.4 (2019): Matéria, 2019, Vol.24 (4). Web.

MEDEIROS, Ailma Roberia Souto *et al.* **Análise granulométrica e DRX para caracterização do rejeito de caulim da região do Seridó da Paraíba visando uma nova rota de beneficiamento.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 6, p. 33575-33588, 2020.

MEDEIROS, M. H. F; RAISDORFER, J. W. e HOPPE, J. **Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c.** Ambiente Construído [online]. 2017, v. 17, n. 4, pp. 125-139.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do Metacaulim em Sistemas Binários com Cimento Portland e Hidróxido de Cálcio.** Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. 134p

MESGARI, S., A. Akbarnezhad, and J.Z Xiao. **"Recycled Geopolymer Aggregates as Coarse Aggregates for Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete: Effects on Mechanical Properties."** Construction & Building Materials 236 (2020): 117571. Web.

MIKAMI, R. J. *et al.* **Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável.** Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2018, v. 23, n. 3

MOHAMMED, Mona S., Hala ElKady, and Hamdy A. Abdel- Gawwad. **"Utilization of Construction and Demolition Waste and Synthetic Aggregates."** Journal of Building Engineering 43 (2021): 103207. Web.

MOHD Salahuddin, M.B., N. Mazlan, F. Mustapha, M.R. Ishak, and A.A. Saprudin. **"Factorial Design Approach to Investigate the Significance of Factors on the Fire Resistant, Compression and Adhesion Properties of Geopolymer Binder."** Journal of Mechanical Engineering and Sciences 14.3 (2020): 7191-204. Web.

NAGARAJAN, Praveen e AP SHASHIKALA. **"Desenvolvimento de Concreto Geopolímero de Dolomita e Escória de Alto-Forno Granulado Moído."** ACI Materials Journal 116.6 (2019): 235-43. Rede.

NARAYANAN A. An **"Experimental Investigation on Flyash-based Geopolymer Mortar under different curing regime for Thermal Analysis"**. Energy and Buildings. 2017;138:539-545.

NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação –Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013

NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005e.

NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

NEGRÃO, Pedro Ivo Gomes. **Caracterização de uma ocorrência de material areno-caulinítico no município de Igarassu-PE para aproveitamento industrial**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral. Engenharia Mineral – Recife, 2016.

NETO, José Anselmo da *et al.* **Influência da concentração alcalina (NaOH) e razão dos reagentes alcalinos (Na₂SiO₃/NaOH) em concreto álcali-ativado de base metacaulim**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa 2021.

OLIVEIRA et e al. **Avaliação do potencial de argilas de Sergipe e Alagoas na produção de agregados para uso em concreto**. *Cerâmica* 63 (367) Jul-Sep 2017

OLIVEIRA Júnior, José Mamede Rebouças De, Carla Beatriz Costa De Araújo, and Thiago Moura Da Costa Ayres. **"Estudo Comparativo Entre Solo Seixo E Solo Brita Para Fins De Pavimentação"**. *Revista Tecnologia* 39.1 (2018): 1-17. Web.

OLIVEIRA, G. T. *et al.* **Concreto Geopolimérico Versus Concreto Convencional: Resistência a Compressão Em 24 Horas**. *Salão do Conhecimento*, v. 7, n. 7, 2021.

OLIVEIRA, Herbet Alves De, Cochiran Pereira Dos Santos, Rosane Maria Pessoa Betânio Oliveira, Edilson De Jesus, and Zélia Soares Macedo. **"Produção De Agregado Sintético De Argila Com Reaproveitamento De Resíduo De Vidro"**. *Matéria* 24.1 (2019): Matéria, 2019, Vol.24 (1). Web.

OLIVEIRA, L. B. **Produção e caracterização de compósito de matriz geopolimérica com adição de resíduo industrial**. 2019. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2019.

OSTERLE, J.E., T.A. Little, D. Seward, D.F. Stockli, and J. Gamble. **"The Petrology, Geochronology and Tectono-magmatic Setting of Igneous Rocks in the Suckling-Dayman Metamorphic Core Complex, Papua New Guinea"**. *Gondwana Research* 83 (2020): 390-414. Web.

OZCAN, Ahmet, and Mehmet B KARAKOC. **"Evaluation of Sulfate and Salt Resistance of Ferrochrome Slag and Blast Furnace Slag-based Geopolymer Concretes"**. *Structural Concrete : Journal of the FIB* 20.5 (2019): 1607-621. Web.

P. Souza Santos, **Ciência e tecnologia de argilas**, 2ª ed., v.2, Edgard Blucher, S. Paulo (1989).

PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. **Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 167-186, abr./jun. 2022

PAGIO, Mariana Zani *et al.* **Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias.** Ambiente Construído, v. 22, p. 167-186, 2022.

PAIVA, Mariana Fernandes. **Estudo comparativo entre as resistências à compressão axial obtidas em corpos de prova cilíndricos e cúbicos.** 2019. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade de Taubaté, Taubaté 2019.

PAIVA, P. S. *et al.* **Caracterização e avaliação das propriedades geomecânicas para uso em pavimentação de agregados de rochas vulcânicas da porção central do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2017.

PARTSCHEFELD, Stephan, Torben Wiegand, Frank Bellmann e Andrea Osburg. **"Formação de geopolímeros usando solução de silicato de sódio e ortofosfato de alumínio."** *Materiais* 13.18 (2020): 4202. Web.

PEDERNEIRAS, Cinthia Maia. **Avaliação de blocos intertravados com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição de obras do município de Natal/RN.** 2017. 118f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

PENG, Hui, Chao Cui, Zhen Liu, C. S Cai, and Yang Liu. **"Synthesis and Reaction Mechanism of an Alkali-Activated Metakaolin-Slag Composite System at Room Temperature."** *Journal of Materials in Civil Engineering* 31.1 (2019): *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, Vol.31 (1). Web.

PEREIRA, A. P. S; RAMOS, F. J. H. T. V; SILVA, M. H. P. **Caracterização estrutural de geopolímeros sustentáveis de escória de aciaria LD e escória de aciaria LF com KOH.** *Matéria* (Rio de Janeiro) [online]. 2020, v. 25, n. 03

PEREIRA, H. H. C. **Aplicação de geopolímeros como blindagem para radiação ionizante.** 2013. 205f. Dissertação de mestrado em Física e Matemática Aplicadas - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

PEREZ, Cortes, Pedro, and J. Ivan Escalante-GARCIA. **"Design and Optimization of Alkaline Binders of Limestone-metakaolin – A Comparison of Strength, Microstructure**

and Sustainability with Portland Cement and Geopolymers." Journal of Cleaner Production 273 (2020): 123118. Web.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. Rio de Janeiro: Globo, 1987

PETTERLE, Antônio R. *et al.* **Placas Cerâmicas contendo lodo de ETA e Cinza de Casca de Arroz: Correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura**. Química Nova , v. 41, p. 1117-1126, 2018.

PEYS, Arne, Ruben Snellings, Bo Peeraer, Asghar Gholizadeh Vayghan, Anders Sand, Liesbeth Horckmans, and Mieke Quaghebeur. **"Transformation of Mine Tailings into Cement-bound Aggregates for Use in Concrete by Granulation in a High Intensity Mixer."** Journal of Cleaner Production 366 (2022): Journal of Cleaner Production, 2022, Vol.366. Web.

PIMENTEL, Maurílio Gomes *et al.* **Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil**. Brazilian Applied Science Review, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2019.

PIMENTEL, Maurílio Gomes *et al.* **Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil**. Brazilian Applied Science Review, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2019.

PORTO, A. B. R; CANDIDO, V. S; MONTEIRO, S. N; SILVA, A. C. R. **Estudo das Propriedades Termomecânicas de Geopolímeros 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; LUCAS, M. M; MONTEIRO, S. N; CANDIDO, V. S; SILVA, A. C. R. **Estudo de Pasta Geopolimérica com substituição parcial do Metacaulim da Região Norte por Escória de Alto Forno** , p. 1009-1019. In: *74º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2019. ISSN: 2594-5327 , DOI 10.5151/2594-5327-33322

PORTO, Ana Beatriz Rodrigues. **Estudo do concreto geopolimérico a partir de metacaulim da região norte com adição de escória de alto forno**. Orientador: Alisson Clay Rios da Silva. 2019. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

QUIRINO, Lucas Marques de Oliveira. **Análise comparativa da influência das variáveis: geometria e tipos de regularização de faces, nos resultados dos ensaios de compressão**

axial. 2018. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2018.

RAJAN, Hosanna Solomon, and Parthiban KATHIRVEL. "**Sustainable Development of Geopolymer Binder Using Sodium Silicate Synthesized from Agricultural Waste.**" *Journal of Cleaner Production* 286 (2021): 124959. Web.

REN, Bo, Yunliang Zhao, Haoyu Bai, Shichang Kang, Tingting Zhang, and Shaoxian Song. "**Eco-friendly Geopolymer Prepared from Solid Wastes: A Critical Review.**" *Chemosphere (Oxford)* 267 (2021): 128900. Web.

RIBEIRO junior, E. **Propriedades dos materiais constituintes do concreto**. Revista on-line Especialize, Dez de 2017.

ROCHA, et e al. **Concreto com cimento geopolimérico com substituição de metacaulim por cinza de casca de arroz**. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 6, n.12, p.94037-94054 dec. 2020.

ROCHA, Guilherme Gallo Neves. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, 2005.

ROCHA, T. S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, 2017.

RODRIGUES, Alexandre Souza *et al.* **Caracterização tecnológica de rocha pegmatítica visando sua utilização como rocha ornamental**. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 15, n. 4, p. 434-440, 2018.

ROUABHIA, F., Nemamcha, A. e Moumeni, H. **Elaboração e caracterização de cerâmicas porosas mulita-anortita-albita preparadas a partir de caulim argelino**. *Cerâmica* 2018, v. 64, n. 369, pp. 126-132.

SALAS, Daniel A, Angel D Ramirez, Nestor Ulloa, Haci Baykara, and Andrea J Boero. "**Life Cycle Assessment of Geopolymer Concrete.**" *Construction & Building Materials* 190 (2018): 170-77. Web.

SANT'ANA, Alexandre Pelissari. **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários**. Tese de Doutorado - Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2003.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca et al. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis, SC, 2016.

SANTANA, Vitor Leão *et al.* **Desenvolvimento de um sistema de secagem para beneficiamento de caulim usando energia solar**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande - CAMPINA GRANDE, 2022.

SANTOS F. **Estudo da variação da relação SiO₂/Al₂O₃ na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes**. Dissertação de Mestrado -Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

SANTOS, BS, DDM ALBUQUERQUE, and DV RIBEIRO. "Efeito da Adição de Metacaulim na Carbonatação de Concretos de Cimento Portland." *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais* 13.1 (2020): 1-18. Rede.

SANTOS, D. H. **Influência da sílica e temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo bayer**. Tese de Doutorado -Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

SANTOS, D. O. J., FONTES, C. M. A., LIMA, P. R. L., "Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal", *Matéria*, v. 22, n. 1, e11801, Mai. 2017.

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., **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, A. C. R; ALMEIDA, B. M; LUCAS, M. M; CÂNDIDO, V; CRUZ, K. S. P; OLIVEIRA, M. S; AZEVEDO, A. R. G; MONTEIRO, S. N. 'Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete', *Case Studies in Construction Materials*. Volume 16, 2022, e00829 ISSN 2214-5095

SILVA, A. L. *et al.* **Obtenção de mulita partindo de resíduo de caulim através de tratamento térmico em forno convencional**. *Research, Society and Development*, v. 10, n.

12, p. e283101220653-e283101220653, 2021.

SILVA, Andre Miranda da. **Síntese de materiais geopoliméricos utilizados na separação de emulsões óleo/água**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia - Campina Grande, 2015.

SILVA, G. S. **Estudo Cristalográfico de Dois Derivados N-acilidrazônicos Utilizando a Difração de Raios X**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Alagoas, UFAL. Maceió, 2009.

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.

SILVA, Luzilene Souza, Marlos Henrique Pires Nogueira, Gleisy Kelly Moreira Lima, Filipe Da Silveira Cipriano, and Núbia Jane Da Silva Batista. **"Incorporação De Resíduos De Polimento De Placas De Mármore E Granito Em Argamassas Colantes Industrializadas AC-I."** RCT - Revista De Ciência E Tecnologia 4.7 (2018): RCT - Revista De Ciência E Tecnologia, 2018, Vol.4 (7). Web.

SILVA, M. A. P. **Influência das características morfológicas de britas graníticas e gnáissicas na resistência à compressão do concreto**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

SILVA, R. B. da. **Caracterização do caulim do Junco do Seridó –PB para avaliação do seu potencial adsorvente no sistema caulim/urucum**. 2019. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial)- Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.

SILVA, Webert Brasil Cirilo da. **Análise da viabilidade da fabricação de blocos intertravados de pavimentos de concreto com o uso de resíduos de termelétrica e de agregados reciclados da construção civil**. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 5, n. 7, p. 11017-11043jul. 2019.

SINGH, Jagmeet; SINGH, S. P. **Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review**. Journal of Environmental Management. Vol. 251. 2019

SOUSA, Bianca Jefres Lima. **Produção de Ligantes geopoliméricos a partir de misturas de resíduos ricos em silicoaluminatos: Resíduo da indústria de cerâmica vermelha, tijolos, telhas e metacaulim**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, 2020.

STRZAŁKOWSKI, Paweł, Magdalena Duchnowska, Urszula Kaźmierczak, Alicja Bakalarz, Michał Wolny, Piotr Karwowski, and Tomasz Stępień. **"Evaluation of the Structure and**

Geometric Properties of Crushed Igneous Rock Aggregates." *Materials* 14.23 (2021): 7202. Web.

SUÁREZ Silgado, Sindy Sofía, Xavier Roca Ramón, and Lucrecia Calderón Valdiviezo. "**A Comparative Life Cycle Assessment between Recycled Aggregate and Natural Aggregate.**" *Revista EIA* 19.38 (2022): *Revista EIA*, 2022, Vol.19 (38). Web.

SUKSIRIPATTANAPONG, Cherdsak, Kitsada Krosoongnern, Jaksada Thumrongvut, Piti Sukontasukkul, Suksun Horpibulsuk, and Prinya Chindapasirt. "**Properties of Cellular Lightweight High Calcium Bottom Ash-portland Cement Geopolymer Mortar.**" *Case Studies in Construction Materials* 12 (2020): E00337. Web.

SUN, Qi, Shuo Tian, Qingwei Sun, Bing Li, Chang Cai, Yajie Xia, Xing Wei, and Qianwen Mu. "**Preparation and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Paste Backfill Material.**" *Journal of Cleaner Production* 225 (2019): 376-90. Web.

TATARANNI, Piergiorgio; SANGIORGI, Cesare. "**Synthetic Aggregates for the Production of Innovative Low Impact Porous Layers for Urban Pavements.**" *Infrastructures* 2019, 4, 48.

TEIXEIRA, E. C. *et al.* "**Estudo de concretos preparados com rcd e metacaulim.**" *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 63407-63414, 2020.

TRINCAL, Vincent, Stéphane Multon, Virginie Benavent, Hugo Lahalle, Bastien Balsamo, Amélie Caron, Raphaël Bucher, Laura Diaz Caselles, and Martin Cyr. "**Shrinkage Mitigation of Metakaolin-based Geopolymer Activated by Sodium Silicate Solution.**" *Cement and Concrete Research* 162 (2022): 106993. Web.

VIDAL, F. W. H. *et al.* "**Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento.**" Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

WAKABAYASHI, John. "**Clastic Sedimentary Rocks and Sedimentary Mélanges; Potential Naturally Occurring Asbestos Occurrences (amphibole and Serpentine).**" *Environmental & Engineering Geoscience* 26.1 (2019): 15-19. Web.

WANG, Hao, Jin-Hui Yang, Alfred Kröner, Yu-Sheng Zhu, and Rui Li. "**Non-subduction Origin for 3.2 Ga High-pressure Metamorphic Rocks in the Barberton Granitoid-greenstone Terrane, South Africa.**" *Terra Nova* (Oxford, England) 31.4 (2019): 373-80. Web.

WIJAYA, A. L.; EKAPUTRI, J. J.; TRIWULAN. "**Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste.**" *MATEC Web of Conferences*, v. 138, 2017.

WIJAYASUNDARA, Mayuri, Priyan Mendis, and Robert H Crawford. "**Integrated Assessment of the Use of Recycled Concrete Aggregate Replacing Natural Aggregate in Structural Concrete.**" *Journal of Cleaner Production* 174 (2018): 591-604. Web.

WITZKE, Franky Bruno; CORREIA, Sivaldo Leite; JUNIOR, Ronaldo A. Medeiros. **Abrasão superficial de concretos contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland.** *Revista Técnico-Científica*, n. 21, 2019.

WOJAHN, Rael Ernani. **Caracterização geológica-geotécnica de duas jazidas utilizadas para construção civil localizadas no batólito de Pelotas/RS.** 2018. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018.

WU, Yanguang, Bowen Lu, Tao Bai, Hao Wang, Feipeng Du, Yunfei Zhang, Lu Cai, Can Jiang, and Wenjun Wang. "**Geopolymer, Green Alkali Activated Cementitious Material: Synthesis, Applications and Challenges.**" *Construction & Building Materials* 224 (2019): 930-49. Web

XING, Z.; HAN, F.; TIAN, J.; XU, Z.; WANG, J.; LIU, T.; ZHENG, B.; HUANG, J. **Preparation and Characterization of the Functional Properties of Synthetic Aggregates from Silico-Manganese Slag.** *Materials* 2021, 14, 7303.

XUE, Xiao, Yun-Lin Liu, Jian-Guo Dai, Chi-Sun Poon, Wei-Dong Zhang, and Peng Zhang. "**Inhibiting Efflorescence Formation on Fly Ash-based Geopolymer via Silane Surface Modification.**" *Cement & Concrete Composites* 94 (2018): 43-52. Web.

YANG, Gaoxue, Yongjun Li, Lili Tong, Zuopeng Wang, and Guohao Si. "**An Early Cambrian Plume-induced Subduction Initiation Event within the Junggar Ocean: Insights from Ophiolitic Mélanges, Arc Magmatism, and Metamorphic Rocks.**" *Gondwana Research* 88 (2020): 45-66. Web.

YAO, X.; ZHANG, Z.; ZHU, H.; CHEN, Y. **Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry.** *Thermochimica Acta*, n. 493, p. 49-54, 2009.

ZAKKA, Wyom Paul, Nor Hasanah Abdul Shukor Lim, and Ma Chau Khun. "**A Scientometric Review of Geopolymer Concrete.**" *Journal of Cleaner Production* 280 (2021): 124353. Web.

ZANG, Z. H.; ZHU, H. J.; ZHOU, C. H.; WANG, H. **Geopolymer from kaolin in China: An overview.** *Applied Clay Science*, v. 119, p. 31-41, 2016.

ZHANG ZH, ZHU HJ, ZHOU CH, WANG H. **Geopolymer from kaolin in China: An overview**. Appl Clay Sci 2016;119:31–41. doi:10.1016/j.clay.2015.04.023.

ZHANG, M.; ZHAO, M.; ZHANG, G.; MANN, D.; LUMSDEN, K.; TAO, M. **Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water**. Construction and Building Materials, v. 124, p. 372-382, 2016.

ZHANG, Peng, Yuanxun Zheng, Kejin Wang, and Jinping Zhang. "**A Review on Properties of Fresh and Hardened Geopolymer Mortar**." Composites. Part B, Engineering 152 (2018): 79-95. Web.

ZHANG, Peng, Zhen Gao, Juan Wang, Jinjun Guo, Shaowei Hu, and Yifeng Ling. "**Properties of Fresh and Hardened Fly Ash/slag Based Geopolymer Concrete: A Review**." Journal of Cleaner Production 270 (2020): 122389. Web.

ZHANG, Peng; ZHENG, Yuanxun; WANG, Kejin; ZHANG, Jinping. **A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar**. Composites Part B: Engineering. Vol. 152, p. 79-95, 2018

ZHOU, Xueyao, Jin-Hai Yu, S.Y. O'Reilly, W.L. Griffin, Tao Sun, Xiaolei Wang, MyDung Tran, and DinhLuyen Nguyen. "**Component Variation in the Late Neoproterozoic to Cambrian Sedimentary Rocks of SW China – NE Vietnam, and Its Tectonic Significance**." Precambrian Research 308 (2018): 92-110. Web.

ZHU, Pinghua, Minqi Hua, Hui Liu, Xinjie Wang, and Chunhong Chen. "**Interfacial Evaluation of Geopolymer Mortar Prepared with Recycled Geopolymer Fine Aggregates**." *Construction & Building Materials* 259 (2020): 119849. Web.