



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE BAURU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

IVANA HELENA DE LA-ROCQUE SOARES

**ESTUDO DA ARGAMASSA DE GEOPOLÍMERO PARA FABRICAÇÃO DE
PLACAS CIMENTÍCIAS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS,
QUÍMICAS E DESEMPENHO AMBIENTAL**

**Bauru – SP
2022**

IVANA HELENA DE LA-ROCQUE SOARES

ESTUDO DA ARGAMASSA DE GEOPOLÍMERO PARA FABRICAÇÃO DE PLACAS
CIMENTÍCIAS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICAS, QUÍMICAS E
DESEMPENHO AMBIENTAL

Tese apresentada ao Programa Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, para obtenção do título de Doutora em Ciência e Tecnologia dos Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil.

Bauru – SP

2022

S676e

Soares, Ivana Helena de La-Rocque

Estudo de argamassa de geopolímero para fabricação de placas cimentícias :
características físicas, mecânicas, químicas e desempenho ambiental / Ivana Helena de La-
Rocque Soares. -- Bauru, 2022

92 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências,
Bauru

Orientador: Miguel Angel Ramirez Gil

Coorientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos

1. Argamassa de geopolímero. 2. Metacaulinita. 3. Eflorescência. 4. Placa cimentícia.
5. Desempenho ambiental. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências, Bauru. Dados
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE IVANA HELENA DE LA-ROCQUE SOARES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 09 dias do mês de dezembro do ano de 2022, às 10:00 horas, no(a) Sala da PROPESP/ UFAM, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de IVANA HELENA DE LA-ROCQUE SOARES, intitulada **Estudo da argamassa de geopolímero para fabricação de placas cimentícias: características físicas, mecânicas, químicas e desempenho ambiental**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta UNESP, Prof. Dr. EVERTON CARVALHO DOS SANTOS (Participação Virtual) do(a) Instituto de Física / Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. FRANCISCO XAVIER NOBRE (Participação Presencial) do(a) Departamento de Química e Meio ambiente / Instituto Federal do Amazonas, Professora Associada ELIDIANE CIPRIANO RANGEL (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciencia e Tecnologia - Campus de Sorocaba - Unesp, Dra. GÉSSICA ZILÁ BATISTA DOS SANTOS (Participação Presencial) do(a) Departamento de Sustentabilidade e economia circular / Flextronics Instituto de Tecnologia. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pois em todo o tempo estive e está comigo me orientando e dando discernimento para seguir o caminho certo. Sem Deus teria sido impossível essa jornada até aqui.

Agradeço, eternamente, aos meus pais Edinaldo Sebastião Dias Soares e Edylene Maria de La-Rocque Soares (*in memoriam*), pois me ensinaram que a maior herança deixada por eles seria o estudo. Por meio desse estudo veio o conhecimento que despertou em mim o interesse pela pesquisa. Não existe tesouro maior que possa superar o conhecimento.

Agradeço às minhas irmãs que contribuíram para essa obra, cada uma do seu jeito, com orações e paciência.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil, sempre muito solícito e incentivador, mesmo distante e com todas as dificuldades que surgiram quando não podíamos sair de casa por conta da pandemia.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos que conseguiu me direcionar e orientar sempre que foi necessário. Além de ter acompanhado o nascimento desse projeto quando eu ainda cursava o mestrado.

Agradeço aos colegas de Manaus, Profa. Me. Luz Marina Maruoka, que contribui, sem cansar, em conseguir laboratórios disponíveis para realizar alguns ensaios. Além do colega Franklin que elucidou minhas dúvidas de química.

Agradeço aos amigos que fiz em Guaratinguetá por torcerem por mim e aos amigos de Sorocaba, Profa. Dra. Elidiane Rangel e Prof. Dr. Nilson que além de me incentivarem, abriram o seu lar para o meu descanso e me deram alento e esperança.

Agradeço aos amigos de Belém, Florentino Mota nos socorros para comprar material para a pesquisa, Soraya Freitas por acreditar em mim e ser sempre leal e Alemar Rodrigues por ter conseguido um laboratório para fazer as dosagens.

Agradeço aos professores Dr. João de Almeida e Dra. Virgínia Mansanares, sempre dispostos ajudar em qualquer situação.

Agradeço à minha família espiritual em Manaus, na qual encontrei suporte para enfrentar com coragem todos os passos dados até aqui.

Agradeço aos técnicos Nilson e Jorge sempre muito solícitos no laboratório de dosagens.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Amazonas (FAPEAM) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

RESUMO

Diante do avanço tecnológico, em um mundo globalizado, quando o desempenho ambiental está em linha de colisão com as necessidades humanas, principalmente no que diz respeito ao destino dos resíduos, são necessárias pesquisas que busquem formas de atender a futura demanda por materiais com redução do impacto ambiental. Deste modo a substituição de materiais convencionais por alternativos que possam mitigar o impacto ambiental, é uma solução promissora. Dentre essas, a substituição de areia por resíduo plástico, em argamassas, apresenta-se como grande potencial. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar uma nova alternativa de produção de argamassa geopolimérica, utilizando caulim do estado do Amazonas e substituindo areia por resíduo plástico de polietileno de baixa densidade (PEBD), produzindo-se um novo material para a construção civil. O caulim foi beneficiado e caracterizado termicamente por meio de termogravimetria na temperatura de 650°C por 1 h e mostrou ser eficiente para a produção da metacaulinita. Assim, após a calcinação do caulim, a metacaulinita foi caracterizada por MEV, FRX, DRX com refinamento por Rietveld, análise de massa específica e granulometria. As demais matérias-primas, tal como a areia e o resíduo plástico, também foram caracterizadas por MEV, análise de massa específica e granulometria. As argamassas foram produzidas em dois grupos identificadas conforme o tipo de ativador alcalino e o teor de substituição de areia por resíduo plástico. Os dois grupos foram: GP-S geopolímero com ativador simples de hidróxido de sódio NaOH e o outro foi GP-C geopolímero com ativador composto de NaOH e silicato de sódio Na₂SiO₃. Os grupos de argamassa foram caracterizados de acordo com a sua resistência à compressão, porosidade, absorção de água, fases mineralógicas por DRX, morfologia por MEV e mecanismo de eflorescência. Os resultados mostraram que o grupo das argamassas GP-C a GP50-C teve o melhor desempenho de resistência à compressão com 22,69 MPa aos 28 dias, além de não terem formado eflorescência. A argamassa com melhor desempenho mecânico foi utilizada na produção da placa cimentícia que foi caracterizada quanto à resistência à tração na flexão. Além disso, a placa cimentícia foi estudada quanto ao ciclo de vida pelos métodos ReCipe 2016 *Midpoint/Endepoint* e EN 15804. A resistência à tração na placa GP50-C foi de 12,28 MPa. Na avaliação do ciclo da vida, o resíduo plástico mitigou o impacto na categoria do uso da terra em 10%. O uso da metacaulinita em relação ao cimento, se mostrou um material sustentável em cinco categorias. A produção de placa cimentícia de geopolímero de metacaulinita, com substituição da areia por resíduo plástico, contribui como uma alternativa sustentável que pode ser uma opção para mitigar os problemas ambientais ocasionados pelo descarte indevido dos materiais plásticos.

Palavras-chaves: Argamassa de geopolímero; metacaulinita; eflorescência; placa cimentícia; desempenho ambiental.

ABSTRACT

Given the technological advances, in a globalized world in which environmental performance is in line with human needs, especially with regard to the destination of waste, research is needed to find ways to meet the future demand for materials with reduced environmental impact. Thus, the replacement of conventional materials with alternatives that can mitigate environmental impacts is a promising solution. Among these, the replacement of sand by plastic waste in mortars presents itself as having great potential. In this context, the present work aimed to investigate a new alternative for the production of geopolymeric mortar, using kaolin from the state of Amazonas and replacing the sand with low density polyethylene (LDPE) plastic waste, in order to produce a new material for civil construction. The kaolin was processed and thermally characterized using thermogravimetry at a temperature of 650 °C for 1 h and was shown to be efficient for the production of metakaolinite. Thus, after calcination of the kaolin, the metakaolinite was characterized using SEM, XRF, XRD with refinement using the Rietveld method, specific mass analysis and granulometry. The other raw materials, such as sand and plastic waste, were also characterized using SEM, specific mass analysis and granulometry. The mortars were produced in two groups, which were identified according to the type of alkaline activator and the level of replacement of sand by plastic waste. The two groups were: the GP-S geopolymer with a simple sodium hydroxide (NaOH) activator and the other was the GP-C geopolymer with an activator composed of NaOH and sodium silicate (Na_2SiO_3). The mortar groups were characterized according to their compressive strength, porosity, water absorption, mineralogical phases using XRD, morphology using SEM and their efflorescence mechanism. The results showed that the group of GP-C to GP50-C mortars had the best compressive strength performance with 22.69 MPa at 28 days, in addition to not forming efflorescence. The mortar with the best mechanical performance was used in the production of cement plates, which were characterized in terms of tensile strength in bending. In addition, the cement plate was studied regarding its life cycle using the ReCipe 2016 Midpoint/Endpoint and EN 15804 methods. The tensile strength of the GP50-C plate was 12.28 MPa. In the life cycle assessment, plastic waste mitigated the impact on the land use category by 10%. The use of metakaolinite in relation to cement was shown to be a sustainable material in five categories. The production of metakaolinite geopolymeric cement plates, with replacement of sand with plastic waste, is a sustainable alternative that can be an option to mitigate environmental problems caused by improper disposal of plastic materials.

Keywords: Geopolymeric mortar; metakaolinite; efflorescence; cement plate; environmental performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organização estrutural dos geopolímeros - poli(sialato), poli(sialato-siloxo) e poli(sialato dissiloxo).	20
Figura 2 - Foto da reserva, local da coleta do caulim, no Estado do Amazonas, município de Presidente Figueiredo.	23
Figura 3 - Amostras de geopolímeros após o tratamento de cura imersa em água e contato com o ar, apresentam superfície com degradação por eflorescência em diferentes módulos de sílica e dosagem de álcalis.	27
Figura 4 - Estrutura para aplicação da placa cimentícia no sistema LSF (a) e aplicação das placas cimentícias em vedação externa da edificação (b).	29
Figura 5 – Fotografia de placas cimentícias avulsas em cores diversas (a); paredes de placas cimentícias em vedação interna em uma edificação (b).	29
Figura 6 - Foto de resíduos plásticos que foram lançados no oceano no pós-consumo.	31
Figura 7 - Produção mundial de resíduos plásticos e seu destino até o ano de 2017.	32
Figura 8 – Curva de projeção da produção global, em toneladas, na produção de plásticos vão até o ano de 2030.	33
Figura 9 – Mapa dos cinco maiores países que acumulam lixo nos oceanos.	34
Figura 10 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.	39
Figura 11 – Foto da reserva de caulim localizada na Rodovia BR 174, Manaus-Am.	40
Figura 12 – Fotos das amostras de areia (a) e flocos de resíduo plástico de PEBD (b).	40
Figura 13 – Foto das etapas do processo de beneficiamento do caulim, secagem dos torrões (1), destorroamento (2), lavagem por via úmida (3), material seco em estufa (4) e peneiramento por via seca (5).	42
Figura 14 – Foto do caulim calcinado (parte interna da mufla) (a) e o acondicionamento em sacos resseláveis, após o resfriamento do material (b).	43
Figura 15 - Foto das etapas do processo de produção das argamassas, mistura dos materiais secos (1), mistura da solução ativadora e materiais secos (2), mistura mecânica (3), moldagem da argamassa (4), adensamento (5), e cura à temperatura ambiente (6).	46
Figura 16 – Foto das argamassas dos grupos GP-S e GP-C sendo vertida nos moldes cilíndricos.	47
Figura 17 – Foto das amostras de geopolímeros que foram submetidas ao teste de eflorescência na condição ambiente (a) e em contato com água (b).	50

Figura 18 – Foto da placa cimentícia durante a moldagem (a) e após a moldagem em processo de secagem e endurecimento (b).	51
Figura 19 – Foto da placa após a moldagem e marcação dos cortes das amostras (a), amostra posicionada nos apoios do equipamento no ensaio de flexão (b), momento da fratura por flexão na amostra (c) e amostra fraturada (d).	52
Figura 20 - Curvas de TG (a) e DTA (b) do caulim.	54
Figura 21 – Difratoograma do caulim com modelo de cálculo HI (a), gráfico de refinamento Rietveld estrutural do caulim (b) e difratograma da metacaulinita (c).	56
Figura 22 - Micrografia das matérias-primas caulim (a), metacaulinita, com destaque em setas vermelhas (b), areia com destaque da porosidade em círculos vermelhos (c) e resíduo plástico (d).	58
Figura 23 - Sobreposição das curvas de granulometria das matérias-primas.	59
Figura 24 - Percentual de absorção de água e porosidade das argamassas GP-S (a) e GP-C (b) em função dos teores de substituição da areia por resíduo plástico.	61
Figura 25 - Resistência média à compressão em função do percentual de resíduo substituindo a areia em cada argamassa de geopolímero no grupo GP-S (a) e GP-C (b).	62
Figura 26 - Razões molares de Si/Al, H ₂ O/Na ₂ O e Na ₂ O/SiO ₂ para os geopolímeros GP-S e GP-C.	63
Figura 27 - DRX das argamassas do grupo GP-S.	66
Figura 28 - Difratoograma das argamassas do grupo GP-C.	67
Figura 29 - Rearranjo atômico tridimensional do geopolímero poli (sialato-siloxo).	68
Figura 30 - Morfologia das argamassas GP0-S (a ₁), GP50-S (a ₂), GP100-S (a ₃), GP0-C (a ₂), GP50-C (b ₂), GP100-C (b ₃) e ampliação da morfologia da metacaulinita não reagida (C ₁ , C ₂ e C ₃).	69
Figura 31 - Amostras após teste de fluorescência das argamassas GP-S e GP-C aos 7, 14 e 28 dias, secas ao ambiente (a) e submersas (b).	70
Figura 32 - DRX (a) e morfologia (b) da eflorescência formada nas argamassas GP-S.	72
Figura 33 Resistência à tração na flexão das placas cimentícias GP0-C e GP50-C em função dos resultados obtidos por Sá et al. (2016); Portela (2016) e Santos et al. (2021) quando utilizaram fibra vegetais como reforço.	73
Figura 34 - Caracterização de impacto ambiental da placa cimentícia GP0-C (figura 34a) e GP50-C (figura 35b) de acordo com o método EN 15804, com as seguintes categorias de impacto: 1. mudanças climáticas; 2. depleção de ozônio; 3. radiação ionizante; 4. formação fotoquímica de ozônio; 5. material particulado; 6. toxicidade humana não cancerígena; 7.	

toxicidade humana cancerígena; 8. Acidificação; 9. eutrofização da água doce; 10. eutrofização marinha; 11. eutrofização terrestre; 12. ecotoxicidade da água doce; 13. uso da terra; 14. uso da água; 15. uso de recursos fósseis; 16. uso de minerais e metais; 17. mudanças climáticas – fóssil; 18. mudança climática – biogênico; 19. mudança climática – uso da terra e mudança do uso da terra; 20. toxicidade humana não cancerígena – orgânica; 21. toxicidade humana não cancerígena – inorgânica; 22. toxicidade humana não cancerígena - metais; 23. toxicidade humana cancerígena – orgânica; 24. toxicidade humana cancerígena – inorgânica; 25. toxicidade humana cancerígena – metais; 26. ecotoxicidade da água doce – orgânicos; 27. ecotoxicidade da água doce – inorgânico e 28. ecotoxicidade da água doce – metais.....73

Figura 35 - Caracterização de impacto ambiental da placa cimentícia GP0-C (figura 35a) e GP50-C (figura 35b) de acordo com o método ReCipe 2016 com as seguintes categorias de impacto: 1. Aquecimento global; 2. Destruição da camada de ozônio; 3. Radiação ionizante; 4. Formação de ozônio (saúde humana); 5. Formação de partícula fina da matéria; 6. Formação de ozônio (ecossistema); 7. Acidificação terrestre; 8. Eutrofização da água doce; 9. Eutrofização marinha; 10. Ecotoxicidade terrestre; 11. Ecotoxicidade da água doce; 12. Ecotoxicidade marinha; 13. Toxicidade humana cancerígena; 14. Toxicidade humana não cancerígena; 15. Uso da terra; 16. Escassez de fonte mineral; 17. Escassez de recursos fósseis e 18. Consumo de água.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de resistência à flexão em MPa segundo a ABNT 15498 (2021).	30
Tabela 2 - Dosagem dos materiais para produção das argamassas em gramas.	45
Tabela 3 - Níveis, fatores e identificação das argamassas para ANOVA com um fator.	49
Tabela 4 - Dados do inventário para produção de 1 m ² de placa cimentícia de argamassa	53
Tabela 5 - Composição química da metacaulinita.	57
Tabela 6 - Características físicas das matérias-primas.	59
Tabela 7 - Percentual de perda de massa das argamassas no período da cura aos 14 e 28 dias.	60
Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos pela ANOVA nas argamassas do grupo S e C.	64
Tabela 9 - Resultados do teste Tukey.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo da Vida
Al_2O_3	Óxido de alumina
Al	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaO	Óxido de cálcio
CP	Corpo de prova
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DRX	Difratometria de raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
Fe_2O_3	Óxido de ferro
FRX	Fluorescência de raios X
GP-C	Geopolímero de ativador composto
GP-S	Geopolímero de ativador simples
$^{\circ}\text{C}$	Graus celcius
H_2O	Água
ISO	International Organization Standardization
K_2SiO_3	Silicato de potássio
K-A-S-H	Gel à base de potássio
K_2O	Óxido de potássio
LSF	Light Steel frame
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MS	Módulo de sílica
Mol	Molar
NaOH	Hidróxido de sódio
Na_2O	Óxido de sódio
Na_2SiO_3	Silicato de sódio
N-A-S-H	Gel à base de sódio
Na_2CO_2	Carbonato de sódio
pH	Potencial hidrogeniônico
P_2O_5	Óxido de fósforo

PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Politereftalato de etileno
PE	Polietileno
PVC	Policloreto de vinila
PP	Polipropileno
Si	Silício
SiO ₂	Óxido de silício
TG	Termogravimetria
Ti	Titânio
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 GEOPOLÍMEROS	19
2.1.1 Síntese dos geopolímeros	19
2.1.2 Matéria-prima como fonte de aluminossilicato.....	22
2.1.3 Ativadores alcalinos	24
2.1.4 Formação da eflorescência	25
2.2 PLACAS CIMENTÍCIAS.....	28
2.2.1 Aplicação na construção.....	28
2.3 RESÍDUOS PLÁSTICOS E SUA IMPORTÂNCIA PARA A CONSTRUÇÃO	31
2.4 ANÁLISE DO CICLO DA VIDA	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Materiais.....	40
3.2 Métodos.....	41
3.2.1 Beneficiamento do caulim.....	41
3.2.2 Caracterização do caulim	42
3.2.3 Caracterização do caulim calcinado	43
3.2.4 Caracterização dos agregados (resíduo de PEBD e areia).....	44
3.2.5 Dosagem das argamassas de geopolímero	45
3.2.6 Produção e cura das argamassas.....	46
3.2.7 Caracterização das argamassas de geopolímero.....	48
3.2.8 Produção da placa cimentícia.....	50
3.2.9 Caracterização placas cimentícias	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Termogravimetria do caulim	54
4.2 DRX do caulim e da metacaulinita.....	55
4.3 Composição química da metacaulinita por FRX.....	57
4.4 Microestrutura das matérias-primas	57
4.5 Granulometria a laser das matérias-primas	58
4.6 Cura das argamassas de geopolímeros	60
4.7 Absorção e porosidade das argamassas de geopolímero.....	60
4.8 Resistência à compressão das argamassas de geopolímero.....	61
4.9 Identificação das fases por DRX nas argamassas de geopolímero.....	65

4.10 Microestrutura das argamassas.....	68
4.11 Teste da eflorescência	70
4.12 Resistência à tração na flexão das placas cimentícias	72
4.13 Avaliação do ciclo da vida	73
CONCLUSÕES.....	78
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a necessidade do homem durante a sua evolução em criar abrigos que pudessem protegê-lo, levou a humanidade, de forma empírica, a fazer grandes descobertas a partir de materiais disponíveis na natureza. Essas descobertas culminaram na utilização de rochas erodidas misturadas ao aglomerante de argila e carbonato (FIRDOUS *et al.*, 2018). O resultado disso foram materiais de excelente durabilidade que permanecem com suas características até hoje e fazem parte do patrimônio histórico. Com isso, pesquisas têm sido desenvolvidas para entender o comportamento desses materiais e a sua durabilidade ao longo do tempo.

De acordo com Palomo *et al.* (2014), a durabilidade dos materiais pode estar relacionada à mineralogia desses materiais ancestrais, tendo em vista a riqueza no armazenamento do alumino silicato alcalino hidratado. Partindo desse princípio, Davidovits (2013) estudou um material para ser usado como aglutinante cimentício denominado geopolímero, obtido a partir da ativação alcalina de alguns materiais com presença de aluminossilicatos, tais como: metacaulinita, cinza volante, escória de alto forno, entre outros.

Os geopolímeros produzidos a partir da metacaulinita têm demonstrado resultados de resistência à compressão com potencial para serem utilizados como materiais de construção sustentáveis (BAI *et al.*, 2018; BERNAL *et al.*, 2013), pois, na produção dos geopolímeros, a metacaulinita é uma das matérias-primas mais utilizadas porque é obtida por meio da calcinação do caulim, que ocorre a temperaturas moderadas entre 650 a 800°C. Essa alternativa, quando comparada à produção do cimento *Portland*, contribui para redução da quantidade de CO₂ liberado na atmosfera (DAVIDOVITS, 2013). A nomenclatura geopolímero, designada por Davidovits, surgiu a partir da observação da semelhança das condições que governam a síntese dos plásticos fenólicos (orgânicos). A partir dessa comparação, Davidovits formulou um composto inorgânico de base polimérica que resulta em um gel com propriedades cimentícias.

A caulinita está presente em algumas argilas e possui uma composição teórica de 46,54 % de óxido de silício (SiO₂), 39,5% óxido de alumínio (Al₂O₃) e 13,96% de água (H₂O). É um material estável em condições normais, porém quando aquecido, a sua estrutura se desordena e forma um material parcialmente amorfo com reatividade pozolânica (SEVERO *et al.*, 2013; MARQUES *et al.*, 2014; FRIAS *et al.*, 2019).

Em termos de reserva de caulim, no Brasil, a região amazônica destaca-se por possuir camadas espessa de solos argilosos que abrangem jazidas ainda pouco exploradas, como é o

caso da região metropolitana de Manaus. O caulim obtido destas jazidas tem mostrado potencial para produção de metacaulinita, pois apresenta elevado grau de pureza, para aplicação como geopolímero ou substituição parcial na produção de compósitos cimentícios, tais como placas e telhas para a construção (MARQUES *et al.*, 2014; OIKAVA *et al.*, 2018). Neves (2018) produziu metacaulinita utilizando caulim coletado na BR 174, localização 5°10.2'S 60°01'58.7"W, em Presidente Figueiredo, na região metropolitana de Manaus, sendo constatada a alta reatividade da metacaulinita.

O processo de produção de geopolímeros, ocorre por meio da ativação alcalina da matéria-prima de aluminossilicato com soluções alcalinas que podem ser: hidróxido de sódio, hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio ou silicato de sódio (ROY, 1999). Durante a síntese dos geopolímeros, a mistura dos ativadores com a matéria-prima, provoca a dissolução dos aluminossilicatos, devido ao meio com alto potencial hidrogeniônico (pH), em que é possível hidrolisar a superfície das partículas das matérias-primas e dissolver certa quantidade de sílica e alumínio (SEVERO *et al.*, 2013).

Quanto à cura dos geopolímeros, essa pode ocorrer à temperatura ambiente ou por fonte de calor. Estudos realizados com a cura térmica variando de 40 a 95°C, nas primeiras idades, tem apresentado resultados com altas resistências à compressão, pois a cura prévia em estufa acelera a geopolimerização com dissolução da estrutura amorfa da metacaulinita (WIANGLOR *et al.*, 2017). Outros estudos também mostram que é possível obter altas resistências com a cura ambiente aos 28 dias chegando a equiparar-se à cura térmica para as concentrações de 12, 15 e 18 mol/L de hidróxido de sódio (VASSALO *et al.*, 2014).

A preocupação quanto à durabilidade dos materiais, no sentido de torná-los longevos, vai ao encontro de um assunto delicado que é o desempenho ambiental. Pensar em inovação dos materiais pode ser uma grande oportunidade para integrar questão ambiental e social em termos de destino de resíduos sólidos. Assim sendo, essa pesquisa além de trazer a proposta de produzir argamassa de geopolímero a partir de caulim da Amazônia, também propõe utilizar o resíduo de plásticos para substituir a areia em teores parciais e totais. Isso se justifica pelo agravamento na geração de resíduos do pós-consumo, ocasionado pelo aumento do consumo de produtos plásticos. Conforme Geyer *et al.* (2017), estimasse-se que o volume do consumo de plástico, mundialmente, pode chegar até 550 bilhões de toneladas métricas em 2030. Isso representa 40% a mais do que já é consumido atualmente. Esse cenário futuro pode provocar um grande impacto ambiental, caso não sejam implantadas as devidas medidas para mitigar o problema.

Um dos resíduos plásticos que crescem, principalmente em volume, é o polietileno de baixa densidade (PEBD), material muito utilizado na produção de sacolas plásticas, embalagens de bebidas e comidas (HARIADI *et al.*, 2021). Pesquisadores já têm se mobilizado em realizar estudos utilizando resíduos plásticos em geral, para substituir agregados em argamassas para aplicação na construção civil, tal como enchimento de vigas para reabilitação de estruturas, agregado fino em concreto, entre outros, contribuindo para o desenvolvimento sustentável (BAHORIA, *et al.* 2018; BINICI, 2013).

A utilização do resíduo plástico substituindo a areia também tem como objetivo mitigar o impacto ambiental causado pela utilização da areia em argamassas e concreto. A areia é extraída das margens dos rios, sendo um material caro devido ao custo excessivo do transporte. Além disso, a extração em grande escala provoca esgotamento dos recursos naturais, situação comum no Norte do Brasil, principalmente na Amazônia onde a areia é extraída de rios e lagos (BAHORIA *et al.*, 2018).

Outro fator que desperta o interesse, quanto à redução no consumo da areia, é o fato de ser um material não renovável, isso faz com que a substituição por polímeros tais como: borrachas, plásticos e outros, seja um destaque em pesquisas no campo da construção civil (CANELLA, 2005). Outrossim, é uma responsabilidade dos grupos de pesquisa, desenvolver formas inovadoras para agregar valor aos resíduos poliméricos que ainda não apresentam viabilidade técnica ou financeira (GRILLO, 2016).

Dessa forma, essa pesquisa trouxe como proposta principal, contribuir para mitigar os impactos ambientais gerados pelo uso da areia, fonte não renovável, muito utilizada na produção de argamassas e concretos, por resíduo plástico, grande causador de impacto ambiental no pós-consumo. Assim sendo, utilizando materiais da região metropolitana de Manaus, tal como o caulim e resíduo plásticos de PEBD oriundos de sacolas plásticas, foram produzidas argamassas geopoliméricas utilizando ativadores alcalinos simples e composto substituindo areia por resíduo plástico com teores de 0, 50 e 100%. Com a argamassa geopolimérica de melhor comportamento físico-mecânico foi preparada uma placa cimentícia que foi caracterizada quanto ao comportamento físico, mecânico. Pela Análise do Ciclo da Vida (ACV) foi estudado o potencial sustentável da placa cimentícia.

Em vista disso, a originalidade dessa pesquisa, foi a utilização do resíduo de PEBD, de sacolas plásticas, pois ainda é uma opção negligenciada, como alternativa na substituição da areia em argamassas de geopolímero. A pesquisa também tratou de um tema pouco explorado, em termos de desempenho ambiental, a ACV em geopolímeros, principalmente nas pesquisas

que propõe a utilização de resíduos. Propõe-se por fim, fornecer subsídios à comunidade científica para preencher as lacunas observadas na revisão bibliográfica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GEOPOLÍMEROS

2.1.1 Síntese dos geopolímeros

Historicamente, o homem sempre teve a necessidade de criar para si habitações que pudessem resguardá-lo e fossem duráveis. Assim, essa necessidade associada aos materiais disponíveis na natureza e ao empirismo, levou a humanidade às grandes descobertas. Um grande exemplo disso, são as pedras artificiais criadas a partir de rochas magmáticas, já erodidas, unidas com aglutinante obtido por meio de argila e sais de carbonato (FIRDOUS *et al.*, 2018).

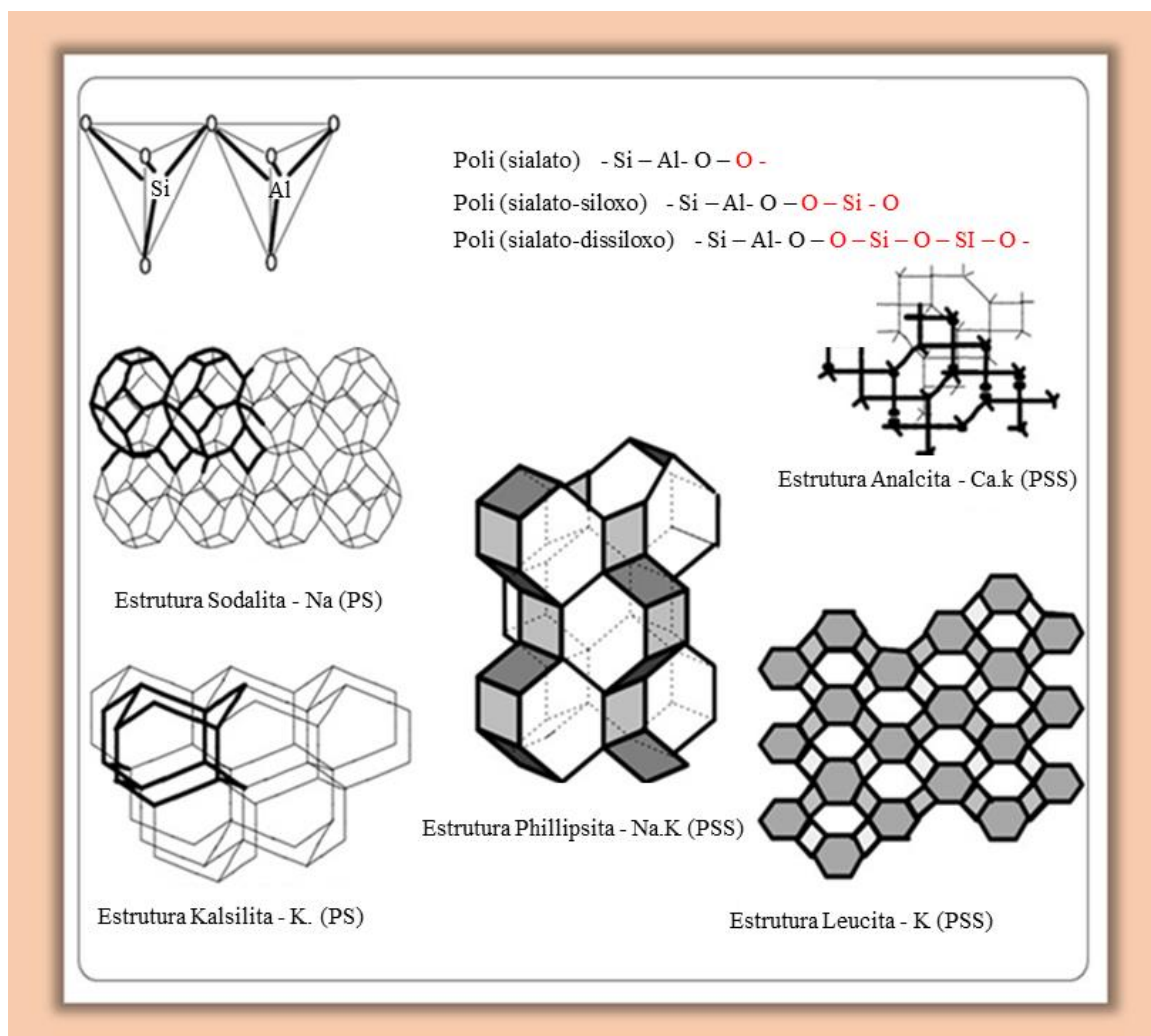
A excelente durabilidade dos cimentos antigos, que hoje fazem parte do patrimônio histórico, conduz a um volume considerável de pesquisas para determinar as razões dessa durabilidade, pois esses cimentos permanecem até hoje em bom estado. A durabilidade de muitas estruturas antigas pode estar associada à mineralogia dos cimentos utilizados na época e, particularmente, ao armazenamento de alumino silicato alcalino hidratado (PALOMO *et al.*, 2014).

Partindo desse ponto, Davidovits, cientista francês na área de materiais, desenvolveu uma análise sobre materiais ancestrais, que permitiu o estudo das variações sofridas ao longo dos períodos de tempo, além de oferecer dados sobre a evolução mineralógica e o mecanismo de cristalização. Os estudos culminaram na produção de um tipo de cimento denominado de geopolímero, isso ocorreu na década de 1970 e desde então, Davidovits passou a ser considerado o pioneiro na síntese de materiais aluminossilicatos em solução alcalina, para obter um polímero inorgânico (DAVIDOVITS, 2011).

Geopolímeros, de acordo com Longhi *et al.* (2020), estão incluídos no grupo dos álcali-ativados, sendo que esses são produzidos na presença de aluminossilicatos com elevado teor de óxido de cálcio (CaO) com aproximadamente 40% em massa. Contudo, os geopolímeros se diferem dos álcali-ativados por utilizar matérias-primas com elevados teores de aluminossilicatos e reduzido teor de CaO. A reação de ambos não ocorre por meio da água, pois os aluminossilicatos precisam de uma solução aquosa de elevado potencial hidrogeniônico (pH) para realizar a dissolução.

Davidovits (1991) descreve em seus estudos a geopolimerização como um processo que ocorre a partir da ativação alcalina das matérias-primas compostas por aluminossilicatos que formam ligações poliméricas de Si-O-Al. Essas ligações, durante a síntese, geram uma reorganização estrutural formando o poli(sialato) do tipo (Si-O-Al-O), poli(sialato-siloxo) do tipo (Si-O-Al-O-Si-O) e poli(sialato dissiloxo) do tipo (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O), conforme ilustrado na Figura 1 (DAVIDOVITS, 1991).

Figura 1 - Organização estrutural dos geopolímeros - poli(sialato), poli(sialato-siloxo) e poli(sialato dissiloxo).



Fonte: Davidovits (1991) adaptado.

O sialato é uma abreviação do silício-oxo-aluminato, terminologia adotada por ser uma rede composta de silicato (SiO_4) e aluminato (AlO_4) que estão conectados em uma estrutura tetraédrica e compartilham átomos de oxigênio, formando assim, uma grande cadeia molecular com uma estrutura semicristalina (DAVIDOVITS, 2020).

O gel alcalino hidratado formado na geopolimerização é estabilizado por um cátion alcalino Na^+ ou K^+ conforme o tipo de ativador utilizado na síntese, isso resulta no gel de aluminossilicato de sódio hidratado N-A-S-H ou aluminossilicato de potássio hidratado K-A-S-H. Trata-se de um gel ordenado e composto por ligações tridimensionais em que o resultado do produto da reação pode apresentar propriedades mecânicas similares ou até maiores que os cimentos tradicionais (LONGHI *et al.*, 2020; PROVIS E BERNAL, 2014).

A partir da patente dos resultados da pesquisa de Davidovits, acerca da ativação alcalina da metacaulinita, as investigações sobre álcali ativados tiveram um crescimento exponencial (RASHAD, 2013). A produção de um novo material com propriedades ligantes, vai ao encontro da necessidade de se obter materiais alternativos que possam mitigar o impacto ambiental quanto à emissão de CO_2 na atmosfera.

O cimento *Portland*, altamente consumido na indústria da construção em concretos e argamassas, é um dos maiores responsáveis pela emissão de CO_2 na atmosfera. Isso ocorre porque a produção de cimento requer uma temperatura elevada para decompor o calcário, emitindo grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2019; O MUNDO DO CIMENTO, 2021).

Conforme Assi *et al.* (2016) e Sudagar *et al.* (2016), a busca pela substituição do cimento *Portland* por cimentos álcali ativados está relacionada à redução de até 15% do consumo de energia (CAO *et al.*, 2017; VAN DEVENTER *et al.*, 2012). De acordo com McLellan *et al.* (2011), os geopolímeros produzidos sem aquecimento externo, alcançaram a resistência desejada e quando comparados ao cimento *Portland*, apresentaram uma redução de 44 a 64% nos gases lançados no ambiente.

Tendo em vista que o geopolímero é uma opção de material sustentável com propriedades cimentantes, pesquisadores têm buscado novas alternativas na substituição do cimento *Portland*. Partindo desse princípio, a síntese de geopolímeros envolve as mais diversas matérias-primas como fonte de aluminossilicatos, assim como as mais variadas dosagens e combinações de ativadores alcalinos que fornecem resultados diferentes, conforme relatado em diversos estudos da literatura (SHARMIN *et al.*, 2017; RASHAD, 2013; SANTANA *et al.*, 2020 E SUN *et al.*, 2020).

Para entender a síntese dos geopolímeros, é preciso conhecer o processo que envolve três etapas: primeiramente o óxido de alumínio Al_2O_3 dissolve-se e, na segunda etapa, de uma forma mais lenta, dissolve-se o óxido de silício SiO_2 que estão presentes na matéria-prima. Por fim, na última etapa ocorre a condensação e os íons formam um gel amorfo (ROZECK *et al.*, 2019).

Os principais parâmetros de controle durante a produção de geopolímeros, além da composição química da matéria-prima, são a temperatura e tempo de cura, quantidade de água e a solução alcalina ativadora (AZEVEDO *et al.*, 2018; BIGNOZZI *et al.*, 2014; GORHAN *et al.*, 2014).

2.1.2 Matéria-prima como fonte de aluminossilicato

Quanto às matérias-primas como fonte de aluminossilicatos, essas são consideradas de baixo custo e podem ser obtidas a partir de minerais de resíduos industriais, tais como: cinza da casca do arroz, escória de alto-forno, cinzas volantes, ou minerais naturais sendo a mais utilizada a metacaulinita (ZANG *et al.*, 2016; DAVIDOVITS, 1991; SHARMING *et al.*, 2017).

De acordo com Poon *et al.* (2001), a metacaulinita é uma pozolana utilizada desde a década de 1990 e esse argilomineral, rico em óxidos de silício SiO_2 e de alumínio Al_2O_3 , é considerado uma matéria-prima ideal para formação de geopolímeros. Além do mais, apresenta um melhor desempenho na geopolimerização, devido a sua natureza parcialmente amorfa, quando comparado a outros precursores (LAHOTI *et al.*, 2017).

A caulinita está presente em algumas argilas, principalmente do tipo caulim, e possui uma composição teórica de 46,54% de óxido de silício (SiO_2), 39,5% óxido de alumínio (Al_2O_3) e 13,96% de água (H_2O). Trata-se de um material estável em condições normais e, quando aquecida, a sua estrutura se desordena e forma um material parcialmente amorfo com reatividade pozolânica (SEVERO *et al.*, 2013; MARQUES *et al.*, 2014; FRIAS *et al.*, 2019).

Os caulins são formados pelo empilhamento de lamelas, conhecido também como folhas, de tetraedros de sílica para octaedros de gibsite que estão ligados entre si. O processo para obtenção da metacaulinita inicia-se com o beneficiamento do caulim, seguido de um tratamento térmico para transformar caulinita, um mineral de estrutura cristalina, contido no caulim, em metacaulinita a uma temperatura em torno de 650 a 700°C, quando o grupo da hidroxila é quase totalmente removido do caulim.

Assim, conforme a afirmação de Granizo *et al.* (2000), após o tratamento térmico ocorre a saída das hidroxilas, que ligam os átomos de alumínio, provocando uma mudança no número da coordenação atômica, reduzindo a estabilidade da caulinita transformando-a em metacaulinita, material mais reativo em meios alcalinos capaz de produzir geopolímeros com estrutura mais resistente e com melhor qualidade (NORTON, 1975).

De acordo com Rashad (2013) a temperatura de calcinação é uma variável importante convertendo caulinita em metacaulinita. Temperaturas de 500, 550, 600 e 650°C por 1 h, foram

estudadas na ativação térmica da caulinita por Taylor-Lange *et al.* (2012) no qual, 650°C se mostrou ser a mais eficiente em termos de alta porcentagem de desidroxilação maior a 85%.

A metacaulinita industrializada é muito utilizada na síntese de geopolímeros como por exemplo: MetaMax-BASF em Longhi *et al.* (2020) e Lahoti *et al.* (2017), Metacaulinita do Brasil por Santana *et al.* (2020) e Caballero *et al.* (2019), entre outros. Contudo, existe uma variedade muito grande de caulins, que possuem elevados teores de caulinita, com potencial para produzir metacaulinita de alta reatividade, principalmente na região norte do Brasil. Isso já foi observado quando, em termos de reserva de caulim (figura 2), o estado do Amazonas, município de Presidente Figueiredo, se destacou como segundo no *ranking* nacional, mas essas reservas ainda são pouco exploradas (BARBOSA, 2019; CPRM, 2016).

Figura 2 - Foto da reserva, local da coleta do caulim, no Estado do Amazonas, município de Presidente Figueiredo.



Barbosa (2019), em sua pesquisa, caracterizou o caulim oriundo da formação Alter do Chão, na BR 174 de acesso de Presidente Figueiredo, município de Manaus-Am, no intuito de produzir metacaulinita para ser utilizada como material cimentício suplementar (MCS) na substituição parcial do cimento. O MCS é utilizado para aumentar a resistência do cimento e contribuir para diminuir a liberação de CO₂. A composição química do material apresentou

elevados teores de Al_2O_3 e SiO_2 e pouco quartzo, indicando potencial para produzir metacaulinita reativa.

2.1.3 Ativadores alcalinos

Em termos de reação alcalina da metacaulinita, o tipo de ativador e a sua concentração, são fatores importantes que podem impactar diretamente na microestrutura e propriedades do produto obtido (RASHAD, 2013). Conforme Longhi *et al.* (2020), diferente do cimento *Portland*, a reatividade nos geopolímeros, ocorre a partir da reação com soluções de elevado pH alcalino, tais como: solução de hidróxido de sódio NaOH ou hidróxido de potássio KOH, ou combinados com silicato de sódio Na_2SiO_3 ou de potássio K_2SiO_3 e outros (FRIAS *et al.*, 2019). A alcalinidade do ativador permite a dissolução dos aluminossilicatos da matéria-prima, o que possibilita a formação de um gel com propriedades cimentantes.

Portanto, buscando uma significância entre os parâmetros de mistura que afetam as propriedades mecânicas do geopolímeros de metacaulinita, Lahoti *et al.* (2017) estudaram a razão molar de Si/Al, Al/Na, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ e a razão de massa água/sólidos. O ativador alcalino foi uma combinação de NaOH e Na_2SiO_3 . Lahoti *et al.* (2017) concluíram que a razão molar Si/Al foi o parâmetro mais significativo na determinação da resistência à compressão e, diferentemente do cimento *Portland*, o menos significativo foi a razão água/sólidos. A maior resistência obtida no estudo foi de 78,96 MPa para uma razão de Si/Al = 2,26 e a menor resistência de 3,58 MPa foi para a razão de 4,42, chegando a 0 MPa para uma razão de 6,34.

Semelhantemente à pesquisa anterior, Santana *et al.* (2020) estudaram em argamassas geopoliméricas os parâmetros de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e areia/metacaulinita e como estes influenciam a resistência mecânica, porosidade e abatimento. O ativador alcalino utilizado foi a combinação de NaOH e Na_2SiO_3 com módulo de sílica $\text{MS} = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,81$. Os resultados demonstraram que as molaridades de NaOH de 9,02 e 9,23 apresentaram as maiores resistências de aproximadamente 26 MPa, enquanto que a menor resistência foi observada para a molaridade de 11,23 com aproximadamente 5 MPa. Foi destacado também uma forte correlação linear negativa entre a porosidade e a água, pois durante a dissolução dos aluminatos e silicatos, parte da água que não é ligada aos compostos do geopolímero é liberada em outra fase da geopolimerização deixando para trás os poros.

Rocha (2017) estudaram a influência dos ativadores alcalinos de sódio e potássio e as suas combinações com silicato de sódio e silicato de potássio em argamassa geopoliméricas de metacaulinita. O comportamento mecânico e térmico foram analisados em argamassas

produzidas na razão de 1:1 (metacaulinita para areia), variando apenas os ativadores utilizados, de: silicato de sódio e hidróxido de sódio (s.Na-h.Na), silicato de sódio com hidróxido de potássio (s.Na-h.K), silicato de potássio com hidróxido de potássio (s.K-h.K) e silicato de potássio com hidróxido de sódio (s.K-h.Na). A areia utilizada foi a extraída de leito do rio e seu módulo de finura foi de 2,51 com massa específica de 2,64 g/cm³. Os resultados demonstraram que na idade de 28 dias de cura, que o melhor comportamento mecânico foi do ativador s.Na-h.Na com 79,7 MPa para razões molares de $H_2O/Na_2O = 11$ e $SiO_2/Al_2O_3 = 3$.

Os autores observaram que os ativadores influenciaram significativamente a microestrutura das argamassas. O uso de silicato de sódio gera heterogeneidade microestrutural e muitos poros o que ocasiona uma perda de massa maior e aparecimento de microfissuras, resultado de uma ativação rápida com ganhos de resistências nas primeiras idades, mas com prejuízo da matriz. Entretanto, as argamassas produzidas com silicato de potássio apresentaram uma estrutura mais homogênea com poucos poros, sugerindo uma fase gel mais densa e com melhor estabilidade térmica em altas temperaturas. Assim sendo, os autores puderam inferir que, o comportamento das argamassas foi influenciado pelo tipo de solução de ativação alcalina, pois a reação mais lenta e uniforme do silicato de potássio, contribuiu para um ganho de resistência ao longo das idades de cura.

2.1.4 Formação da eflorescência

Como qualquer outro material, os geopolímeros também estão suscetíveis à formação de manifestações patológicas. A eflorescência é um dos problemas mais importantes que ocorrem durante o uso dos geopolímeros, além de causar danos estéticos na superfície, compromete as propriedades físicas, pois causam profunda degradação do concreto e corrosão das armaduras. Desta forma alguns estudos foram desenvolvidos buscando mitigar esse fenômeno.

O mecanismo de eflorescência ocorre por meio da combinação dos processos de lixiviação e carbonatação, quando os álcalis não reagidos na geopolimerização, migram para a superfície do geopolímero por lixiviação e evaporam deixando para trás os sais que cristalizam quando entram em contato com o CO₂ da atmosfera. Assim, o resultado é a formação de um precipitado de carbonato de sódio do ativador de hidróxido de sódio NaOH ou carbonato de potássio do hidróxido de potássio KOH (XUE *et al.*, 2018).

De acordo com Zhang *et al.* (2014), o grau de porosidade do material é um potencial para formação da eflorescência, tendo em vista que, por meio da estrutura porosa ocorre à lixiviação dos álcalis.

Partindo desse princípio, alguns autores têm pesquisado a eflorescência buscando formas de mitigar esse fenômeno em geopolímeros de metacaulinita. Ademais, diversos fatores que constituem a durabilidade dos geopolímeros, ainda necessitam ser entendidos (LONGHI *et al.*, 2020).

Conforme Zhang *et al.* (2014), para entender o mecanismo de eflorescência, além da observação visual, é necessário estudar o DRX do material coletado na superfície da amostra, pois a eflorescência é um carbonato alcalino hidratado $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e podem existir carbonatos de sódio similares contendo diferentes quantidades de H_2O . Isso vai depender da temperatura e umidade do ar que exercem influência na entrada e saída de água do produto, favorecendo a cristalização dos sais (SANI *et al.*, 2016).

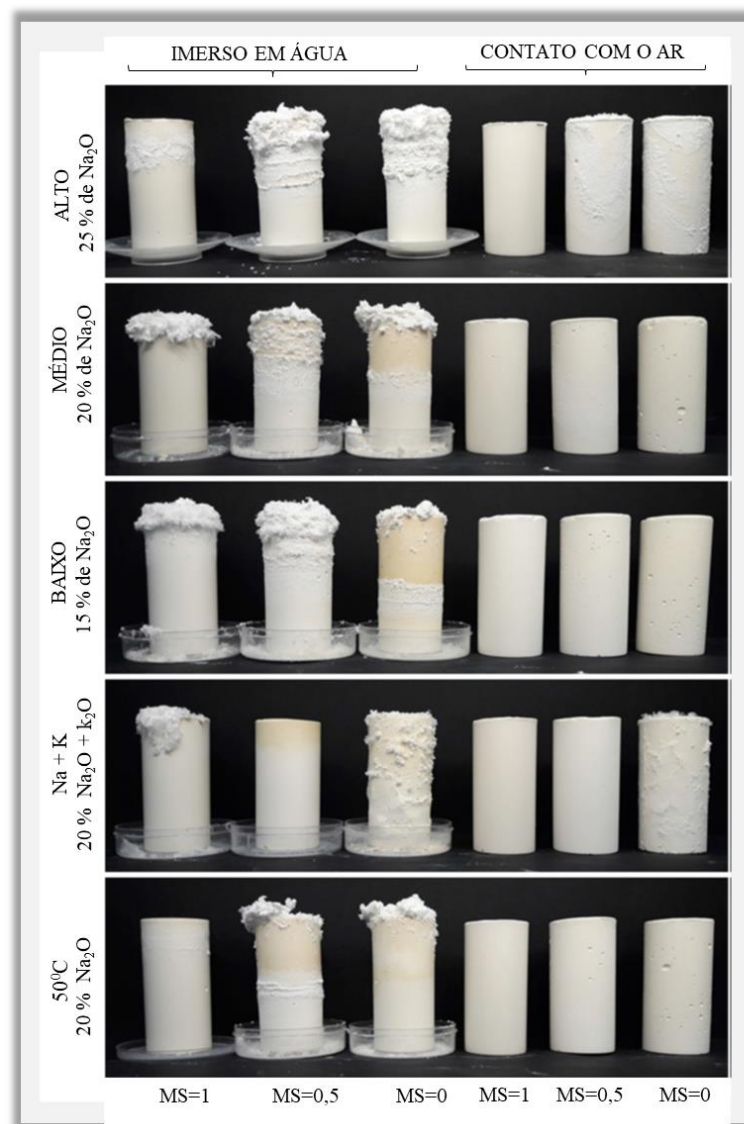
SKVÁRA, *et al.* (2009) explicam que, os cátions alcalinos Na^+ que compensam a falta do ânion tetraédrico AlO_4 , quando ficam retidos em excesso na estrutura do geopolímero, migram para a superfície e reagem com o CO_2 atmosférico. Isso ocorre porque a ligação do Na^+ na estrutura do alumínio é fraca, o que explica a formação dos lixiviados.

Buscando investigar uma forma de controlar a eflorescência em geopolímero de metacaulinita, Simão *et al.* 2021, utilizaram o método de controle da eflorescência com foco no ajuste da composição das razões molares da matéria-prima, preservando as propriedades mecânicas. Assim sendo, as amostras foram produzidas fixando a razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em 3,58, razão em massa de $\text{H}_2\text{O}/\text{MK} = 0,72$. A razão molar de $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ variou de 1,1 a 0,9. As soluções ativadoras foram a mistura de NaOH a 10 mol/L e Na_2SiO_3 .

Os resultados mostraram a formação da eflorescência a razão molar $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,1 e 1,0 com poucas manchas esbranquiçadas, diferentemente da amostra com razão molar de 0,9 que não apresentou essa formação. Contudo, a razão molar de 0,8 e 0,7 formou uma eflorescência mais intensa. A maior resistência à compressão, foi de aproximadamente 20 MPa, aos 28 dias de cura, para a razão molar igual a 1,0. A resistência diminuiu à medida que, proporcionalmente, diminuía o conteúdo de NaOH resultando em 7,5 MPa para a razão molar de 0,7. Os autores observaram que a diminuição do Na_2O afetou a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, quando a solução de NaOH foi diminuindo na mistura, o que reduziu a resistência à compressão e formou a eflorescência. Contudo, o maior teor de sódio além de facilitar a geopolimerização, formou uma estrutura mais densa e mitigou a eflorescência.

Longhi *et al.* (2020) realizaram um teste acelerado de aparecimento da eflorescência para estudar o grau de degradação em geopolímeros de metacaulinita. Os ativadores utilizados foram: NaOH e a combinação de NaOH com Na_2SiO_3 . As amostras foram identificadas conforme o conteúdo de sódio em percentual de massa para 15, 20 e 25 de Na_2O , considerados baixos, médio e alto teor de, respectivamente. A variação do módulo de sílica $\text{MS}=\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$, a letra M representa o álcali K^+ ou Na^+ foram de: 0; 0,5 e 1. Além disso, foram produzidas outras amostras combinando 20% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ e outra com 20% Na_2O e aquecimento a 50°C (figura 3).

Figura 3 - Amostras de geopolímeros após o tratamento de cura imersa em água e contato com o ar, apresentam superfície com degradação por eflorescência em diferentes módulos de sílica e dosagem de álcalis.



Fonte: Longhi *et al.* (2020).

O teste acelerado consistiu em submeter os geopolímeros, após 28 dias de cura, em duas condições, sendo uma parcialmente imersa em água com 5 mm de altura, que era substituída todos os dias no intuito de permitir os ciclos de umedecimento e secagem, assim como a lixiviação dos álcalis. A outra condição foi a exposição ao ambiente, para permitir a lixiviação alcalina e assim aumentar a difusão de CO₂ na solução de poros, conforme ocorre na carbonatação natural.

Os resultados da degradação pela formação da eflorescência mostraram que, as amostras com 25% de Na₂O e MS de 0,5 e 0, quando expostas às condições ambientais, apresentaram maior formação de eflorescência. Contudo, nas amostras que continham maior quantidade de silicato solúvel com MS = 1, expostas ao ambiente, não mostraram nenhuma formação de eflorescência. Assim sendo, os autores deduziram que a adição do silicato solúvel no ativador, inibiu a formação da eflorescência.

Quanto às amostras parcialmente imersas em água, estas apresentaram um significativo aumento na formação da eflorescência, contudo a formação mais agressiva ocorreu nas amostras em que o Na⁺ foi a única fonte de álcali, nesse caso, das amostras com MS = 0. Os autores concluíram que, o silicato solúvel no ativador deixou a matriz mais densa e menos impermeável o que tornou mais difícil a migração dos álcalis livres para a superfície dos geopolímeros. Isso reduziu a extensão da lixiviação dos álcalis e inibiu a eflorescência.

2.2 PLACAS CIMENTÍCIAS

2.2.1 Aplicação na construção

A construção a seco tem crescido nos últimos anos no Brasil com as inovações trazidas dos Estados Unidos. Dessas tecnologias, destacam-se as placas cimentícias utilizadas como parede, forro, revestimento, entre outros. No processo construtivo das placas há uma redução expressiva de resíduos de entulho gerado pela perda de materiais, pois se trata de uma tecnologia de pré-moldados que, no canteiro de obras, requer somente a mão de obra de montagem (SILVA, 2004).

As placas cimentícias são aplicadas ao sistema construtivo do *Light Steel Frame* (LSF) que já tem sido muito utilizado na América do Norte. O LSF (figura 4a) é composto por uma estrutura de perfis metálicos em que as placas cimentícias são fixadas.

Essas placas são produzidas por meio do processo, denominado internacionalmente, *Open Mesh*. Nesse processo a pasta de cimento e seus aditivos são reforçadas por duas telas de fibras de vidro que são aplicadas nas duas faces das placas e a cura é realizada em ambiente aberto

(PLACLUX, 2022). A figura 4b mostra a aplicação da placa no LSF como alvenaria de vedação externa.

Figura 4 - Estrutura para aplicação da placa cimentícia no sistema LSF (a) e aplicação das placas cimentícias em vedação externa da edificação (b).



Fonte: Portal Metálica (a) e F3 Construções (b)

As placas cimentícias apresentam vantagens de facilidade de manuseio que as tornam um material versátil com variedade na cor natural do cimento ou coloridas (figura 5a) e na aplicação como elementos de vedação interna (figura 5b), acabamento externo, fechamento de *shafts*, revestimento de paredes e elemento de divisão sanitária (AZEVEDO^b, 2018).

Figura 5 – Fotografia de placas cimentícias avulsas em cores diversas (a); paredes de placas cimentícias em vedação interna em uma edificação (b).



Fonte: Telhaton (a) e Fercal Forros e Divisórias (b).

A norma brasileira NBR 15498 (2021), de placas cimentícias tem os requisitos e métodos de ensaios e divide as placas em duas classes (tabela 1):

Classe A – são placas indicadas na aplicação de ambientes externos pela exposição direta ao sol, chuva, calor e umidade. São classificadas em quatro categorias, conforme sua resistência à tração na flexão.

Classe B – São placas indicadas na aplicação interna e externa não sujeitas à ação direta do sol, chuva e umidade. São classificadas em cinco categorias conforme a resistência à tração na flexão. Essas placas, quando utilizadas em ambientes externos, devem receber tratamento contra intempéries.

A NBR 15498 (2021) também descreve o procedimento de ensaio de densidade, índice de vazios, de absorção de água, e outros.

Tabela 1 - Requisitos de resistência à flexão em MPa segundo a ABNT 15498 (2021).

Categoria	Classe da placa	
	A	B
1	-	4
2	4	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

As placas cimentícias são constituídas de cimento *Portland*, agregados naturais (areia) e fibras sintéticas. Destes materiais, destacam-se o cimento e a areia por serem muito consumidos na construção civil. Apesar do cimento *Portland* ser o material aglutinante mais conhecido e utilizado hoje em dia nas argamassas e concretos, outros materiais estão sendo introduzidos como materiais complementares de cimentação, tanto para reduzir o impacto ambiental quanto para melhorar seu desempenho em relação à durabilidade (MIKHAILENKO *et al.*, 2018).

Além do cimento, a construção civil também demanda grande volume de agregado fino (areia). Esse agregado é extraído das margens dos rios e é um material caro devido ao custo excessivo do transporte.

Diante de tal realidade, essa pesquisa apresenta a proposta sustentável de substituir o cimento por outro material com propriedades aglutinantes obtidos a partir do geopolímero de metacaulinita, além da substituição da areia por resíduo plástico de PEBD.

2.3 RESÍDUOS PLÁSTICOS E SUA IMPORTÂNCIA PARA A CONSTRUÇÃO

A crescente demanda na produção de materiais plásticos teve um aumento considerável nas últimas décadas, tendo em vista a versatilidade na sua aplicação. Entre os polímeros que mais se destacam estão o Polipropileno (PP), Polietileno (PE), Poli (cloreto de vinila) (PVC), Poliestireno (PS) e poli (tereftalato de etileno) (PET) (CAIXETA *et al.*, 2018).

Contudo o consumo do plástico remonta a década de 1950, em vista disso, pensar em um mundo sem plásticos é simplesmente inimaginável e o crescimento de sua utilização só perde para o cimento e o aço, materiais muito utilizados na construção (USGS, 2021).

O desejo de consumo em relação ao plástico é devido às suas propriedades, tais como: baixo peso, baixa manutenção, resistência às intempéries, entre outras, que possibilitam a sua aplicação nas atividades da indústria, comércio e agrícola (ALI *et al.*, 2021; JENKIS *et al.*, 2019; AMOBONYE, *et al.*, 2021). Todavia, o resíduo gerado no pós-consumo dos plásticos gera um grande impacto ambiental, principalmente quando lançados em aterros e lixões. Devido ao descarte inadequado, as águas das chuvas arrastam esses resíduos para córregos, rios, riachos e outros, indo parar nos oceanos (figura 6).

Figura 6 - Foto de resíduos plásticos que foram lançados no oceano no pós-consumo.

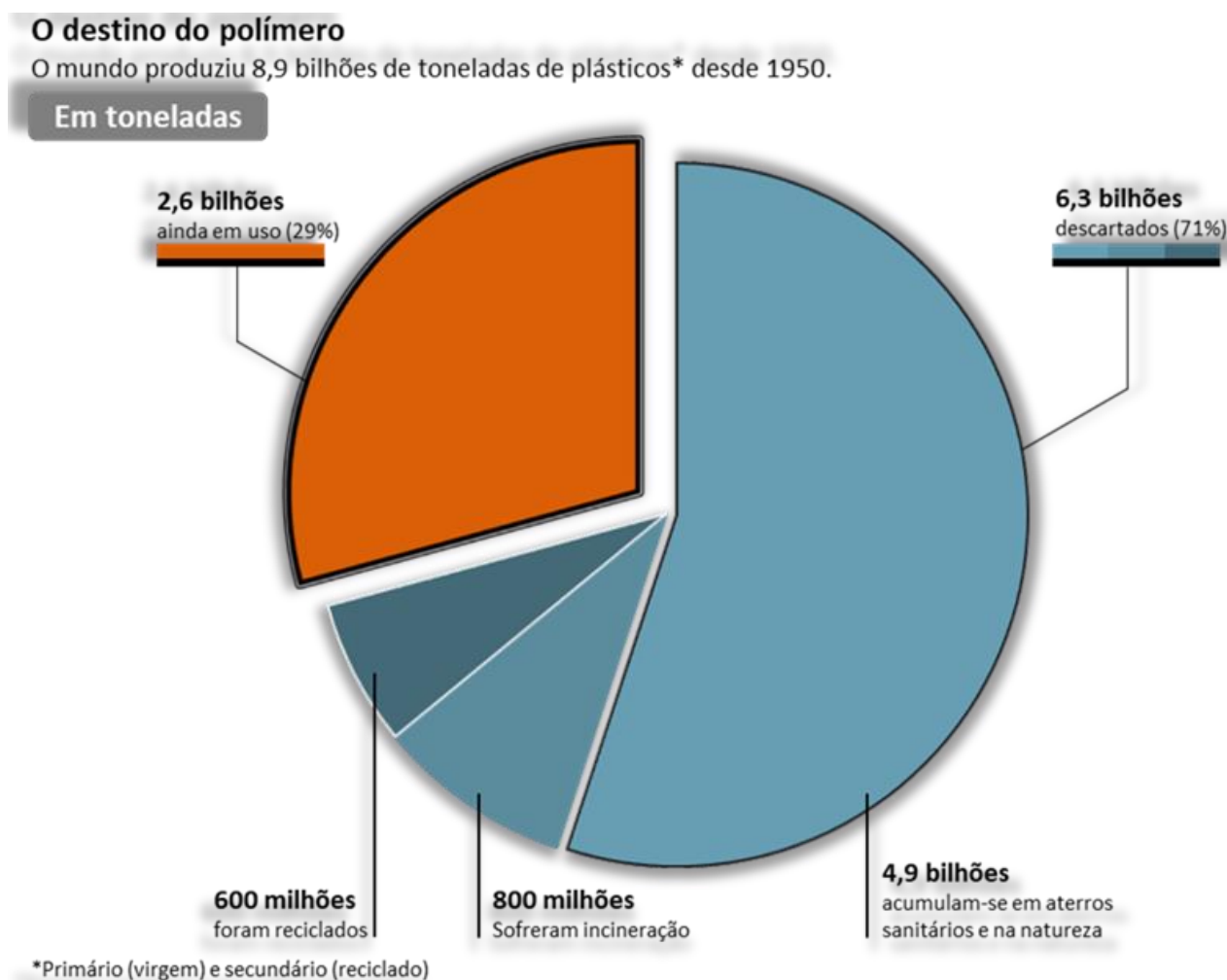


Fonte: Silveira (2018).

De acordo com Geyer em 2017, o destino dos resíduos lançados, mundialmente em aterros sanitários e na natureza, teve um acúmulo de 4,9 bilhões de toneladas desde a década de

1950. Ao observar o gráfico na figura 7, dos 6,3 bilhões de toneladas de resíduos descartados, aproximadamente 77% foram parar em aterros sanitários e na natureza. Além disso, menos de 10% foram reciclados, revelando que ainda existe uma lacuna no gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos no mundo.

Figura 7 - Produção mundial de resíduos plásticos e seu destino até o ano de 2017.



Fonte: Geyer et al. (2017).

Conforme os dados mais atuais, a geração de resíduos plásticos para 2020 foi estimada em 400 milhões de toneladas métricas, sendo que 8,8 milhões foram parar no oceano, afirmam (SERRANO-RUIZ *et al.*, 2021; ALI *et al.*, 2021). Contudo, Geyer (2017) fez uma projeção de que a produção de plásticos para 2030 será de 550 milhões de toneladas métricas, conforme mostra o gráfico na figura 8. Observando o crescimento ao longo dos 66 anos a partir de 1950,

há um crescimento exponencial que tende a ser maior no intervalo de 2016 a 2030. Esse é um indicador do quanto a geração dos resíduos plásticos, no pós consumo, poderá gerar um impacto ambiental maior do que o apresentado no gráfico da figura 8.

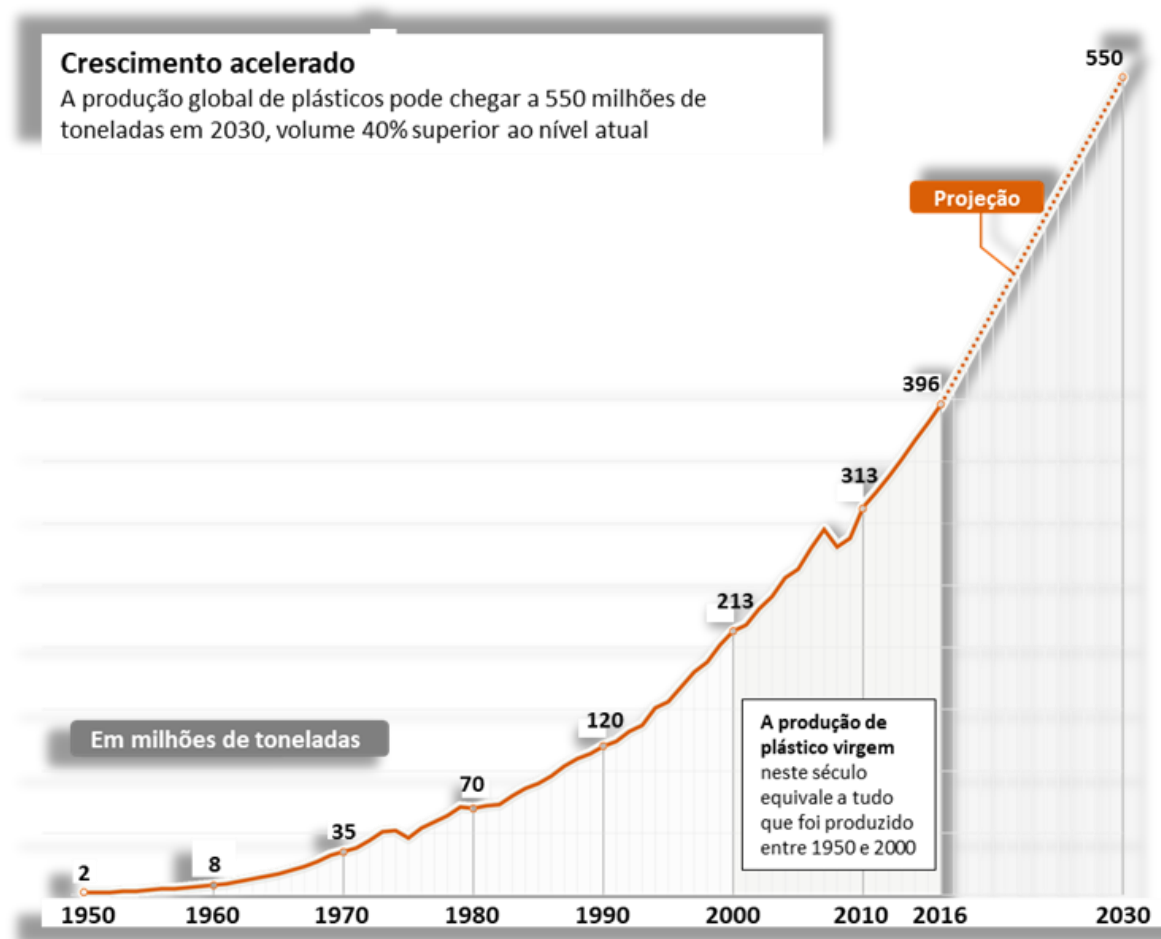


Figura 8 – Curva de projeção da produção global, em toneladas, na produção de plásticos vão até o ano de 2030.

Fonte: Geyer *et al.* (2017)

Percebe-se então que, a geração de resíduos é inerente à sociedade humana moderna e, dessa forma, o gerenciamento desses não é uma questão nova. O que mudou foram os tipos de resíduos, o método para eliminá-los, o entendimento do que fazer com eles e os valores humanos (JASSIM, 2017).

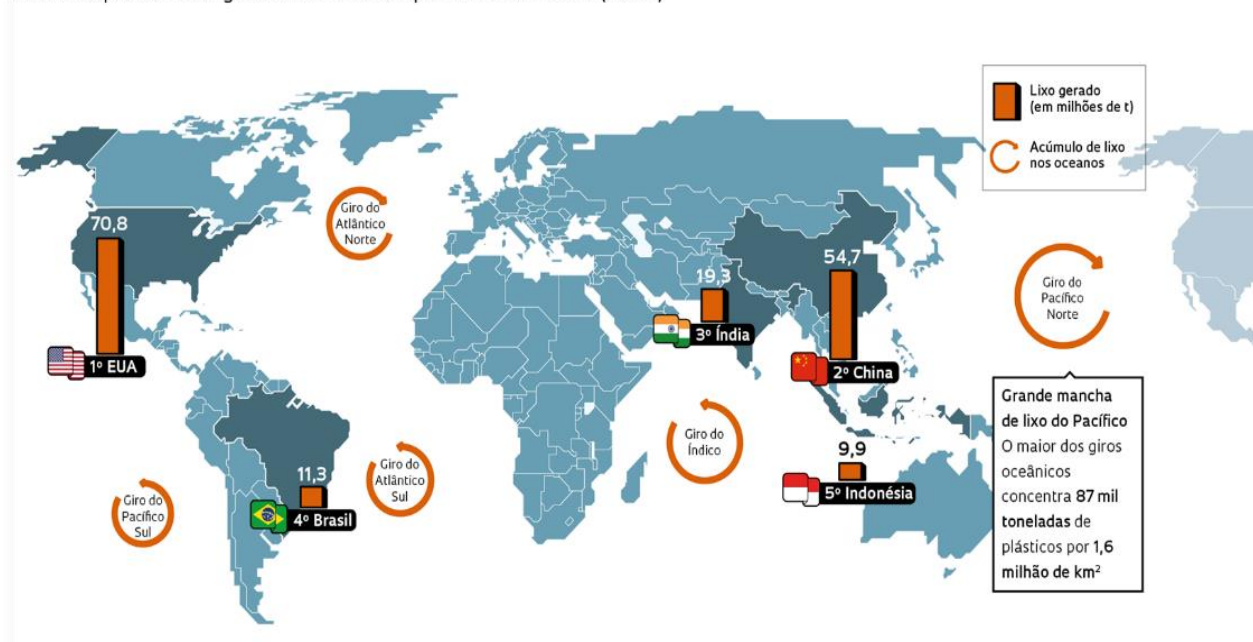
Entre os plásticos mais utilizados, destaca-se o polietileno de baixa densidade (PEBD), um polímero com densidade entre 0,91 a 0,94 g/cm³ e muito resistente em temperaturas abaixo de 60°C. É um material amplamente usado na produção de sacolas plásticas, embalagem de bebidas, comidas e outros (HARIADI *et al.*, 2021).

Todas essas vantagens convergem para o grande volume na utilização do PEBD, contribuindo para o aumento na geração de resíduos. Em consequência disso, o gerenciamento e a destinação dos resíduos plásticos, das atividades pós-consumo, têm sido um desafio global para o meio ambiente (BOGHOYATA E ARORA, 2019).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi responsável pela mudança do cenário do país, em virtude da contribuição dos municípios com a coleta seletiva, que saltou de 443 em 2010 para 927 toneladas em 2014, mas esse panorama dos resíduos sólidos não é considerado positivo, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (SILVA, 2018 e ABRELPE 2018). Segundo Geyer (2017), o Brasil está em 4º lugar como gerador de resíduo entre os cinco maiores países que acumulam lixo nos oceanos (figura 9)

Figura 9 – Mapa dos cinco maiores países que acumulam lixo nos oceanos.

Brasil é o quarto maior gerador de resíduos plásticos do mundo (2016)



Fonte: Geyer *et al.* (2017)

Em 2016 o Brasil tinha 3.326 municípios que destinavam seus resíduos sólidos para locais impróprios, contribuindo com cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos que vão parar nos oceanos todos os anos (RASHAD, 2013). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no perfil dos municípios brasileiros, pouco mais da metade (54,5%) possuem o Plano Integrado de Resíduos Sólidos (ECO, 2018).

A questão dos resíduos sólidos no Brasil antes e depois da lei de PNRS, em termos de resultados, demonstraram que mesmo após a implantação da referida lei, o Brasil ainda fica em quinto lugar como sendo o maior produtor de resíduos sólidos do mundo. Dos 30% de resíduos que tem potencial para reciclagem, apenas 3% seguem esse destino (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2018).

A reciclagem dos resíduos de plásticos é importante, pois prolonga o ciclo de vida do material, e pode agregar valor ambiental com boas práticas de gestão. Assim, o impacto ambiental é uma boa razão para que muitos pesquisadores estudem um melhor uso dos resíduos para substituir os materiais convencionais na fabricação de argamassas e concreto, assim como no desenvolvimento de novos materiais e produtos para construção (HITA *et al.*, 2018).

Para Grillo (2016) é uma responsabilidade das entidades de pesquisa, desenvolver formas atraentes para agregar valor aos resíduos poliméricos que ainda não apresentam viabilidade técnica ou financeira.

Percebe-se que o descarte de resíduos plásticos é um grande causador de impacto ambiental o que se torna um grande problema devido à sua baixíssima biodegradabilidade. Em vista disso, a busca por métodos alternativos no descarte de resíduos, vem resultando em pesquisas importantes (TAPKIRE *et al.*, 2014). Uma das alternativas pesquisadas acerca da utilização do resíduo plástico, é a sua utilização como agregado para a construção em materiais cimentícios à base de cimento *Portland* (BINICI *et al.*, 2013; THORNEYCROFT *et al.*, 2018; HITTA *et al.*, 2018; BAHORIA *et al.*, 2018).

Contudo, quando se trata de concretos e argamassas à base de geopolímero, as pesquisas ainda abordam muito pouco sobre a utilização de plásticos reciclados (NUAKLONG, 2018; BHOGAYATA, 2019) e, na grande maioria das vezes, é utilizado o Poli (tereftalato de etileno) (PET) em vez do PEBD, tal como na pesquisa de KUNTHAWATWONG *et al.* (2022). Os autores produziram argamassa de geopolímero de cinzas volantes com resíduo de PET substituindo a areia em teores de 0, 10, 20, 30 e 40%. As soluções ativadoras utilizadas foram NaOH a 10 mol/L e Na₂SiO₃ e a razão de água para cinzas volantes foi de 0,7. Os resultados obtidos nas propriedades mecânicas foram de 42,7; 24; 20,9; 15,1 e 12,8 MPa na compressão

para os teores de 0, 10, 20, 30 e 40%, respectivamente. O mesmo aconteceu com a resistência a flexão que foi reduzida de 7 MPa na argamassa de referência até 2,3 MPa para o teor de 40%. Os autores concluíram que aumento no teor do resíduo de PET substituindo a areia, reduziu as propriedades mecânicas, aumentou a porosidade e absorção de água.

Diante do exposto, observa-se uma lacuna nos estudos de aproveitamento do resíduo plástico, principalmente quanto ao uso de PEBD, sendo esse um dos mais descartados no ambiente devido ao seu alto consumo e vida útil reduzida. Além disso, a utilização do resíduo plástico como um componente na construção, torna-se uma alternativa sustentável (JASSIN *et al.*, 2017; BINICE *et al.*, 2013).

Assim, tendo em vista que o PEBD tem se tornado um dos maiores geradores de resíduos, essa pesquisa trouxe, como já mencionado, a proposta da substituição da areia por resíduo de PEBD, na produção de argamassa de geopolímero na produção de um material para a construção, tal como placas cimentícias aplicadas em vedação ou revestimento interno, incluindo o benefício de ser um material sustentável.

2.4 ANÁLISE DO CICLO DA VIDA

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia descrita na norma ISO 14040 (2006) que permite uma abordagem consistente ao avaliar o impacto ambiental causado por materiais, produtos ou tecnologias. Trata dos aspectos com potencial de impacto ambiental, tais como a aquisição da matéria-prima, produção, uso, tratamento após o uso e reciclagem com destino final (NBR ISO 14040 e 14044, 2009; SANTOS *et al.*, 2022).

Além disso a ACV serve para a declaração de certificação em nível 3 (selo ambiental) que requer um estudo que abrange todo o ciclo da vida, utilizado em empresas *business to business*, quando o selo é solicitado pelo importador ao produtor internacional, sem que essa ação seja uma barreira alfandegária (AMBIENTE MELHOR, 2022)

Outras aplicações da ACV são: informar ao cliente em termos de gestão de produtos, onde estão os gargalos para tomada de ações que possam mitigar os impactos, identificar riscos na cadeia produtiva em termos de pegada de carbono, evitar o *greenwashing* considerado como uma estratégia de *marketing* de promover propagandas e ações sustentáveis que na prática não se sustentam, ajudar na economia circular, contribuir na gestão de fornecedores, em aplicação de políticas públicas e promover o *benchmark* ambiental (comparação dos produtos).

Para isso, um inventário do fluxo de materiais e energia, relevante ao longo de todo o processo é avaliado quanto aos impactos ambientais ao longo do ciclo da vida (WEIL *et al.*, 2009). A ACV compreende quatro etapas:

Primeiro o objetivo e segundo a aplicação desejada na análise que determina o grau de precisão de um estudo conforme a modelagem, ex.; do berço ao túmulo, do berço ao portão ou do portão ao portão. A terceira e quarta etapas compreendem o inventário e sua análise que designa as entradas e saídas, pertinentes ao produto ou sistema de serviços. Na entrada são consideradas a energia e matéria-prima e, na saída, as emissões para o ar, água e terra que traduzem os potenciais impactos.

Dreyer *et al.* (2003), citam algumas categorias que são indicadores frequentemente usados na ACV, tais como: potencial de esgotamento abiótico (PEA), potencial de aquecimento global (PAG), potencial de acidificação (PA), potencial de eutrofização (PE), potencial de toxicidade humana (PTH) e potencial de destruição de ozônio (PDO).

Como potencial substituto do cimento *Portland*, em termos de redução na emissão de carbono, os aglomerantes geopoliméricos mostram vantagens ao ambiente, de um modo particular, em relação ao menor consumo de energia e menor emissão de CO₂ (GERALDO *et al.*, 2017). Contudo os materiais álcali ativados têm sido investigados na literatura, abordando o desempenho ambiental devido à alta energia incorporada dos produtos químicos (ativadores alcalinos), utilizados na síntese (BIANCO, *et al.*, 2021).

Yang *et al.* (2013) estudaram três tipos de concreto álcali-ativados utilizando como aglutinante a escória de alto forno, cinzas volantes e metacaulinita, cimento *Portland* e cimento *Portland* com material cimentício suplementar (MCS). Dessa forma foi estabelecida uma comparação dos indicadores da intensidade de CO₂ e as etapas do estudo abrangeram o ciclo de vida do berço à pré-construção.

O inventário foi constituído dos materiais, aglutinantes, agregados, aditivos químicos, ativadores alcalinos, e água considerada na produção de 1 m³ de concreto. O transporte incluiu o deslocamento dos materiais até a central de concreto e desta até a obra. O estudo utilizou para análise o banco de dados construído na Coreia o *Korean Lifecycle Inventory*. Os resultados mostraram que a emissão de CO₂ é mais significativa em concreto à base de cimento *Portland* CP do que para álcali ativados e aumenta conforme a resistência à compressão. A redução de emissão de CO₂ pode variar entre 55 e 75%, dependendo do tipo, concentração e dosagem dos ativadores utilizados na síntese. Quanto ao cimento + MCS a emissão de CO₂ foi de 80 % quando a resistência do concreto é superior a 40 MPa.

Alguns estudos focam na análise da pegada de carbono, tendo em vista o efeito estufa pela emissão mundial do CO₂ na atmosfera. Contudo, conforme Santos *et al.* (2022), em estudos mais recentes, a abordagem dos impactos ao meio ambiente utiliza o método de avaliação da vida aceito em todo mundo pela ISO (NBR ISO 14040 e 14044, 2009), no qual a abordagem é bem mais criteriosa em termos de categoria de impacto.

Em termos de método para ACV o ReCipe 2016 *Midpoint/Endpoint* é um dos mais citados e recomendado além da norma europeia EN 15804, como foi observado por Santos *et al.* (2022). O ReCipe 2016 tem uma perspectiva hierárquica e global com cálculo de 18 indicadores de impacto e o método pela EN 15804 calcula 28 categorias de impacto

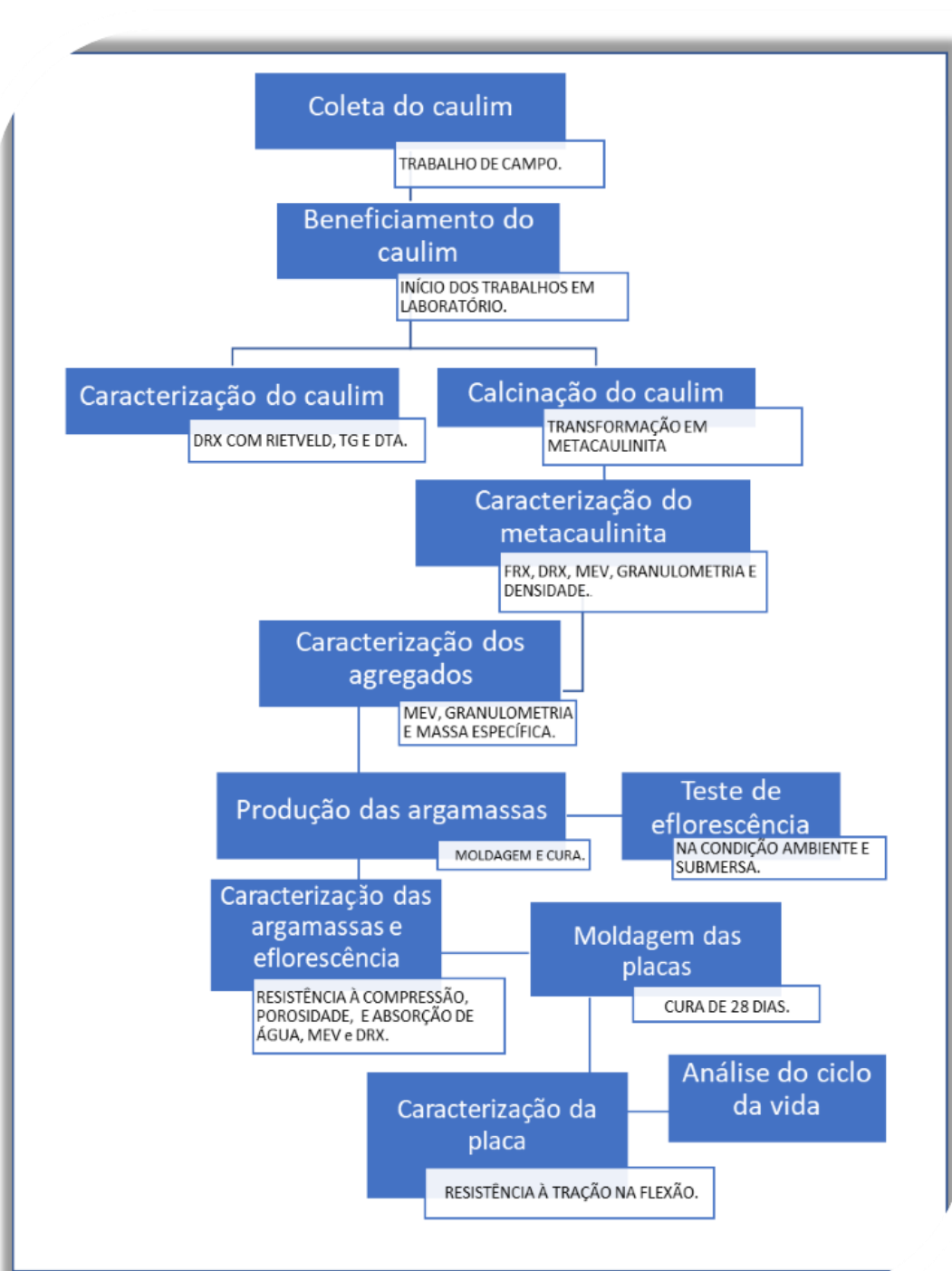
Entende-se, com isso que, a necessidade da ACV é uma ferramenta importante quando a proposta de produzir um material sustentável, não é somente a redução na emissão de CO₂ no ambiente. Existem outros aspectos que necessitam ser analisados e que possam oferecer subsídios para outros estudos que tratam de assuntos similares.

Para essa pesquisa foi utilizado os dois métodos, EN 15804 e ReCipe 2016 com a finalidade de estabelecer uma comparação e uma melhor discussão quanto aos aspectos de impacto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor elucidar como essa pesquisa foi desenvolvida, a figura 10 apresenta os passos seguidos na forma de fluxograma.

Figura 10 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.



3.1 Materiais

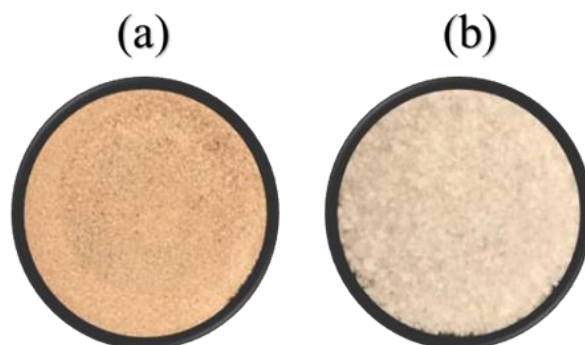
A figura 11 mostra a reserva de caulim material utilizado nessa pesquisa, localizada no município de Presidente Figueiredo na região metropolitana de Manaus com seu acesso realizado pela Rodovia BR 174. As coordenadas de localização dessas reservas são 2035'09.22"S e 60001'56".83O.

Figura 11 – Foto da reserva de caulim localizada na Rodovia BR 174, Manaus-Am.



A areia utilizada foi de leito de rio (figura 12a) e o resíduo plástico (figura 12b) de polietileno de baixa densidade (PEBD) foram adquiridos na região comercial de Manaus.

Figura 12 – Fotos das amostras de areia (a) e flocos de resíduo plástico de PEBD (b).



O resíduo plástico de PEBD, foi coletado na fábrica Reciclagem Amazonas na forma de flocos, que representa a penúltima etapa no processo de reciclagem antes da extrusão para formar os grãos. O material é procedente da coleta seletiva realizada na cidade de Manaus e passou por um processo de lavagem e separação. A lavagem removeu a sujeira e a separação classificou os materiais quanto à densidade.

Após a lavagem, o resíduo passou por um fragmentador de facas e depois por uma peneira de malha 8 mm e outra de 5 mm. Tendo em vista essa última malha de peneira, o resíduo coletado nesse estudo pode ser considerado um micro plástico de resíduo, também conhecido como *pellets*, devido ao tamanho da partícula < 5 mm, segundo (TURRA, 2014).

Os ativadores utilizados nesta pesquisa na síntese do geopolímero, se apoia na literatura estudada, na qual o NaOH é o mais utilizado em função do custo reduzido quando comparado a outros ativadores. O NaOH foi adquirido na *Nox Solutions*, na forma de escamas, com 99% de pureza. A solução foi preparada dissolvendo o NaOH em água destilada a uma concentração de 12 mol/L, adotada conforme a pesquisa de Vassalo (2014). A solução foi resfriada à temperatura ambiente por 24 h. O outro ativador foi o silicato de sódio Na_2SiO_3 da Quimidrol, sendo que o módulo de sílica (MS) fornecido pelo fabricante foi a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0,94$ ($\text{Na}_2\text{O} = 14,5\%$, $\text{SiO}_2 = 31,5\%$) em massa.

Assim sendo, as argamassas foram nomeadas conforme os teores de substituição da seguinte forma: GP0-S, GP50-S, GP100-S e GP0-C, GP50-C e GP100-C, sendo 0, 50 e 100% de substituição da areia por resíduo plástico. A letra S foi adotada para o grupo das argamassas com ativador simples de NaOH e a letra C para o grupo com ativador composto de NaOH e Na_2SiO_3 .

3.2 Métodos

3.2.1 Beneficiamento do caulim

A figura 13 mostra como foi realizado o beneficiamento do caulim, de acordo com as seguintes etapas: secagem dos torrões por 7 dias a temperatura ambiente para reduzir a umidade (1); destorroamento manual (2) e lavagem por via úmida em peneira *Tyler 200* (3). Esse procedimento auxiliou na remoção das impurezas e da fração de areia presente no caulim. Assim sendo, o caulim que ficou sedimentado após a lavagem, foi seco em estufa por 24 h a 100°C para retirar a umidade (4), sendo esfriado na própria estufa e novamente destorroado manualmente. A obtenção do produto foi concluída com mais um peneiramento realizado por via seca, novamente em peneira de *Tyler 200* (5) para melhorar o controle no tamanho das

partículas, sem a necessidade de realizar a moagem. Esse método é similar ao método adotado por Barbosa (2019), tendo em vista que não foi utilizada a moagem na última etapa.

Figura 13 – Foto das etapas do processo de beneficiamento do caulim, secagem dos torrões (1), destorroamento (2), lavagem por via úmida (3), material seco em estufa (4) e peneiramento por via seca (5).



3.2.2 Caracterização do caulim

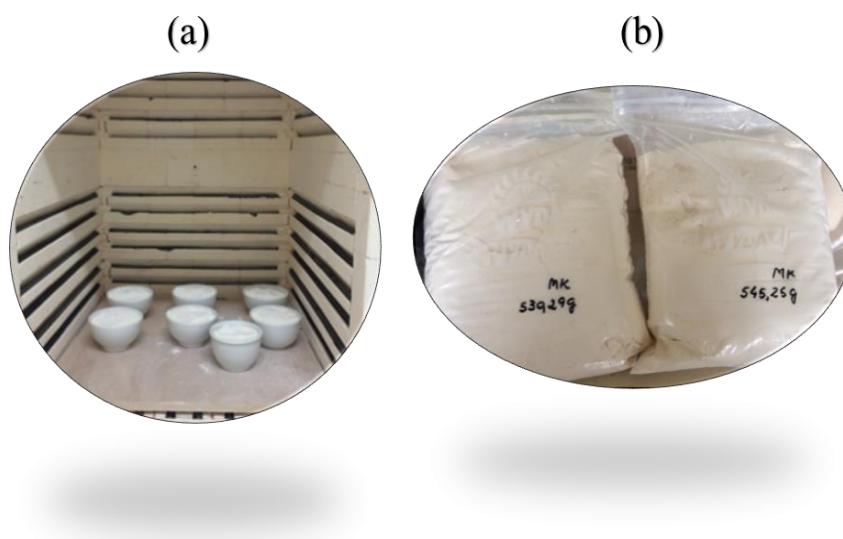
Após o beneficiamento, o caulim foi caracterizado por Difratometria de Raios -X (DRX) com o objetivo de identificar as fases mineralógicas e sua quantificação. As análises de DRX foram realizadas em *Panalytical* modelo *Empyrean* com Cu-K α ($\lambda=0.1541$ x nm) em uma faixa angular de 10-80° de 2 θ . O passo e o tempo por passo foram 0,02° de 2 θ e 60 s, respectivamente. Também foi realizado o refinamento usando o método de Rietveld e auxílio do pacote de programas computacionais GSAS-Expgui.

A análise termogravimétrica e sua derivada foi realizada para caracterizar a natureza do caulim no aquecimento. O equipamento utilizado foi um modelo SDT-Q600 Simultâneo da TA *Instruments* que operou nas condições experimentais de atmosfera inerte (N₂), fluxo máximo de 30 ml/min, faixa de temperatura de 25 até 800°C e taxa de aquecimento de 10°C/min.

A figura 14a mostra o caulim após a calcinação no interior da mufla, LINN *Elektro Therm*. O processo de calcinação foi iniciado com a temperatura ambiente até atingir a 650°C,

pelo tempo de 1 h, condições adotadas conforme a pesquisa de Barbosa (2019) e Taylor-lange *et al.* (2012). Subsequentemente, o material foi esfriado por 12 h, no interior da mufla, e em seguida foi pesado e armazenado em embalagem plástica com fechamento resselável (figura 14b).

Figura 14 – Foto do caulim calcinado (parte interna da mufla) (a) e o acondicionamento em sacos resseláveis, após o resfriamento do material (b).



3.2.3 Caracterização do caulim calcinado

Para conhecer a composição e estrutura a longo alcance, de modo a analisar se o caulim calcinado apresentava potencial para produção de geopolímeros, foi realizada a análise por difratometria e raios X (DRX), técnica utilizada para determinar as fases mineralógicas da matéria-prima após o tratamento térmico. O equipamento utilizado foi da *Panalytical* modelo *Empyrean* com radiação de Cu-K α ($\lambda=0,1541838$ nm), em uma faixa angular de 10-80° de 2 θ . O passo e o tempo por passo foram 0,02° de 2 θ e 60 s, respectivamente.

A Fluorescência de raios X (FRX) foi realizada para conhecer a composição química e estabelecer, por meio da estequiometria, a razão entre os aluminossilicatos conforme a literatura estudada. A análise foi realizada em um Espectrômetro *Panalytical*, modelo Epsilon 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA a Gás Helio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²).

A microestrutura foi analisada por meio do microscópio eletrônico de varredura ZEISS EVO LS 15, com a finalidade de observar a mudança do material calcinado após o tratamento térmico.

Foi realizada análise granulométrica a fim de obter a dimensão das partículas e a área de superfície específica além do módulo de finura. O ensaio foi realizado por meio do espalhamento a laser em equipamento *Malver Instruments, Mastersizer 200*, com velocidade e tempo de rotação de 2200 rpm e 12 s, respectivamente e *background* 20 s.

Para estabelecer a dosagem de material utilizado na produção das argamassas, a massa específica foi obtida por picnômetro a gás Hélio em equipamento MPV P – 6DC, marca *Quantachrome Instruments*.

3.2.4 Caracterização dos agregados (resíduo de PEBD e areia)

A análise morfológica dos agregados foi realizada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em equipamento da marca TESCAN modelo LMU – VEGA 3.

A granulometria dos agregados foi obtida por meio do espalhamento a laser nas mesmas condições da caracterização do caulim calcinado

Em relação à massa específica e do resíduo plástico, esse foi caracterizado nas mesmas condições do material calcinado, enquanto que para a areia, foi empregado o método descrito na NBR 9776 (1987). Conforme essa norma, o ensaio consiste em pesar a massa de 500 g de areia em um frasco de Chapman e encher de água até 500 ml, deixar em repouso por 1 h após isso, completar a água até 500 cm³ e determinar a massa. Retirar o agregado do frasco de Chapman, secar em estufa por 105⁰C, esfriar em temperatura ambiente em dessecador e pesar. A fórmula da massa específica do agregado é calculada pelas equações 1 e 2.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

d_3 , é a massa específica aparente do agregado, em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

V , é o volume do frasco de Chapman em centímetros cúbicos (cm³);

V_a , é o volume de água, adicionada ao frasco, de acordo com a equação 2, em centímetros cúbicos (cm³);

m_s , é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em gramas (g);

m , é a massa da amostra seca em estufa em gramas (g.);

m1, é a massa do conjunto (frasco + agregado) em gramas (g);

m2, é a massa total (frasco + agregado + água) em gramas (g);

pa. É a massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos (g/cm³).

3.2.5 Dosagem das argamassas de geopolímero

A dosagem das argamassas (tabela 2), está baseada nos parâmetros sugeridos por Davidovits (1982), tal como: $0,22 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,48$. Também foi estabelecido uma razão de água por metacaulinita ($\text{H}_2\text{O}/\text{MK} = 0,54$) e o número de 12 mol/L para a solução de NaOH e razão molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0,94$, para o Na_2SiO_3 . Então foi aplicado o cálculo estequiométrico dos compostos químicos para se chegar a uma quantidade ideal de solução simples e composta de modo a produzir um geopolímero a partir de uma quantidade pré-definida de metacaulinita que atendesse aos parâmetros propostos. A razão de metacaulinita para areia foi de 1:1, ou seja, em cada 100 g de metacaulinita adicionava-se 100 g de areia para o GP100, 50 g de areia para o GP50 e 0 g de areia para o GP0.

Tabela 2 - Dosagem dos materiais para produção das argamassas em gramas.

Amostra	Metacaulinita	PEBD	Areia	NaOH	Na ₂ SiO ₃
GP0-S	100	0	100	80	0
GP50-S	100	18,4	50	80	0
GP100-S	100	36,9	0	80	0
GP0-C	100	0	100	40	50
GP50-C	100	18,4	50	40	50
GP100-C	100	36,9	0	40	50

Contudo, ao substituir a areia pelo resíduo plástico, no cálculo do consumo em massa, foi considerada a diferença entre as massas específicas desses materiais, conforme as equações 3 e 4:

$$V_{Res.} = \frac{Ma}{\rho_a} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$M_{Res.} = \frac{V_{Res.}}{\rho_{Res.}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$V_{Res.}$, é o volume do resíduo em gramas (g);

Ma , é a massa de areia em g que corresponde ao teor percentual a ser substituído por resíduo;

ρ_a , é a massa específica da areia em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3) obtida pela NBR 9776 (1987);

$M_{\text{Res.}}$, é a massa do resíduo em gramas (g);

$\rho_{\text{Res.}}$, é a massa específica do resíduo obtida no ensaio de Picnometria em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

Dessa forma, o resultado de 50% de resíduo plástico corresponde a 18,4 g e 100% correspondem a 36,9 g.

3.2.6 Produção e cura das argamassas

A figura 15 mostra as etapas no processo de produção das argamassas. Primeiramente foram misturados os materiais secos, iniciando pelos agregados, seguidos da metacaulinita. A mistura de materiais secos foi realizada manualmente, por 3 min (1), buscando assim obter uma melhor homogeneidade entre as partículas. Em seguida a solução ativadora foi adicionada na mistura seca e foi novamente misturada manualmente por 1 min (2). Finalmente, a mistura foi levada ao misturador mecânico de argamassa da Marca MATEST Modelo E 094X a uma velocidade de 140 RPM durante 3 minutos, para que o ativador envolvesse todo o material seco e depois por mais 3 min a uma velocidade de 285 RPM, para alcançar uma boa homogeneidade da mistura fresca (3), totalizando um tempo de mistura de 10 min. O tempo e a velocidade da mistura foram adaptados dos estudos de Longhi *et al.* (2020).

Figura 15 - Foto das etapas do processo de produção das argamassas, mistura dos materiais secos (1), mistura da solução ativadora e materiais secos (2), mistura mecânica (3), moldagem da argamassa (4), adensamento (5), e cura à temperatura ambiente (6).

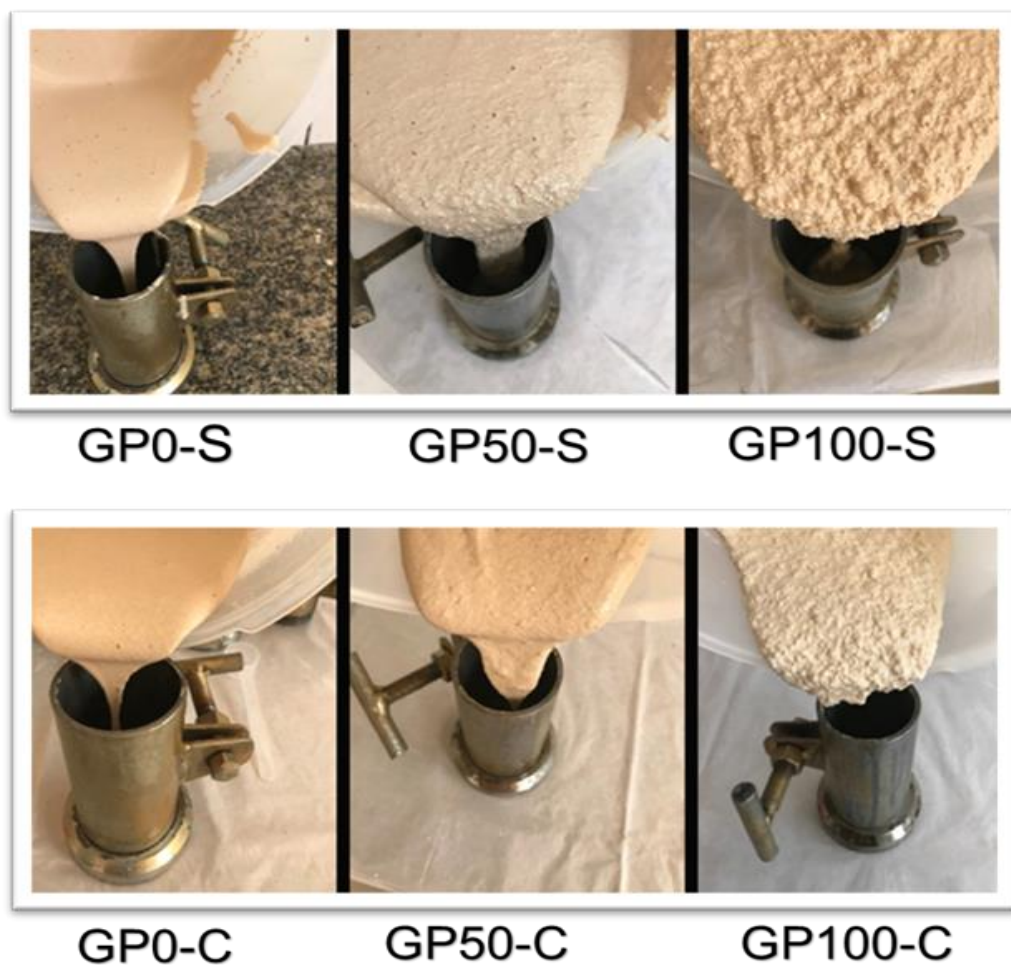


Após a mistura, a argamassa foi vertida nos moldes cilíndricos metálicos medindo 50 mm x 100 mm (4), adensada com o auxílio de um agitador de peneiras VIATEST 220V, para eliminar as bolhas de ar por 60 s (5), depois foram cobertos em filme plástico e permaneceram no molde por 24 h para o endurecimento à temperatura ambiente. Após a desmoldagem, as amostras foram envolvidas em plástico filme e colocadas em sacos plásticos resseláveis, para conservar a umidade do material até as idades de cura de 14 e 28 dias (6).

Ao todo foram produzidas 72 amostras, sendo 12 para cada argamassa divididas em 6 para cada idade de cura.

A figura 16 mostra o processo de moldagem das argamassas quando eram vertidas no molde metálico.

Figura 16 – Foto das argamassas dos grupos GP-S e GP-C sendo vertida nos moldes cilíndricos.



3.2.7 Caracterização das argamassas de geopolímero

O ensaio de porosidade e absorção de água foi realizado conforme descreve a Norma Brasileira NBR 9778 (2009). O ensaio foi realizado com 4 amostras de cada argamassa, medindo 20 mm x 20 mm x 20 mm, após 28 dias de cura. Primeiramente foi medida a massa seca ao ar e em estufa a temperatura de 105°C. Posteriormente, a amostra seca em estufa foi imersa em água iniciando por 1/3 do seu volume nas primeiras 4 h seguida 2/3 nas 4 h subsequentes e completamente imersa na 64 h restantes. Assim, a massa imersa foi determinada após 24, 48 e 72 h de imersão. Além disso, mediu-se a massa saturada imersa em balança hidrostática. O cálculo de porosidade e índice de vazios, foi obtido por meio das equações 5 e 6:

$$\text{Porosidade} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{Índice de vazios} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat.i}} - M} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

M_{sat} , é a massa do material saturado;

M_s , é a massa do material seco em estufa;

$M_{\text{sat.i}}$, é a massa do material saturado imerso;

M , é a massa do material após a cura.

Todas as massas foram medidas em gramas (g).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em equipamento EMIC modelo PC 200 CS com célula de carga de 200 ton. com velocidade do carregamento axial de 0,2 MPa/s, de acordo com a NBR 7215 (2019). Nos corpos de prova foi utilizado na parte superior e inferior o neoprene, a fim de se obter uma superfície regularizada para melhor distribuição das tensões durante o ensaio. Este ensaio serviu para elucidar o quanto a substituição da areia pelo resíduo afetou o desempenho mecânico das argamassas. A equação 7, foi utilizada para determinar a resistência à compressão.

$$\delta = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq.7})$$

Onde:

δ , é a tensão em megapascals (MPa);

F , é a força em newton (N);

A , é a área em milímetro quadrado (mm²).

Contudo, para se discutir melhor a influência da substituição da areia por resíduo na resistência à compressão, estatisticamente, as resistências médias em cada argamassa foram analisadas por meio da análise de variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5%. A variável resposta, utilizando como critério o melhor teor de substituição da areia pelo resíduo, foi a resistência. O fator único foi o percentual de resíduo e os níveis analisados foram os tipos de argamassas, de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Níveis, fatores e identificação das argamassas para ANOVA com um fator.

Argamassas	Fator % PEBD	Identificação
GP0	0	Argamassa com 0% PEBD
GP50	50	Argamassa com 50% de PEBD e 50% de areia
GP100	100	Argamassa com 100% de PEBD e 0% de areia

A hipótese nula (H_0), princípio da equivalência das médias, consiste em que todas as médias são iguais, ou uma hipótese alternativa (H_1), têm-se a não equivalência na qual, no mínimo, uma média entre as argamassas é diferente. Assim, ANOVA permitiu identificar a significância entre os teores de resíduo plástico utilizado nas argamassas. Existindo significância, segue-se para o teste Tukey pela comparação entre grupos, que permite identificar o melhor nível entre as argamassas em termos de resistência à compressão. Adotando-se a diferença média significativa (d.m.s.) como hipótese 2 a 2, quando for menor que a média entre os grupos, rejeita-se o H_0 , ou seja, estatisticamente as médias são diferentes entre si.

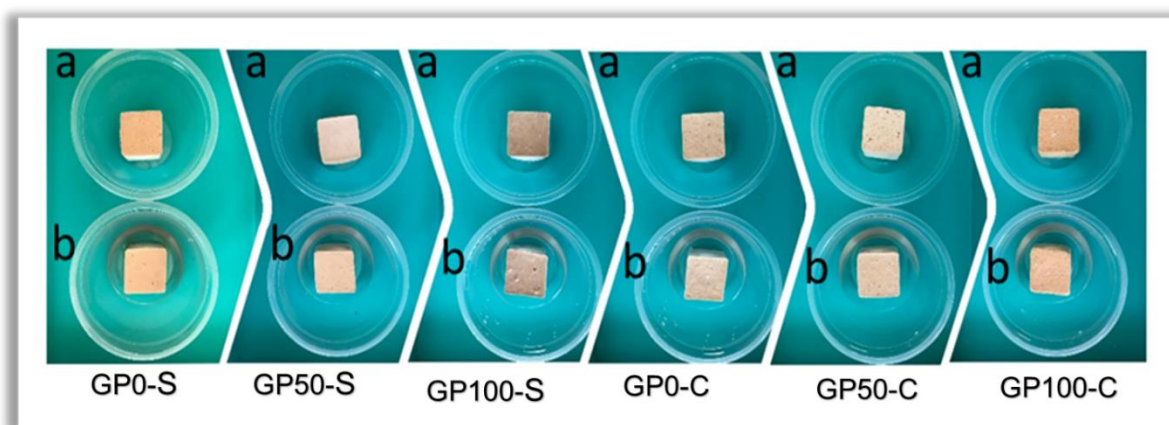
A composição química dos geopolímeros foi obtida por FRX e serviu para determinar a razão molar de Si/Al. As condições da análise foram as mesmas realizadas para a metacaulinita.

A caracterização por DRX nas argamassas foi usada para determinar as fases que se formaram durante a geopolimerização, assim como a formação do gel, além de verificar a formação da fase dos compostos pela carbonatação que culminaram na formação da eflorescência. O equipamento utilizado foi da *Panalytical* modelo *Empyrean* com radiação de Cu-K α ($\lambda=0,1541838$ nm), em uma faixa angular de 10-80° de 2 θ . O passo e o tempo por passo foram 0,02° de 2 θ e 60 s, respectivamente.

A microestrutura foi analisada por meio MEV, equipamento ZEISS EVO LS 15 e serviu para entender melhor os fatores que influenciam na eflorescência e que poderiam estar relacionadas aos ativadores e/ou ao tipo de agregado de resíduo e a interação entre as partículas.

O teste de eflorescência foi realizando adaptando o método adotado na pesquisa de Longhi *et al.* (2020). Esse método consistiu em deixar as amostras com dimensões (20 mm x 20 mm x 20 mm), após os 28 dias de cura, em condições ambiente (figura 17a) e as outras submersas (figura 17b) em 50 ml de água destilada realizando ciclos de secagem e molhagem durante 7, 14 e 28 dias.

Figura 17 – Foto das amostras de geopolímeros que foram submetidas ao teste de eflorescência na condição ambiente (a) e em contato com água (b).

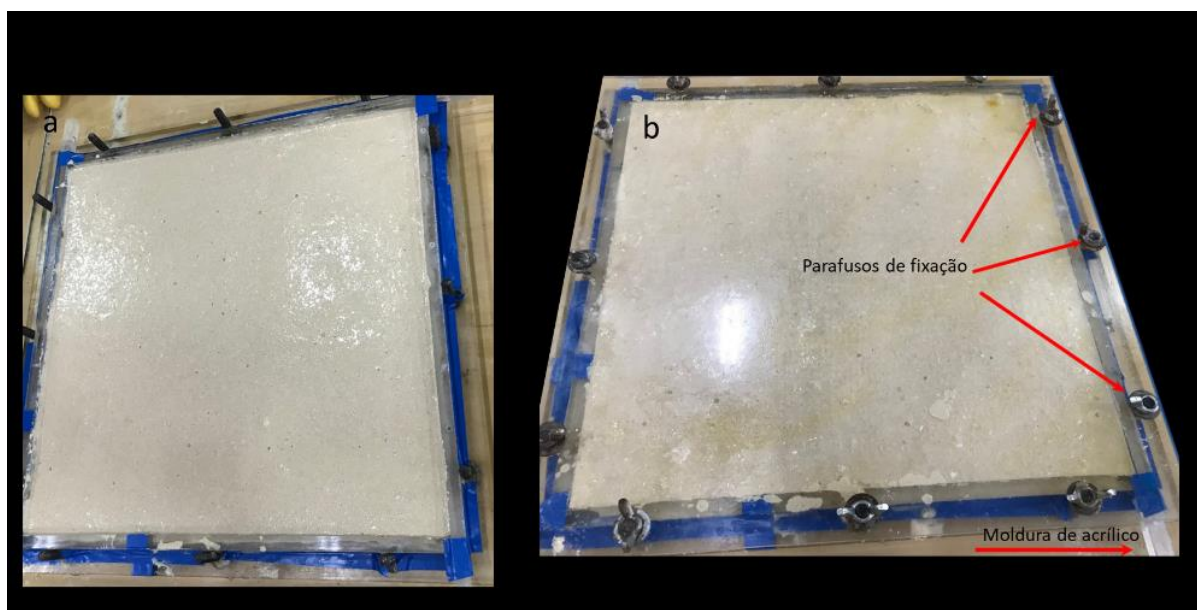


As amostras que ficaram em condições ambientes, foram monitoradas na formação da eflorescência nas idades de 7, 14 e 28 dias. Quanto às amostras que ficaram submersas, elas foram primeiramente removidas da água após 28 dias e foi observado, visualmente, a formação da eflorescência nas mesmas idades anteriores. Além disso o material lixiviado foi coletado da superfície das amostras e foi submetido a análise de DRX nas mesmas condições do material calcinado.

3.2.8 Produção da placa cimentícia

A figura 18 mostra a moldagem de duas placas cimentícias em forma de acrílico 10 mm de espessura e dimensões de 40 cm x 40 cm. A forma é composta de duas faces sendo uma superior, outra inferior, um baguete (moldura) de acrílico que garante a espessura final que foi selado com silicone na borda, para garantir a estanqueidade da argamassa. A placa da face superior é colocada após a moldagem e adensamento manual, feito isso, as duas placas são fixadas entres si com auxílio de parafuso, arruela e porca (figura 18b).

Figura 18 – Foto da placa cimentícia durante a moldagem (a) e após a moldagem em processo de secagem e endurecimento (b).



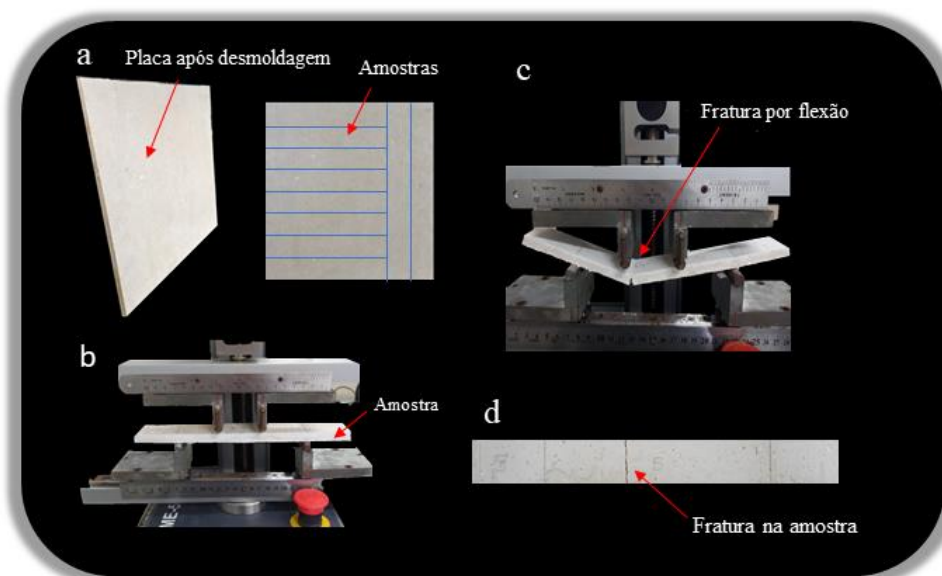
A forma de acrílico garante que as placas cimentícias tenham arestas retilíneas e acabamento superficial com aspecto polido. A produção das argamassas seguiu os passos descritos no item 4.2.6. Após 24 h a placa foi desmoldada, envolvida em filme plástico para o processo de cura durante 28 dias ao ambiente.

A dosagem dos materiais foi obtida a partir do melhor desempenho mecânico na caracterização das argamassas estudadas. Também foi produzida uma placa de referência para estabelecer comparação entre os resultados. A placa de referência foi produzida com a argamassa GP0-C composta de cimento *Portland*, areia e água.

3.2.9 Caracterização placas cimentícias

A figura 19 mostra os passos para o ensaio de tração à flexão até a fratura das amostras. Após a cura, primeiramente a placa foi cortada em amostras de 5 cm x 25 cm (dimensões padrão para o tipo de ensaio) utilizando uma serra mármore, conforme marcação mostrada na figura 19a.

Figura 19 – Foto da placa após a moldagem e marcação dos cortes das amostras (a), amostra posicionada nos apoios do equipamento no ensaio de flexão (b), momento da fratura por flexão na amostra (c) e amostra fraturada (d).



O ensaio de flexão foi realizado, em equipamento da marca FILIZOLA, modelo mono coluna de mesa com capacidade para 5 kN (figura 19b). A velocidade do ensaio foi de 0,5 mm/min e em conformidade com a NBR 12142 (2010).

No ensaio de 4 pontos, a amostra ficou posicionada sobre dois suportes que funcionaram como apoio com distância 25 entre elas. O carregamento foi deslocado sobre a amostra por meio de outros dois suportes com distância de 5 cm entre elas (Figura 19b). A leitura dos resultados, realizada no momento da fratura (Figura 19c) foi registrada por meio de um *software* que fornece os dados de carregamento, o tempo e o deslocamento, podendo assim, determinar a resistência do material à tração na flexão.

A avaliação do ciclo da vida (ACV) foi estudada em quatro fases: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto e interpretação (SANTOS *et al.*, 2022; NBR ISO 14040, 2009; NBR ISO 14044, 2009).

Dessa forma, a ACV foi usada para comparar desempenho ambiental da placa cimentícia produzida com a argamassa GP50-C versus a argamassa de referência GP0-C, observando se os resultados obtidos mostram um melhor desempenho ambiental na substituição da areia pelo resíduo plástico, no intuito de mitigar o impacto. Ainda quanto ao desempenho, foi observada a influência do uso dos ativadores alcalinos, conforme a literatura revisada nessa pesquisa.

A ferramenta utilizada para a o ciclo da vida foi o SimaPro® na versão 9.2.0.2, sendo esse *software* o mais utilizado desde a década 1990. Esse programa possui 9 bibliotecas de inventário

e 20 métodos de avaliação do ciclo da vida, que atualiza e agrega base de dados. No escopo dessa pesquisa, foi adotado o período da realização da pesquisa entre o ano de 2019 a 2022. A abrangência de coleta dos materiais e transporte foi considerada em território brasileiro.

Na modelagem da placa cimentícia foram utilizados dois métodos, a saber: ReCipe 2016 versão *Midpoint* o mais citado e recomendado entre os métodos mais estudados e o método da norma europeia EN 15804. A placa cimentícia, objeto do estudo da ACV, é para aplicação na construção civil como vedação e o inventário mostrado na tabela 4, corresponde ao material utilizado para 1 m² de placa cimentícia. O produto evitado foi a areia na proporção da substituição pelo resíduo plástico.

A ACV é uma ferramenta que mostra resultados aproximados de desempenho ambiental, tendo em vista que a biblioteca disponível, em alguns casos, não tem o dado necessário exato para a modelagem. Para o inventário dessa pesquisa, os materiais mostrados na tabela 4 estão conforme disponíveis na biblioteca do SimaPro[®], ou seja, a argila calcinada corresponde à metacaulinita, mas dentro de uma faixa de temperatura de calcinação de 500 a 900⁰C, resíduo de polietileno que envolve todos os plásticos de baixa e alta densidade, tais como: sacolas, embalagem de alimentos, *pallets*, lixeiras, pisos plástico e outros. Consta também no inventário os ativadores de NaOH e Na₂SiO₃ na forma de sólidos e a água para produção da solução. Todos esses produtos são comerciais, produzidos no Brasil e já está incluso o transporte.

Tabela 4 - Dados do inventário para produção de 1 m² de placa cimentícia de 1 cm de espessura em argamassa GP50-C e GP0-C.

GP50-C		
Produtos	Quantidade	Unidade
Argila calcinada (500 a 900 ⁰ C)	7,63	Kg
Areia	3,81	Kg
Resíduo de polietileno para reciclagem	1,37	Kg
Silicato de sódio sólido	3,81	Kg
Hidróxido sódio	3,04	Kg
Água	9,63	Kg
GP0-C		
Argila calcinada	7,63	Kg
Areia	7,63	Kg
Silicato de sódio sólido	3,81	Kg
Hidróxido de sódio	3,04	Kg
Água	9,63	Kg

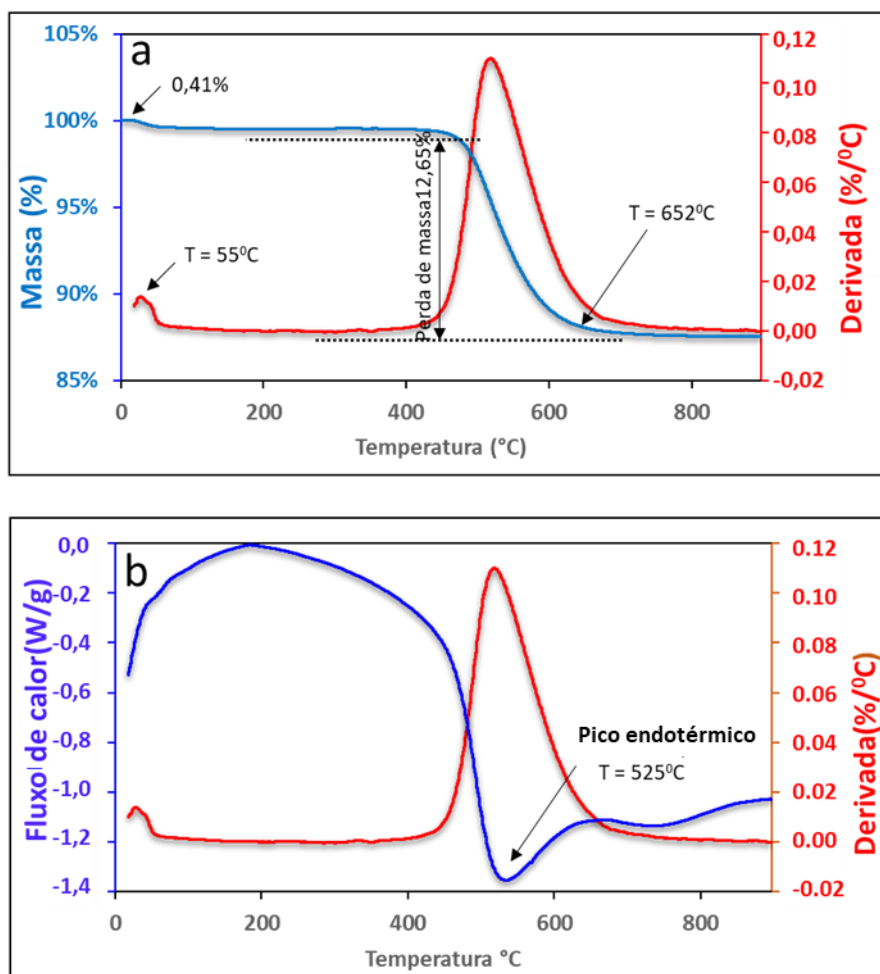
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Termogravimetria do caulim

A Figura 20a mostra o gráfico das curvas TGA e DTA do caulim. Foi possível observar que a primeira perda de massa ocorreu a 55°C, corresponde a 0,41%, e está relacionada à água que é adsorvida na superfície externa das partículas. A segunda perda de massa foi de 12,70%, e ocorreu na faixa de 456°C a 652°C, o que pode ser atribuído à perda de matéria orgânica seguida da perda de água estrutural até 652°C ocorrida pela desidroxilação da caulinita.

O pico endotérmico observado na Figura 20b, que ocorreu a 525°C, corresponde à desidroxilação do caulim, que é resultado da eliminação do grupo hidroxila (OH) e ocorre durante o processo de transformação do caulim em metacaulinita (CHENG *et al.* 2010; IZADIFAR *et al.* 2020).

Figura 20 - Curvas de TG (a) e DTA (b) do caulim.



4.2 DRX do caulim e da metacaulinita

A Figura 21a mostra o padrão de difração de raios X (DRX) do caulim. A indexação revela que existem três fases: dialumínio fillo-dissilicato tetrahidroxida - $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ (caulim) é a fase principal, que possui uma estrutura triclinica com um grupo espacial de $P1(1)$, parâmetros de rede $a = 5,1577(15) \text{ \AA}$, $b = 8,9417(23) \text{ \AA}$ e $c = 7,3967(40) \text{ \AA}$, ângulos $\alpha = 91.672(50)^\circ$, $\beta = 104.860(2)^\circ$, $\lambda = 89.989(2)^\circ$ e um volume celular unitário de $329,57 \text{ \AA}^3$. Todos os picos de difração estão de acordo com as informações cristalográficas disponíveis no cartão *Inorganic Crystals Structure Database* (ICSD) nº 68968 e na literatura.

A segunda fase foi indexada com o cartão ICSD nº 90145 para óxido de silício (SiO_2), que exibe uma estrutura trigonal ($P3221$), parâmetros de rede de $a = b = 4,9100 \text{ \AA}$, $c = 5.400 \text{ \AA}$ e volume de células unitárias de $112,74 \text{ \AA}^3$. Por fim, a terceira fase é o óxido de titânio e a anatase (TiO_2) com estrutura tetragonal $a = b = 3,7892 (4) \text{ \AA}$, e $c = 9,537(1) \text{ \AA}$, e volume de célula unitária de $136,93(3) \text{ \AA}^3$. A partir do padrão DRX mostrado na Figura 21a para o caulim, o índice *Hinchley* (HI) foi calculado usando a equação 8:

$$\text{HI} = \frac{A+B}{A_t} \quad (\text{Eq. 8})$$

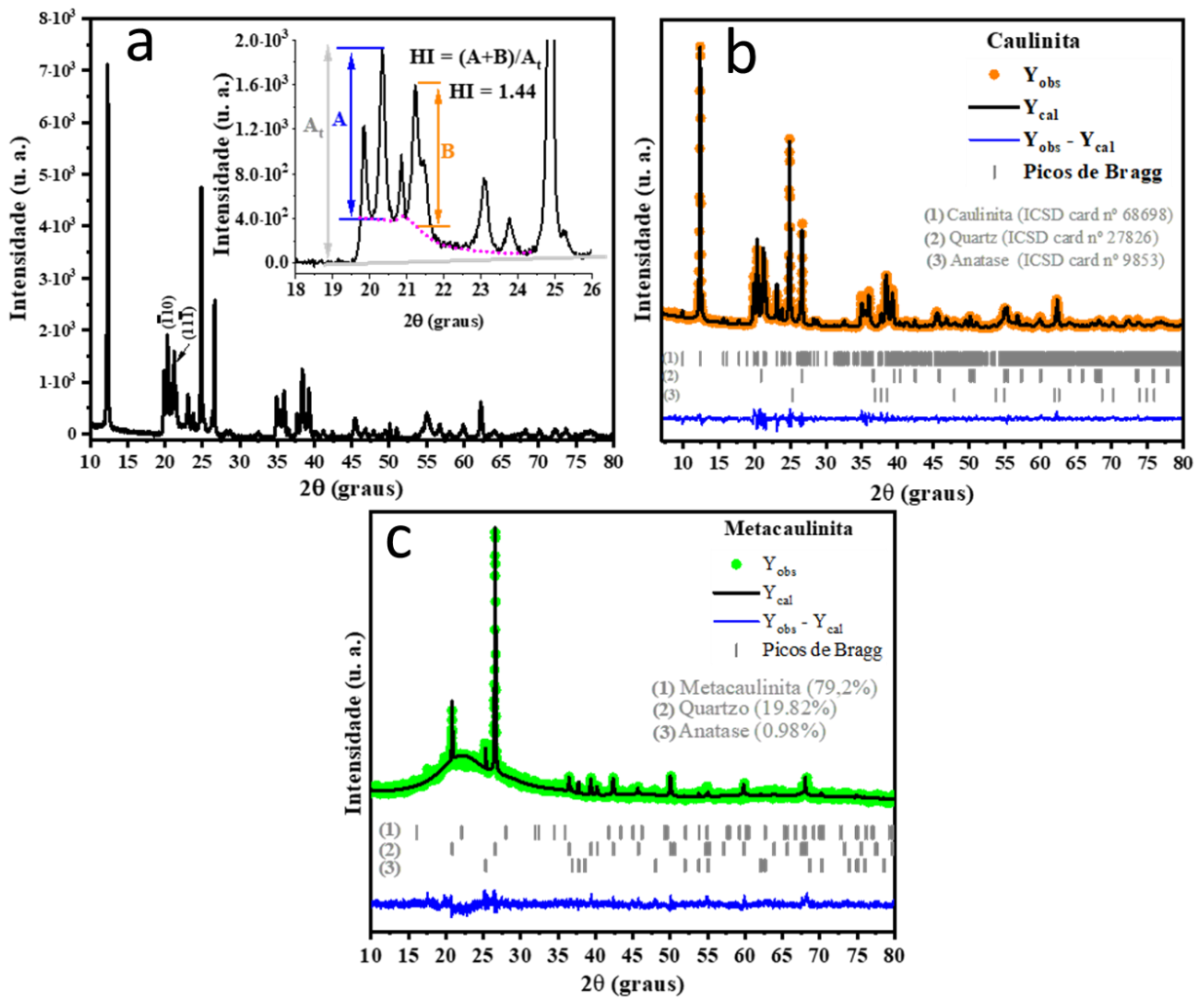
Onde A e B são a altura do pico de difração em $2\theta = 20,2^\circ$ para $(\bar{1}10)$ plano e $2\theta = 21,3^\circ$ para $(11\bar{1})$, respectivamente. Por outro lado, A_t é a altura da linha de base do pico.

De acordo com Liu *et al.* (2022), uma $\text{HI} \geq 1,3$ indica uma estrutura altamente ordenada, uma HI de 1,1-1,3 é característica de uma estrutura ordenada, uma HI de 0,8-1,1 é relativamente desordenada e uma HI de $< 0,8$ é desordenada. No entanto, vários fatores devem ser considerados na análise desses resultados, como a presença de defeitos estruturais, dopantes, mistura da fase com outros minerais, e quantidade de moléculas de água nas camadas de aglomerados de alumínio e silício (DAOU et al. 2020). O HI calculado para o caulim, neste estudo, foi de 1,44, o que indica uma estrutura altamente ordenada.

A composição da fase foi obtida por refinamento estrutural utilizando o método Rietveld, como pode ser visto na Fig 21b. Como esperado, via refinamento rietveld, foi confirmada a ocorrência de 90,71% de caulinita, 6,18% de quartzo e 3,11% para anatase na amostra de caulim (BHOGAYATA et al, 2019). Este resultado está de acordo com o que é relatado por Faqir *et al.* (2019), em que o uso de argila de caulim natural foi estudado a fim de obter geopolímero por uma reação envolvendo o caulim natural, areia de sílica, hidróxido de sódio e água. A distância basal

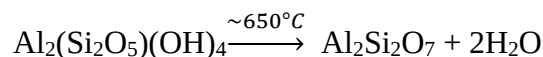
(d) do caulim foi calculada utilizando-se a largura total pela metade máxima (FWHM) do plano (001) a $2\theta = 12,32^\circ$ é de 0,71 nm, de acordo com a distância basal relatada por Tan *et al.*(2015).

Figura 21 – Difratoograma do caulim com modelo de cálculo HI (a), gráfico de refinamento Rietveld estrutural do caulim (b) e difratograma da metacaulinita (c).



Com base na literatura de Ptáček *et al.* (2011) e Oluseyi *et al.* (2016) as análises nos padrões DRX para metacaulinita na Figura 21c, sugere que o aumento da temperatura no tratamento térmico converteu a caulinita para metacaulinita a uma temperatura de 650°C . O pico característico de difração de caulim a $2\theta = 12,32^\circ$ desaparece completamente a esta temperatura. Por outro lado, os planos a $2\theta = 20,8^\circ$ e $2\theta = 25,3^\circ$, atribuídos ao óxido de silício e à anatase, respectivamente, mostram um aumento na intensidade de seus picos de difração. Além disso, houve a ocorrência de uma fase amorfa

entre 15° e 30°, o que é forte evidência para a obtenção de metacaulinita devido à estrutura altamente desordenada do caulim. Assim, são postuladas as seguintes etapas com base na literatura (DAO, *et al.*, 2020; OLUSEYI *et al.* 2016).



A obtenção da metacaulinita foi confirmada pela análise DRX e refinamento estrutural rietveld, como mostrado na Figura 21c, para o caulim tratado a 650°C. Com base nesses resultados, foi confirmada a presença de 0,93%, 19,82% e 79,25%, para anatase, quartzo e metacaulinita desordenada, respectivamente. Além disso, pode-se verificar que o pico de intensidade principal em $2\theta = 12,32^\circ$ desapareceu, o que indica a conversão de caulinita para metacaulinita.

4.3 Composição química da metacaulinita por FRX

A Tabela 5 mostra a composição química da metacaulinita, analisada por FRX. O resultado mostra que o percentual de sílica e alumina totalizam 92,21%, descontando os 6,18% da sílica referente ao quartzo (material não reativo) observado no refinamento por Rietveld do caulim. A sílica do quartzo não faz parte do cálculo da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Tendo em vista que os teores de aluminossilicatos encontram-se acima dos teores teóricos mencionados na revisão da literatura, foi possível inferir que a metacaulinita, tem potencial para produzir geopolímeros.

Tabela 5 - Composição química da metacaulinita.

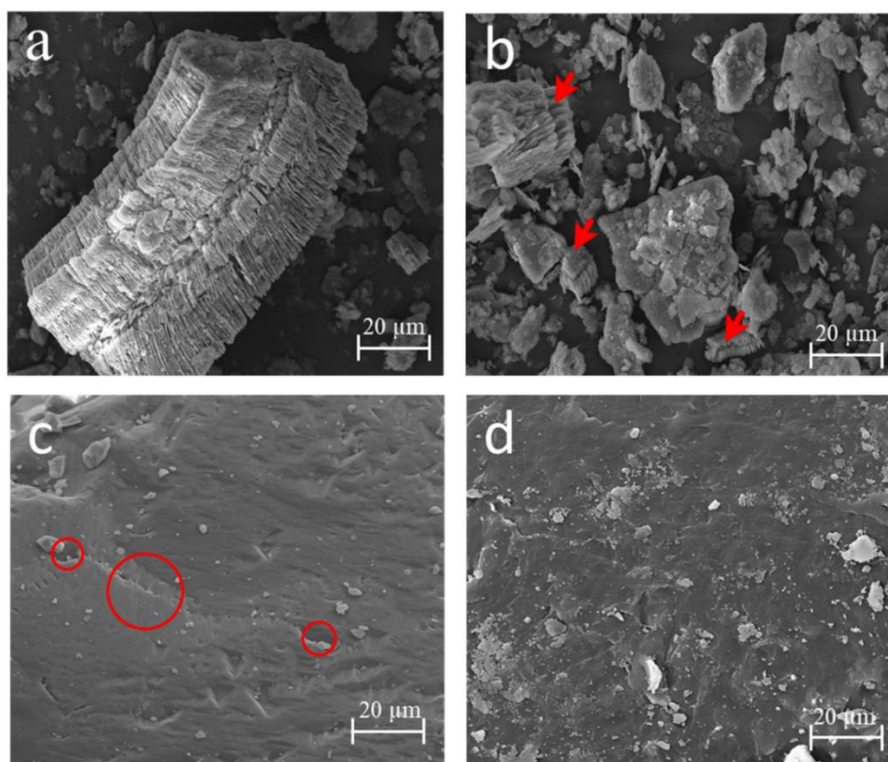
Óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Outros
(%)	51,55	40,66	<0,05	0,33	<0,01	1,14	0,89	0,50

4.4 Microestrutura das matérias-primas

Na figura 22 são apresentadas as micrografias das matérias-primas caulim (a), metacaulinita (b), areia (c) e resíduo plástico (d). Observou-se que a morfologia do caulim, inicialmente formada pelo empilhamento de camadas alternadas de tetraedros de SiO₂ e octaedros de Al₂(OH)₆ da caulinita (figura 22a), foi destruída (figura 22b) o que está de acordo com os estudos (ALZAZA *et al.*, 2019). Os aglomerados na forma de placas da caulinita, se

fragmentaram (setas vermelhas) alterando a morfologia inicial o que favoreceu a transformação da caulinita em um material mais reativo, concordando assim com afirmação de Granizo *et al.* (2000).

Figura 22 - Micrografia das matérias-primas caulim (a), metacaulinita, com destaque em setas vermelhas (b), areia com destaque da porosidade em círculos vermelhos (c) e resíduo plástico (d).



Na micrografia da areia observa-se porosidade, em círculos vermelhos, sendo essa um dos parâmetros que mais se relaciona com a consistência nas argamassas, pois quanto maior a porosidade menor é a consistência da argamassa obtida (CARASECK, *et al.*, 2016). Quanto à micrografia do resíduo, esse mostrou-se um material mais homogêneo e sem porosidade. O poros presentes na areia, absorvem água da mistura e melhoram a homogeneização, contudo, materiais hidrofóbicos, tendem a tornar a mistura mais trabalhosa, tendo em vista não incorporarem a água.

4.5 Granulometria a laser das matérias-primas

A tabela 6, mostra as características físicas da metacaulinita, areia e resíduo plástico. O tamanho das partículas da metacaulinita em 10% (d10) são menores que 2 µm o que está de acordo com a norma da NBR 6502 (1995), indicando que está dentro da faixa de um solo

argiloso. Contudo, a existência de partículas maiores em 50% (d50), 60% (d60) e 90% (d90) pode estar relacionada à falta de moagem do caulim no beneficiamento, o que é confirmado pela baixa área de superfície específica.

Tabela 6 - Características físicas das matérias-primas.

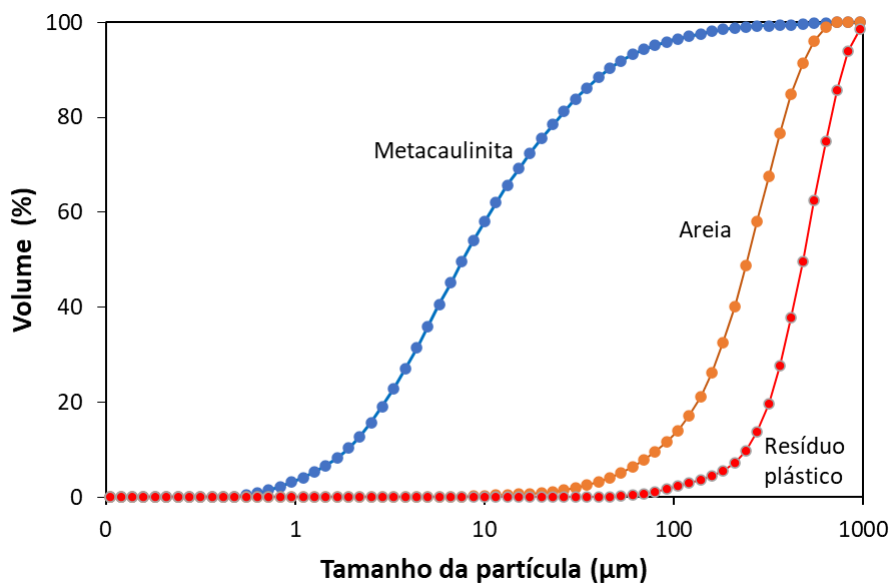
Material	Massa específica (g/cm ³)	Área de superfície específica (m ² /g)	d10 (μm)	d50 (μm)	d60 (μm)	d90 (μm)
Metacaulinita	2,68	1,38	1,86	7,65	44,69	10,57
Areia	2,60	0,041	81,77	244,56	464,12	282,73
PEBD	0,94	0,016	241,31	480,30	773,82	532,35

Na areia, a granulometria em 50%, 60% e 90% ficaram dentro da faixa que permite classificar o material como areia fina e em 10% como areia média. O módulo de finura foi de 2,61 ficando dentro da zona ótima para um agregado fino, conforme estabelece a NBR 7211 (2009).

Tendo em vista que o resíduo plástico não é um agregado natural, a faixa granulométrica foi comparada com a areia. Dessa forma a granulometria do resíduo em 10%, 50% e 90% ficaram compatíveis com uma areia média. Para 60% não foi possível relacionar a granulometria a nenhum tipo de material argiloso ou arenoso.

A figura 23 mostra o gráfico de sobreposição das curvas da metacaulinita, areia e resíduo plástico na qual foi observada a diferença granulométrica entre os materiais.

Figura 23 - Sobreposição das curvas de granulometria das matérias-primas.



A questão da área superficial da metacaulinita em relação à reatividade foi observada no estudo de Lot *et al* (2015). Para esses autores quanto maior a área superficial, menor o

tamanho das partículas e maior será a taxa de dissolução em meio alcalino, o que resulta em geopolímeros mais rígidos.

4.6 Cura das argamassas de geopolímeros

A tabela 7 mostra a perda de massa percentual dos 14 aos 28 dias de cura. As argamassas que mais perderam umidade foram GP50-S e GP100-S quando comparadas às argamassas GP50-C e GP100-C.

Tabela 7 - Percentual de perda de massa das argamassas no período da cura aos 14 e 28 dias.

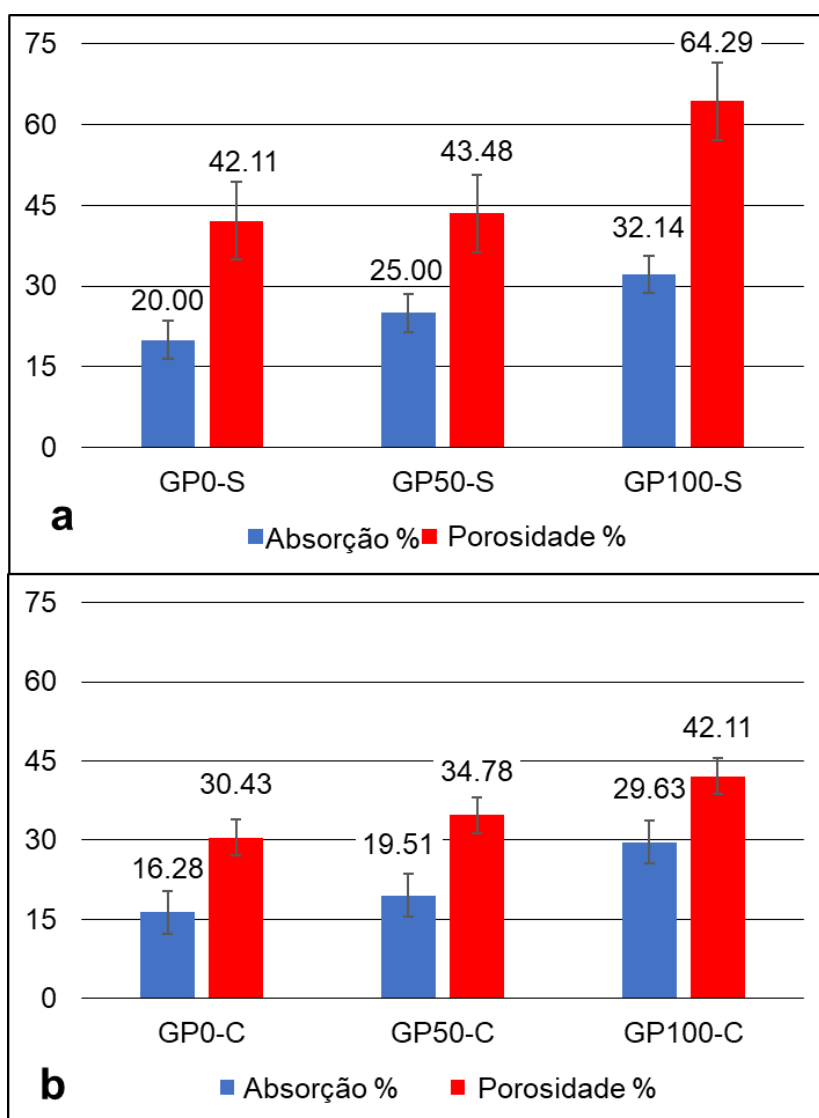
ARGAMASSA-GRUPO GP-S			
IDADE (DIAS)	GP0-S	GP50-S	GP100-S
14	1%	9%	10%
28	1%	9%	11%
ARGAMASSA-GRUPO GP-C			
IDADE (DIAS)	GP0-C	GP50-C	GP100-C
14	0%	0%	1%
28	0%	1%	1%

Contudo, em todas as argamassas do grupo GP-C a perda de umidade foi menor, o que pode estar relacionado ao ativador alcalino composto utilizado nesse grupo, tendo em vista que o tratamento de cura foi o mesmo. Nota-se que, o ativador composto foi mais eficaz conseguiu conservar a umidade nas argamassas do grupo C até o final da cura. A combinação do NaOH com o Na_2SiO_3 , do grupo GP-C, pode ter retardado a saída de água nas primeiras idades e conseguiu se manter quase inalterada até os 28 dias. Contudo a cura do grupo GP-S foi mais lenta e perdeu muita água logo nas primeiras idades e depois estabilizou.

4.7 Absorção e porosidade das argamassas de geopolímero

O gráfico de absorção e porosidade da Figura 24 mostra uma tendência crescente de absorção e porosidade nas argamassas após 28 dias, de acordo com o aumento da substituição de areia por resíduos plásticos em cada formulação. No entanto, no grupo GP-S, a porosidade foi mais expressiva quando comparada ao grupo GP-C. O ativador composto pode ter influenciado na diminuição da porosidade do grupo GP-C (Figura 24b) quando adicionado Na_2SiO_3 , o que pode ter contribuído para melhorar a adesão das partículas do agregado e da matriz, criando um efeito de empacotamento que reduziu a porosidade.

Figura 24 - Percentual de absorção de água e porosidade das argamassas GP-S (a) e GP-C (b) em função dos teores de substituição da areia por resíduo plástico.



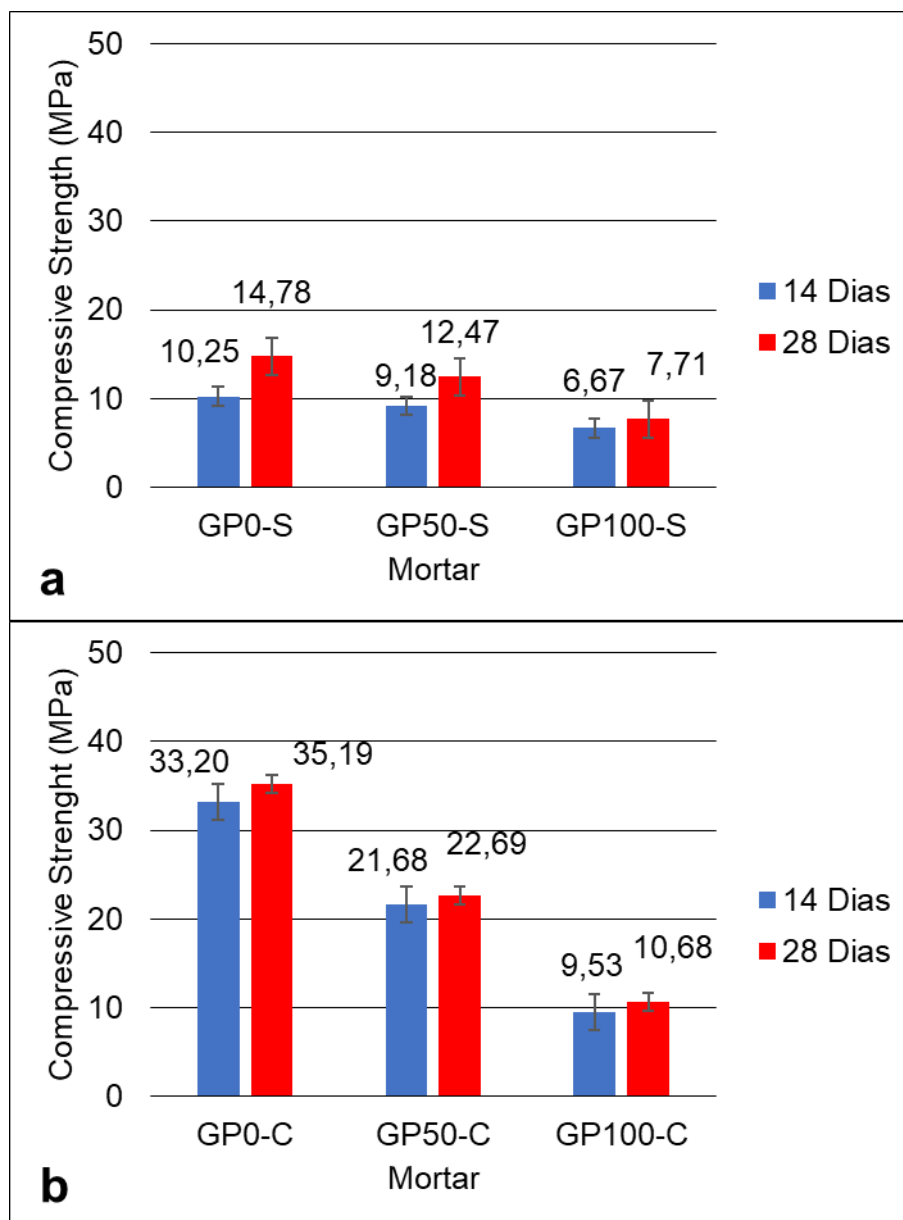
Segundo Bai e Colombo (2018), a porosidade e a resistência, são considerados um defeito significativo na resistência dos geopolímeros que necessitam ser estudados. Entre as duas argamassas os parâmetros de dosagem e a matéria-prima são praticamente os mesmos, mas a diferença no tipo de ativador pode ter sido suficiente para alterar o comportamento da matriz durante a síntese.

4.8 Resistência à compressão das argamassas de geopolímero

A figura 25 mostra o gráfico de resistência à compressão para as argamassas do grupo GP-S (figura 25a) e GP-C (figura 25b) nas idades de 14 e 28 dias. Os resultados para os dois

grupos mostraram que, na média das resistências, diminuíram proporcionalmente com o aumento da substituição da areia por resíduos plásticos, até atingir uma redução de aproximadamente 16% no GP50-S e 100% no GP100-S em 28 dias, quando comparado com a argamassa de referência GP0-S.

Figura 25 - Resistência média à compressão em função do percentual de resíduo substituindo a areia em cada argamassa de geopolímero no grupo GP-S (a) e GP-C (b).



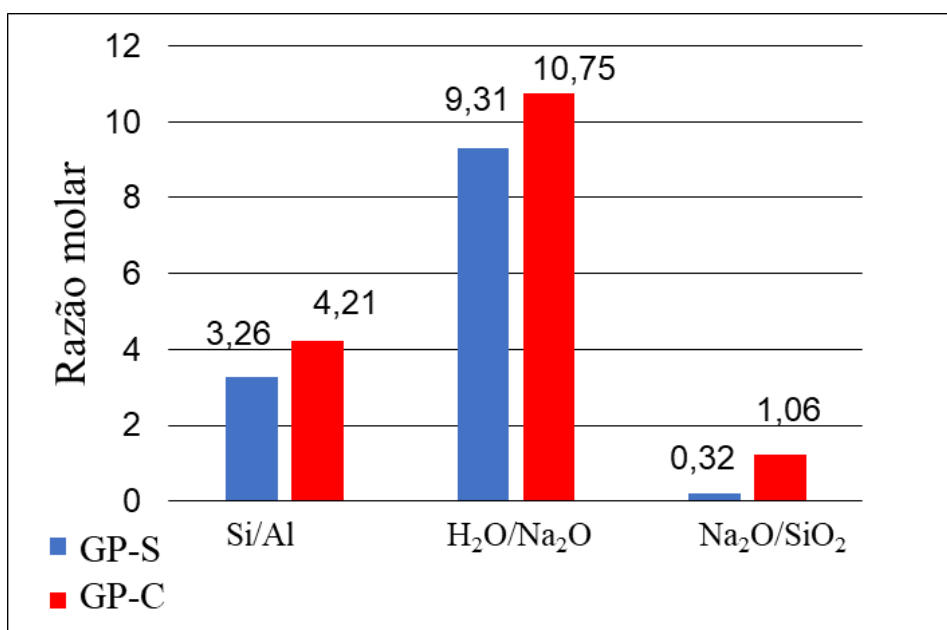
A figura 26 mostra a influência dos parâmetros adotados nesta pesquisa na resistência à compressão. Além disso pelo FRX dos geopolímeros, como ligantes, nos teores identificados de Si =48,01% e Al=25,08% para GP-S e Si = 58,10% e Al = 23,25%, foi possível determinar

a razão Si/Al nas argamassas. Do ponto de vista da análise dos ativadores na resistência à compressão, a razão Si/Al nas argamassas GP-S foi, aproximadamente, 29% menor em relação à argamassas GP-C, isso representa um parâmetro significativo na resistência à compressão, (LAHOTHI *et al.*,2017).

No que diz respeito à razão molar de H_2O/Na_2O , existe uma diferença 15% menor para o GP-S em relação ao GP-C. Conforme Rocha (2017) a razão molar de H_2O/Na_2O é um fator que contribui para aumentar a geopolimerização sem comprometer a dissolução dos íons, contudo conforme Davidovits (1991), existe uma variação de $10 < H_2O/Na_2O < 25$. Entende-se com isso que o grupo GP-C foi beneficiado pela adição dos álcalis contido na solução de Na_2SiO_3 quando resultou em argamassas mais resistentes.

Contudo, a razão que mais influenciou na diferença entre os grupos de argamassa foi a razão molar de Na_2O/SiO_2 , cerca de 3 vezes menor no GP-S em relação ao GP-C. Esse resultado concorda com a afirmação de Guo *et al.* (2010), que afirmam que o aumento na concentração dos álcalis pode melhorar a solubilidade dos aluminossilicatos, originando maiores resistência à compressão.

Figura 26 - Razões molares de Si/Al, H_2O/Na_2O e Na_2O/SiO_2 para os geopolímeros GP-S e GP-C.



Do ponto de vista da influência do resíduo na resistência à compressão, a tabela 8 mostra o resumo do resultado obtido quando aplicado ANOVA comparando a referência das argamassas com 0% de teor de resíduo com 50 e 100% na substituição da areia. Os graus de

liberdade (GL) das variedades e do resíduo são os mesmos nos dois grupos de argamassa, tendo em vista que ambas têm o mesmo número de variáveis e a mesma quantidade de amostras. O valor tabelado estatístico para F(5%) para variedade 2 e resíduo 9 foi de 4,15. Observou-se então que o fator estatístico calculado (Fcal) foi superior ao fator tabelado para os dois grupos de argamassa e assim rejeita-se a hipótese nula, ou seja, pelo menos uma ou as duas argamassas com substituição são diferentes.

Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos pela ANOVA nas argamassas do grupo S e C.

GP-S					
Fonte de variação	GL	SQ	QM	Fcal.	Ftab.
Variedades	2	103,21	51,60	100,59	4,15
Resíduo	9	4,62	0,51	-	-
Total	-	107,82	-	-	-
GP-C					
Variedades	2	1205,1	602,55	822,53	4,15
Resíduo	9	6,59	0,73	-	-
Total	-	1211,7	-	-	-

Aplicando o teste Tukey, a tabela 9 mostra os resultados das diferenças entre as médias ao comparar a resistência à compressão 0% de teores com 50 e 100%. Todas as médias obtidas ficaram acima da d.m.s. Isso significa que os teores de substituição da areia por resíduo plástico influenciaram na resistência das argamassas de forma significativa e são estatisticamente diferentes.

Tabela 9 - Resultados do teste Tukey.

Comparações entre grupo S	Diferença entre as médias	d.m.s	Conclusão
GP0-S e GP50-S	2,28	0,73	$2,28 \geq 0,73$
GP0-S e GP100-S	7,04	0,73	$7,04 \geq 0,73$

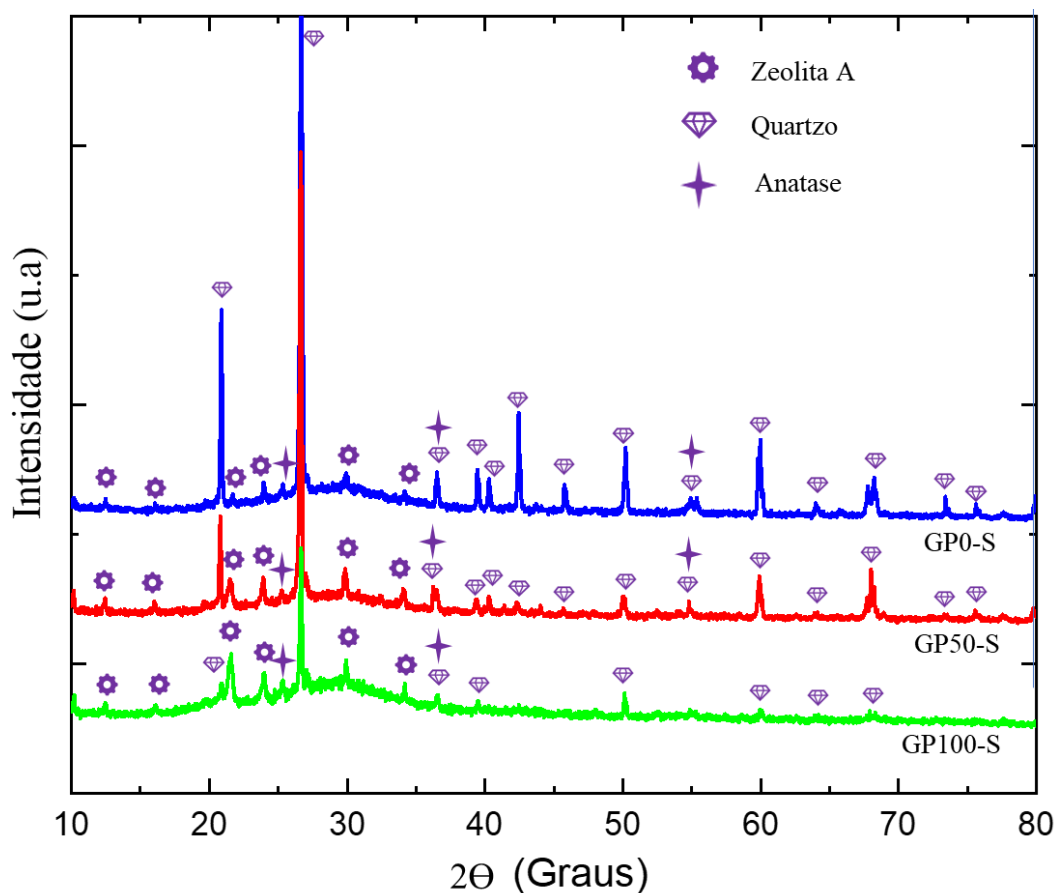
Comparações entre o grupo C	Diferença entre as médias	d.m.s	Conclusão
GP0-C e GP50-C	13,49	0,73	$13,49 \geq 0,73$
GP0-C e GP100-C	24,50	0,73	$24,50 \geq 0,73$

Nota-se, inclusive, que a diferença entre as médias no grupo C mostraram-se maior quando comparada às argamassas do grupo S com os mesmos teores de substituição. Desse modo, observando o que foi discutido anteriormente sobre a resistência à compressão, há uma influência na melhoria das propriedades mecânicas nas argamassas do grupo C, em função do ativador composto, o que justifica a grande diferença das médias entre os grupos.

4.9 Identificação das fases por DRX nas argamassas de geopolímero

A figura 27 mostra no DRX das argamassas do grupo GP-S. Nos espectros os picos cristalinos correspondem ao mesmo ordenamento atômico do quartzo e anastase já observados no difratograma da metacaulinita. De acordo com os estudos de Azevedo *et al.* (2018) e Bature *et al.* (2021), essas fases não contribuem na formação de cadeias poliméricas.

Figura 27 - DRX das argamassas do grupo GP-S.



Observou-se a formação de uma nova fase, a zeólita A, cuja fórmula estrutural é $\text{Al}_{12}\text{Na}_{12}\text{O}_{48}\text{Si}_{12}$ (grupo espacial: Pm-3m). Em geopolímeros, esta estrutura é relativamente comum em matriz de metacaulinita ativada com hidróxidos, devido à estrutura pseudozeolítica (LONGHI *et al.*, 2020; WAN *et al.*, 2017). A fase zeolítica também foi encontrada nos estudos de Bature *et al.* (2021) na produção de argamassa ativada com NaOH.

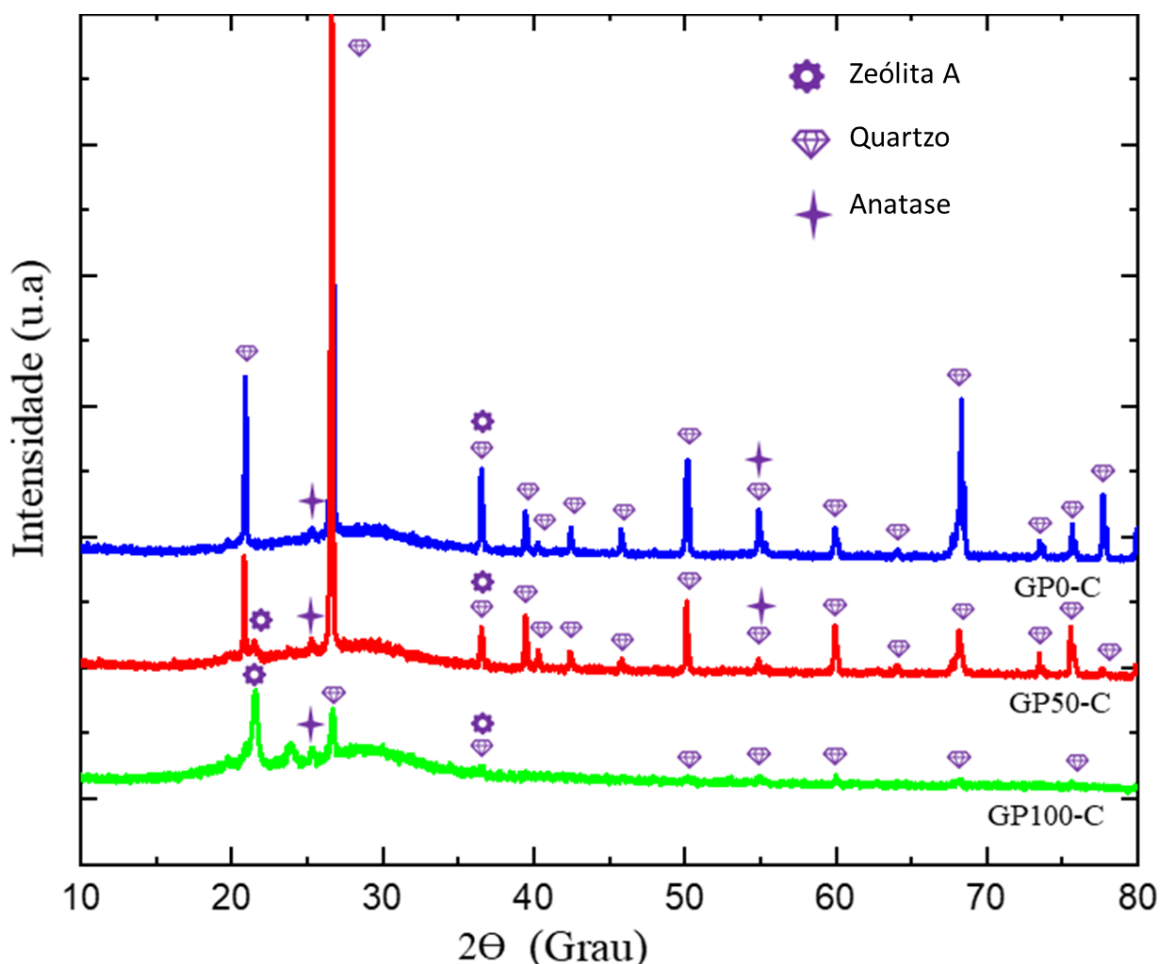
Uma das características da zeólita é a sua estrutura microporosa e isso pode contribuir para diminuição da resistência que ocorre a partir da incorporação de uma proporção mínima na matriz geopolimérica (DA LUZ, 1995; ROZECK *et al.*, 2019; ISTUQUE *et al.*, 2016).

O deslocamento da banda amorfa que inicialmente era de 15 a 30°C na metacaulinita, sofreu um deslocamento para os ângulos 18 a 38°C. De acordo com Azevedo^a *et al.* (2018), este deslocamento está relacionado à formação do gel aluminossilicato.

A figura 28 mostra DRX das argamassas GP-C que apresentam um amplo halo difuso associado ao estado amorfo e picos definidos associados ao estado cristalino identificando a existência das fases do quartzo e anatase já presentes no caulim, e picos de zeólita em menor

quantidade quando comparado as argamassas do grupo GP-S. As argamassas de geopolímero do grupo GP-S são mais cristalinas e as do grupo GP-C mostram uma estrutura semi-cristalina.

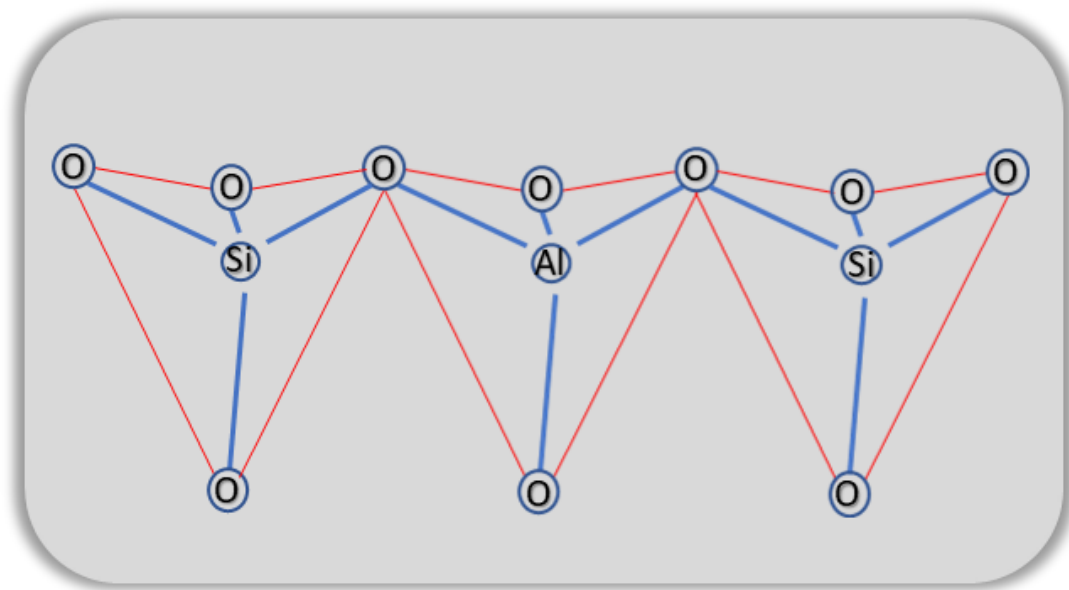
Figura 28 - Difratoograma das argamassas do grupo GP-C.



A razão Si:Al define o tipo de estrutura tridimensional formada na geopolimerização e suas aplicações em materiais. As estruturas formadas podem ser: poli(sialato), -Si-O-Al-O- (razão Si:Al=1:1); poli(sialato-siloxo), -Si-O-Al-O-Si-O- (Si:Al=2:1) e poli(sialato-dissiloxo), -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- (Si:Al=3:1) (AZEVEDO *et al.*, 2018). Isso ocorre por meio de uma reorganização estrutural durante a síntese do geopolímero conforme mostrado por Davidovits (1991).

A razão Si:Al no geopolímero foi de 1,9:1 no GP-S e 2,5:1 no GP-C, calculado a partir da composição química obtida por FRX. Isso indica que a estrutura formada pelos geopolímeros GP-S e GP-C ficaram mais próximas de um poli(sialato-siloxo), mostrado na figura 29.

Figura 29 - Rearranjo atômico tridimensional do geopolímero poli (sialato-siloxo).



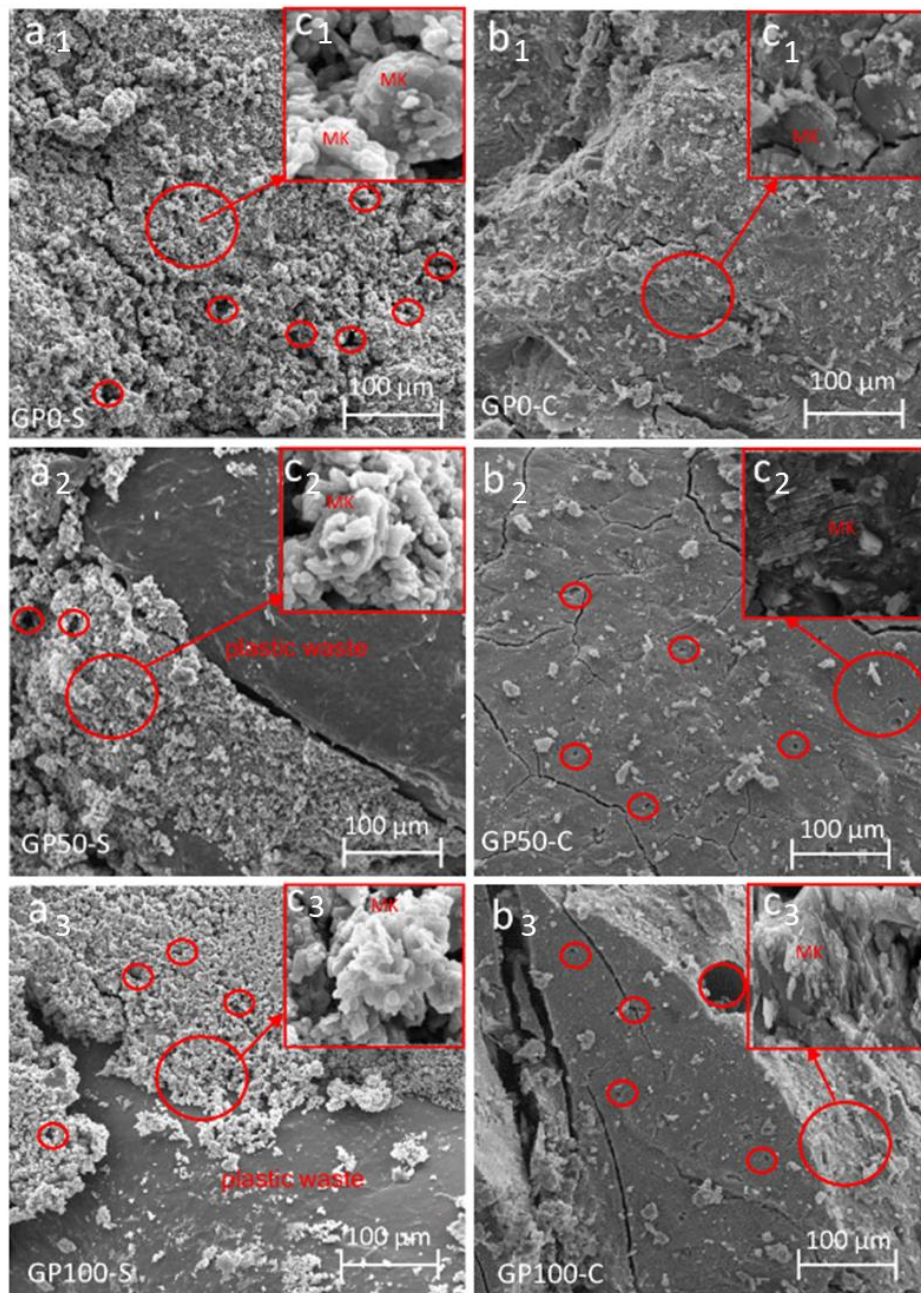
Fonte: Davidovits (1991), adaptado.

De acordo com Fernandez-Jim *et al.* (2008), quanto maior a razão Si:Al, menor será a porcentagem de zeólitas formada no geopolímero, devido ao incremento da fonte de sílica que impede a cristalização das zeólitas (WAN, *et al.*, 2017). Assim sendo, esse resultado está de acordo sobre a dosagem dos ativadores terem influenciado no incremento da resistência nas argamassa no grupo GP-C.

4.10 Microestrutura das argamassas

A figura 30 mostra a morfologia das argamassas GP-S e GP-C após a fratura do corpo de prova, no ensaio de compressão, motivo pelo qual se observa a presença de trincas nas amostras. A porosidade, destacada em círculos vermelhos, é mais expressiva no grupo S, e pode ser atribuída a bolhas de ar que foram aprisionadas durante a geopolimerização conforme Dias (2012). Além disso no GP50-S e GP100-S, o resíduo de PEBD pode ter incrementado a porosidade em virtude da maior perda de umidade durante a cura. Nota-se também que nas argamassas GP50-S e GP100-S não houve total interação entre a matriz e o resíduo plástico, o que pode estar relacionado com a variação granulométrica das partículas que dificultou o empacotamento entre os materiais.

Figura 30 - Morfologia das argamassas GP0-S (a₁), GP50-S (a₂), GP100-S (a₃), GP0-C (a₂), GP50-C (b₂), GP100-C (b₃) e ampliação da morfologia da metacaulinita não reagida (C₁, C₂ e C₃)



Diferentemente da morfologia do grupo anterior, o grupo C mostrou que as partículas de metacaulinita apresentaram maior agregação, o que resultou em uma matriz mais compacta que favorece a redução dos poros e incremento na resistência. Pode-se inferir que o ativador composto auxiliou na interação entre as partículas da matriz e do agregado, resultando em uma argamassa menos porosa e mais resistente. Para este grupo também foi observada metacaulinita não reagida (figura 30c), mas em menor quantidade em relação ao grupo S. Isso pode ter

ocorrido em função do tamanho das partículas mais grossas, da metacaulinita, que dificultaram a dissolução, conforme (CHEN *et al.*, 2011).

4.11 Teste da eflorescência

A figura 31 mostra a formação da eflorescência, na superfície das argamassas, após os 28 dias de cura para as amostras ao ambiente (figura 31a) e submersas (figura 31b).

Figura 31 - Amostras após teste de florescência das argamassas GP-S e GP-C aos 7, 14 e 28 dias, secas ao ambiente (a) e submersas (b).



A formação de eflorescência foi observada no grupo GP-S nas amostras “a” (expostas ao ambiente) nas idades de 7, 14 e 28 dias, enquanto nas amostras “b” (submersas), após 7 dias, a água estava migrando à superfície, gradativamente aos 14 e 28 dias, trazendo consigo os cristais, que cristalizaram e apresentaram comportamento semelhante às amostras “a”. No grupo GP-S, todas as argamassas que formaram eflorescência, também degradaram o compósito, conforme observado de forma mais expressiva nas figuras 31a e 31b aos 28 dias.

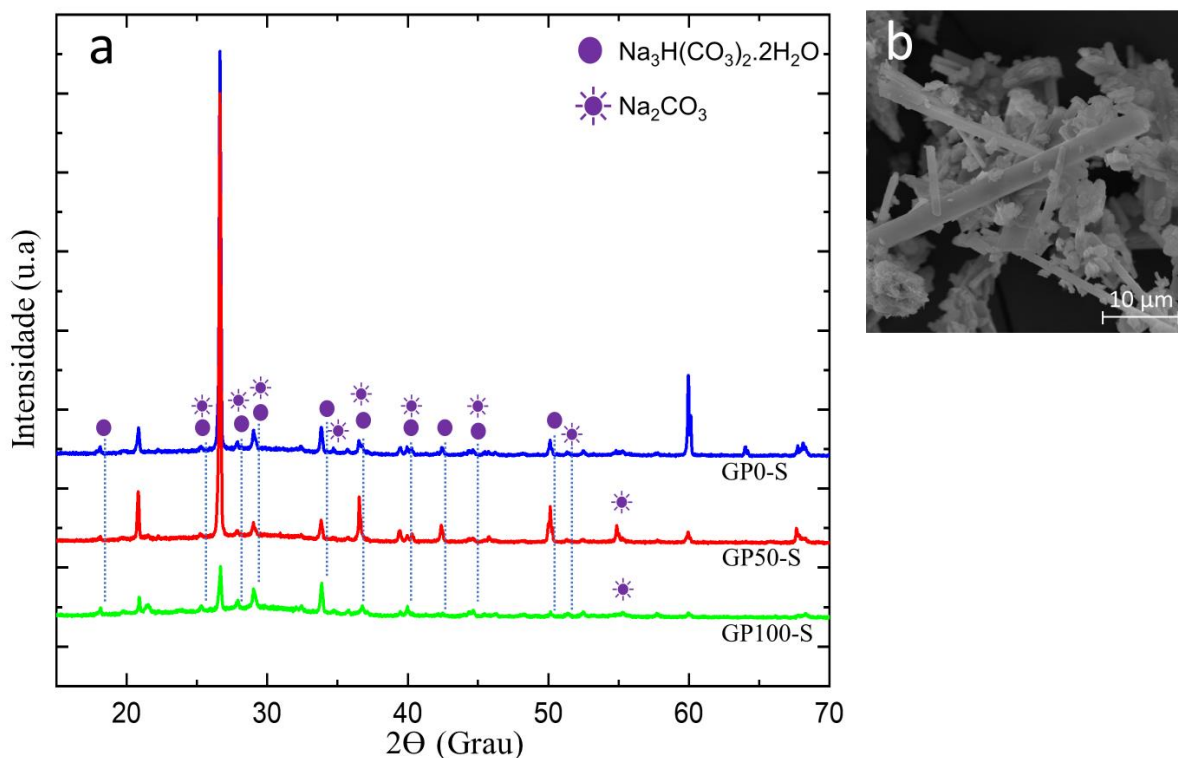
De acordo com Tam *et al.* (2022), álcalis e água são fatores que controlam a eflorescência, pois a água que é atraída para os poros por sucção capilar e depois evapora para a superfície, transportando íons alcalinos e causando eflorescência. No entanto, o produto esbranquiçado formado na superfície das amostras não pode ser observado visualmente. Isso pode ter ocorrido devido à quantidade de material transportado que se misturou aos sais. O lixiviado de sódio, formado nas amostras, pode indicar geopolimerização insuficiente, e isso foi observado nos resultados da microestrutura das argamassas GP-S.

O grupo de argamassas GP-C não apresentou manifestação de eflorescência, ou seja, o ajuste da química na dosagem do ativador composto, com adição de Na_2SiO_3 , foi suficiente para inibir a eflorescência, pois melhorou a interação da matriz com os agregados e reduziu a porosidade. Esse resultado concorda com o estudo de Longhi *et al.* (2020), pois também observaram que o silicato solúvel favorece a redução da eflorescência, quando reduz a porosidade e a permeabilidade, conforme observado no item 5.7.

A figura 32a mostra no difratograma da eflorescência coletada na superfície das argamassas do grupo GP-S. Picos de bicarbonato de sódio hidratado $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e carbonato de sódio Na_2CO_3 são identificados. Esses cristais que predominam na superfície das amostras são originários dos álcalis residuais que não reagiram na geopolimerização e migraram por lixiviação, transportado por meio da porosidade das argamassas, conforme observado nas características físicas e morfológicas desse grupo.

A figura 32b mostra DRX e a morfologia da eflorescência para as argamassas GP0-S (a), GP50-S (b) e GP100-S (c). A eflorescência predominante formada por cristais trona composto de $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (bicarbonato de sódio hidratado), conforme definido por (SANTOS *et al.*, 2019).

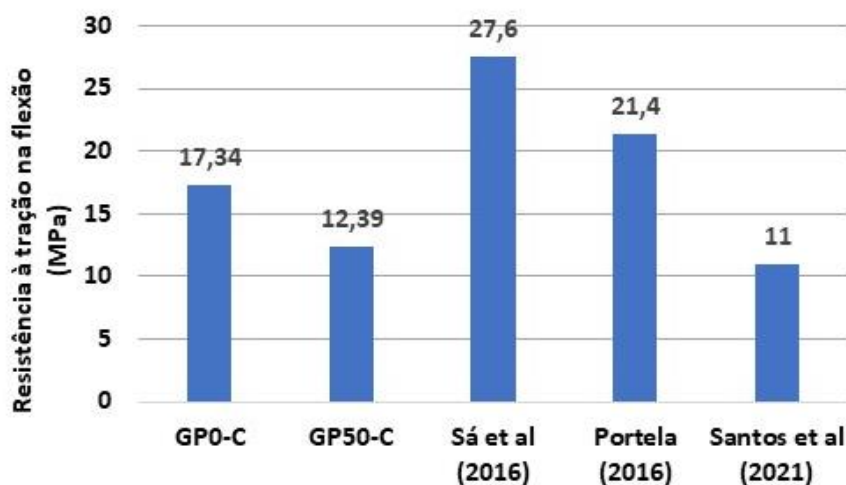
Figura 32 - DRX (a) e morfologia (b) da eflorescência formada nas argamassas GP-S.



4.12 Resistência à tração na flexão das placas cimentícias

A figura 33 mostra o valor da resistência à tração na flexão para as placas GP0-C, GP50-C em comparação com outros resultados obtidos na literatura. Nos trabalhos de Sá *et al.* (2016) e Portela (2016) os resultados foram maiores que o GP0-C e GP50-C. Contudo a resistência de 17,19 MPa ($\pm 2,4$ MPa) e 12,28 MPa ($\pm 1,3$ MPa) para GP0-C e GP50-C, respectivamente, alcançaram valores acima da resistência obtidas por Santos *et al.* (2021), em placas cimentícias de geopolímeros. Esse resultado da resistência da placa GP50-C, é suficiente para classificá-la como placa cimentícia para vedação externa e interna conforme a diretrizes da NBR 15498 (2021).

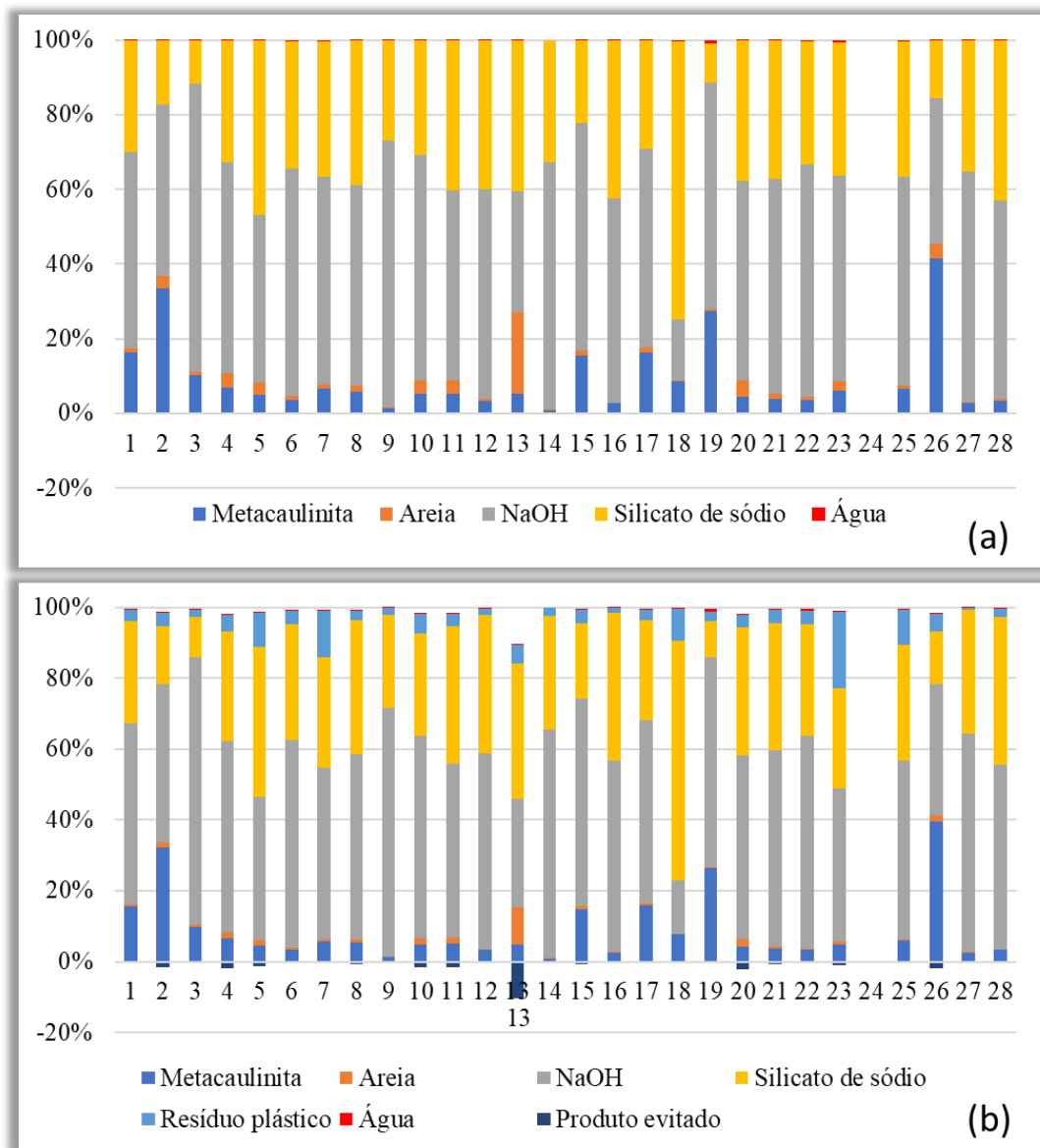
Figura 33 Resistência à tração na flexão das placas cimentícias GP0-C e GP50-C em função dos resultados obtidos por Sá *et al.* (2016); Portela (2016) e Santos *et al.* (2021) quando utilizaram fibra vegetais como reforço.



4.13 Avaliação do ciclo da vida

A figura 34 mostra o resultado da modelagem realizada pelo método EN 15804, com relação à caracterização dos impactos devidos à produção de placas cimentícias das argamassas GP0-C (figura 39a) e GP50-C (figura 39b). Notou-se que a placa com argamassa GP50-C, reduziu o impacto do uso da terra, anteriormente em 25% para 15% quando a areia (produto evitado) foi substituída por resíduo plástico. Contudo, na substituição, o resíduo plástico causou impacto em todas as categorias com destaque para 22% de toxicidade humana cancerígena - orgânica, 15% de toxicidade humana cancerígena e 10% de toxicidade humana cancerígena – metais.

Figura 34 - Caracterização de impacto ambiental da placa cimentícia GP0-C (figura 34a) e GP50-C (figura 35b) de acordo com o método EN 15804, com as seguintes categorias de impacto: 1. mudanças climáticas; 2. depleção de ozônio; 3. radiação ionizante; 4. formação fotoquímica de ozônio; 5. material particulado; 6. toxicidade humana não cancerígena; 7. toxicidade humana cancerígena; 8. Acidificação; 9. eutrofização da água doce; 10. eutrofização marinha; 11. eutrofização terrestre; 12. ecotoxicidade da água doce; 13. uso da terra; 14. uso da água; 15. uso de recursos fósseis; 16. uso de minerais e metais; 17. mudanças climáticas – fóssil; 18. mudança climática – biogênico; 19. mudança climática – uso da terra e mudança do uso da terra; 20. toxicidade humana não cancerígena – orgânica; 21. toxicidade humana não cancerígena – inorgânica; 22. toxicidade humana não cancerígena - metais; 23. toxicidade humana cancerígena – orgânica; 24. toxicidade humana cancerígena – inorgânica; 25. toxicidade humana cancerígena – metais; 26. ecotoxicidade da água doce – orgânicos; 27. ecotoxicidade da água doce – inorgânico e 28. ecotoxicidade da água doce – metais.



Esse resultado pode estar relacionado com o processo de produção resíduo durante a fase de transformação dos flocos (considerados micro plásticos), tendo em vista que parte do material se perde formando mais resíduos que vão parar nas galerias de águas pluviais, desaguando nos rios e oceanos. A água contaminada que entra em contato com a biota marinha interfere na cadeia alimentar, pois quando vai para a mesa dos seres humanos, acarretam doenças que advém da contaminação, tais quais: alterações na tireoide, mama e aparelho reprodutor masculino, inclusive infertilidade (CAIXETA, 2018).

A toxicidade humana cancerígena – metais, pode estar relacionada com as embalagens de polietileno PE que têm na sua composição metais (alumínio) para conservação do alimento, tais como as embalagens de salgadinhos. O SimaPro[®] tem uma biblioteca que não seleciona o PE específico, tal como PEBD de sacolas plásticas, material utilizado nessa pesquisa, dessa

forma, pode-se inferir que houve uma influência no impacto gerado pelo resíduo tendo em vista a generalidade do PE. Em todas as categorias, a substituição da areia pelo resíduo na placa cimentícia GP50-C (figura 34b) mitigou o impacto causado pela placa GP0-C (figura 34a).

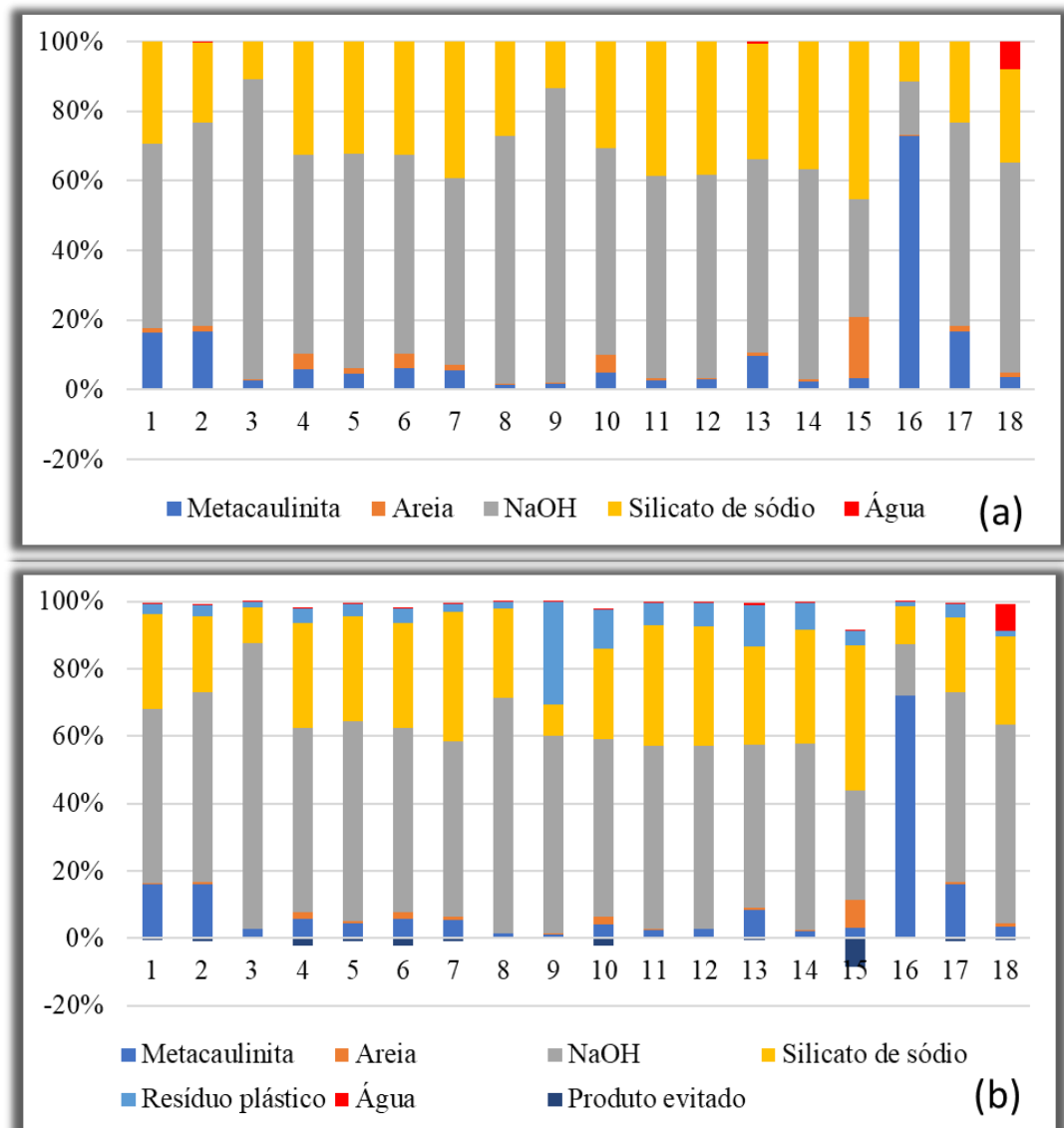
Os ativadores alcalinos apesar de terem sido os maiores causadores de impactos, na categoria aquecimento global com 52% para NaOH e 30% para o Na_2SiO_2 , totalizando 82% de emissão em CO_2 , esse impacto ainda é 21% menor que o causado pelo uso do cimento. Apesar dos ativadores terem uma forte influência nos impactos de geopolímeros, o cimento *Portland*, ainda é mais impactante quando influencia em 100% no aquecimento global, 100% em acidificação e 100% em eutrofização de acordo conforme a literatura de (BIANCO *et al.*, 2021). Isso também foi observado na pesquisa de Garces *et al.* (2021) no qual o cimento *Portland* representou aproximadamente 95% de impacto no aquecimento global.

Resultado semelhante, de grande gerador de impacto dos ativadores, também foi observado no estudo de Santos *et al.* (2022) quando estudaram ACV em geopolímeros ativados com KOH, confirmando assim, a literatura de Bianco *et al.* (2021), no que diz respeito à ao desempenho ambiental dos produtos alcalinos. Assim, tendo em vista o que a literatura apregoa quanto aos ativadores alcalinos, uma forma de mitigar os impactos em geopolímero, pode estar relacionada à dosagem das soluções ativadoras, assim como a concentração dos álcalis

A metacaulinita mostrou o maior impacto relacionado à depleção da camada de ozônio em 32% e ecotoxicidade da água doce em 40%. Isso ocorre em função da energia utilizada no tratamento térmico com a liberação do CO_2 . Todavia, na modelagem, foi considerada a argila calcinada entre 500 a 900⁰C sem identificação de tempo de tratamento térmico tendo em vista que, na biblioteca do SimaPro[®] não é possível selecionar a temperatura exata e tempo de tratamento térmico usados nessa pesquisa. Na categoria de toxicidade humana cancerígena inorgânica, nenhum material influenciou nesse impacto. Assim, pode-se deduzir que as placas cimentícias com argamassa GP0-C e GP50-C não tem potencial nocivo, direto, na saúde humana.

A figura 35 mostra o resultado da modelagem pelo método ReCipe 2016 nas placas cimentícias produzidas com argamassa GP0-C (figura 35a) e GP50-C (figura 35b). Por esse método o impacto pelo uso da terra na placa GP0-C reduziu de 18% para 9% com a substituição parcial da areia (produto evitado) por resíduo plástico na placa GP50-C. Nas demais categorias, o impacto causado pelo resíduo, de mesma forma como discutido anteriormente, pode estar relacionado a processo na produção do resíduo.

Figura 35 - Caracterização de impacto ambiental da placa cimentícia GP0-C (figura 35a) e GP50-C (figura 35b) de acordo com o método ReCipe 2016 com as seguintes categorias de impacto: 1. Aquecimento global; 2. Destruição da camada de ozônio; 3. Radiação ionizante; 4. Formação de ozônio (saúde humana); 5. Formação de partícula fina da matéria; 6. Formação de ozônio (ecossistema); 7. Acidificação terrestre; 8. Eutrofização da água doce; 9. Eutrofização marinha; 10. Ecotoxicidade terrestre; 11. Ecotoxicidade da água doce; 12. Ecotoxicidade marinha; 13. Toxicidade humana cancerígena; 14. Toxicidade humana não cancerígena; 15. Uso da terra; 16. Escassez de fonte mineral; 17. Escassez de recursos fósseis e 18. Consumo de água.



Quanto aos ativadores alcalinos, foram observados outros impactos, tal como 87% de eutrofização marinha ocasionada pelo NaOH, 45% pelo uso da terra e 40% de acidificação terrestre pelo uso do Na_2SiO_3 , esses são impactos que corroboram para que pesquisas busquem alternativas no uso resíduos para a produção de ativadores alcalinos, além de estudos na dosagem dos ativadores para a síntese de geopolímero.

Em relação à utilização da metacaulinita, o maior impacto com 70% foi na escassez de fonte mineral. Uma forma mais sustentável de proteger os recursos minerais pode ser a combinação binária ou ternária da metacaulinita com resíduos de cinzas da casca do arroz, cinzas volantes, lodo de estação de tratamento e outros materiais reativos que não necessitem de tratamento térmico, contribuindo também para mitigar os impactos das categorias 1 e 2.

No que tange a literatura, muitas pesquisas indicam o geopolímero como um material que reduz a emissão de CO₂ em função da substituição do cimento por materiais ricos em aluminossilicatos. Contudo, tendo em vista o que foi observado nessa pesquisa e fazendo uma analogia em relação à pesquisa de Santos *et al.* (2022), os maiores geradores de impacto foram os ativadores alcalinos.

Isto posto, após analisar os dois métodos nas argamassa GP-C, tendo em vista que algumas considerações adotadas na modelagem correspondem a uma aproximação do que foi realizado, a placa cimentícia pode ser classificada como um material sustentável para aplicação na construção.

CONCLUSÕES

O caulim coletado na região metropolitana de Manaus é um material rico em aluminossilicatos e com alto teor de caulinita, de acordo com o que foi identificado pelo método Rietveld, com potencial para produzir metacaulinita reativa. A calcinação do caulim na temperatura de 650⁰C por 1 h se mostrou eficiente em termos de mudança de fase da cristalina para a amorfa, condição ideal para produzir geopolímeros, o que também foi confirmado pela mineralogia com elevados teores de sílica e alumina.

A variação mais expressiva na porosidade e consequente absorção de água foi observada na argamassa GP100-S com 64,2 e 32,14%, respectivamente, quando comparado à argamassa GP100-C com 42,11 e 29,63% porosidade e absorção, respectivamente. Constatou-se que o fator determinante para isso está relacionado ao tipo de ativador, tendo em vista que os agregados tiveram melhor interação com a matriz quando ativados com um composto ativador.

A resistência à compressão variou entre as argamassas de cada grupo em cada nível de substituição. Para o grupo GP-S, a resistência de 14,78, 12,47 e 7,71 MPa diminuiu proporcionalmente com o aumento do resíduo plástico. O mesmo efeito ocorreu para as argamassas do grupo GP-C com 35,19, 22,69, 10,68 MPa. Esses resultados foram influenciados pela porosidade das argamassas, que causam defeitos e contribuem para a queda de resistência.

Do ponto de vista da análise dos ativadores na resistência à compressão, a razão molar que mais influenciou no incremento da resistência foi Na₂O/SiO₂ que resultou em 0,32 e 1,06 para GP-S e GP-C, uma diferença cerca de 3 vezes maior no GP-C em relação ao GP-S, ocorrido pelo aumento na concentração dos álcalis que promoveu uma melhor dissolução dos aluminossilicatos com aumentando a concentração de Na₂O da solução composta.

A análise da microestrutura das argamassas mostrou que, o ativador simples do grupo GP-S mesmo a 12 mol/L, não foi suficiente para produzir um gel N-A-S-H mais resistente e ainda exacerbou a formação da eflorescência. Por outro lado, o ativador composto, além de favorecer a formação de uma matriz mais compacta e mais resistente, inibiu eflorescência e permitiu uma melhor adesão entre as partículas da matriz com os agregados.

Em termos de formação da eflorescência, o ativador composto foi o que teve o melhor comportamento quando deixou a matriz mais compacta e menos porosa, o que contribuiu para evitar a eflorescência na argamassa, mesmo na substituição em teores maiores de resíduo plástico.

O resultado de resistência à flexão na placa da argamassa GP50-C, classificou o material para aplicação em placas cimentícias de vedação conforme a NBR 15498, nas classe A e B 12,28 MPa.

Pela ACV, a placa cimentícia com argamassa GP50-C mostrou um bom desempenho ambiental, além de mitigar o problema gerado pelos resíduos sólidos que advém do descarte indevido dos materiais plásticos, contribuindo para reduzir em até 10% o impacto do uso da terra.

Isto posto, as argamassas do grupo GP-C mostraram ter potencial para produzir um material para a construção a partir de uma aplicação sem fins estruturais, mas que possam ser uma alternativa sustentável, como por exemplo um elemento de vedação interna nas edificações, podendo também se uma opção para forro e revestimento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No que diz respeito aos resultados da pesquisa, como complementação sugere-se:

- Estudar novas dosagens NaOH e Na₂SiO₃ no ativador composto que possam contribuir para mitigar o impacto ambiental.
- Realizar testes nas placas para proposta de revestimento em parede.
- Realizar análise de condutividade termica nas placas de geopolímero em aplicação de vedação externa.
- Estudar ACV comparando placas produzidas com cimento *Portland* e placas de geopolímero.

REFERÊNCIAS

ABRELP: 80% DOS RESÍDUOS ENCONTRADOS NOS OCEANOS TEM ORIGEM NAS CIDADES. Disponível em: <https://ultimosegundo.ig.com.br/ciencia/meioambiente/2018-03-21/abrelpe-combate-a-poluicao.html>. Acesso 29/09/2018.

ALI, S. S.; ELSAMAHY, T.; KOUTRA, E.; KORNAROS, M.; EL-SHEEKH, M.; ABDELKARIN, E. A.; SUN, J. Degradation of conventional plastics wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. **Science of Total Environment**, 771 (2021) pp.144719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>.

ALZAZA, A.; MASTALI, M.; KINNUNEN, P.; KORAT, L.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; DUCMAN, V.; ILLIKAINEN, M. Production of lightweight alkali activated mortars using mineral wools. **Materials**, 12 (2019) pp.1695. <https://doi.org/10.3390/ma12101695>.

AMOBONYE, A.; BAGHWAT, P.; SINGH, S.; PILLAI, S. Plastic biodegradation: frontline microbes and their enzymes. **Science of the Total Environment**, 759 (2021) pp. 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>.

AMBIENTE MELHOR. Disponível em: <http://www.ambientemelhor.com.br/index.php/artigos/item/112-classificacao-de-selos-ambientais>. Acesso em 16/07/2022.

ASSI, L.; GHARHARI, S.; DEEVER, E.; LEAPHARD, D.; ZIEHL, P. Improvement of the early and final compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete at ambient conditions. **Construction and Building Materials**, 123 (2016) pp. 806–813.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6502**. Rochas e solos – Terminologia, Rio de Janeiro (1995).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7211**. Agregados para concreto, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15498**. Placas cimentícias sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 9776**. Agregados. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7215**. Determinação de resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12142**. Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ISO 14040**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo da vida – Princípios e estrutura, Rio de Janeiro, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ISO 14044**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo da vida – Requisitos e orientações, Rio de Janeiro, 2009

AZEVEDO^a, A. G. DE S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, 64 (2018) pp. 388-396.
<http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712420>.

AZEVEDO^b, A. R. G., **Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – (2018).

BARBOSA, E. P. **Estudo da produção e caracterização de metacaulinita para utilização como material cimentício suplementar**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas – Manaus (2019).

BAHORIA, B. V.; PARBAT, D. K.; NAGARNAIK, P. B. XRD Analysis of Natural sand, Quarry dust, waste plastic (ldpe) to be used as a fine aggregate in concrete. **Materials Today Proceedings**, 5 (2018) pp.1432-1438. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.230>.

BAI, C.; COLOMBO P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. **Ceramics International**, 14 (2018) pp.16103-16118.

BATURE, A. S.; KHORAMI, M.; GANJIAN, E.; TYRER, M. Influence of alkali activator type and proportion on strength performance of calcined clay geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, 267 (2021) pp. 120446.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120446>.

BERNAL, A. S; GUTIERREZ, R.M.; RODRÍGUEZ, E.D. Materiales de activación alcalina: ementando un futuro Sostenible. **Ingeniería y Competitividad**, 15 (2013).

BHOGAYATA, A.C.; ARORA, N. K. Utilization of metalized plastic waste of food packaging articles in geopolymer concret. **Journal Materials Cycles Waste Management**, 21 (2019) pp. 1014-026. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00859-9>.

BIANCO, I.; TOMOS, B. A .D.; VIANI, R. Analysis environmental impacts ok alkali-activated concrete produced with waste glass-derived silicate activator – A LCA study. **Journal Cleaner Production**. 313 (2021) 128383.
<https://doi.org/10.016/j.jclepro.2021.128383>.

BIGNOZZI, M. C.; MANZI, S.; NATALI, M. E.; RICHARD, W. D. A.; RIESSEN, A. Room temperature alkali activation of fly ash: The effect of Na₂O/SiO₂ ratio. **Construction and Building Materials Materials**, 69 (2014) pp. 262-270.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.062>.

BINICI, H. Effect of aggregate type on mortars without Cement. **Europen Journal of Engennering and Techology**, 1(2013) pp. 1-6. <https://www.idpublications.org/wp->

content/uploads/2013/08/EFFECT-OF-AGGREGATE-TYPE-ON-MORTARS-WITHOUT-CEMENT.pdf. Acessado em 15/12/2021.

CABALLERO, L. R.; PAIVA, M. D. M.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TOLEDO, R. D. Thermal, Mechanical and Microstructural Analysis of Metakaolin Based Geopolymer. **Materials Research**, 22 (2019). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0716>.

CAIXETA, D. S.; CAIXETA, F. C.; MENEZES FILHO, F. C. Nano e microplásticos no ecossistema: Impactos ambientais e efeitos sobre o organismo. **Enciclopédia Biosfera**. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A92. Acessado em: 15/05/2021.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando à substituição de agregado miúdo em argamassa**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Materiais e em Processos Químicos Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro (2005).

CAO, V. D.; PILEHVAR, S.; SALAS-BRINGAS, C.; SZCZOTOK, A.M.; RODRIGUEZ, J. F.; CARMONA, M.; AL-MANASIR, N.; KJØNIKSEN, A. L. Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications. **Energy Conversion and Management**, 133 (2017) pp. 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.061>.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, (2016) pp. 714-732. ISSN 1517-7076.

CHEN, J.H.; HUANG, J.S.; CHANG, Y.W. Use of reservoir sludge as a partial replacement of metakaolin in the production of geopolymers. **Cement & Concrete Composites**. 33 (2011) pp. 602–610. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.002>.

CHENG, H.; LIU, Q.; YANG, J.; FROST, R. L. Thermogravimetric analysis of selected coal-bearing strata kaolinite. **Thermochimica Acta**, 2010, 507-508, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.05.004>.

CPRM, 2016. RIKER, S. R. L.; LIMA, F. J.C.; MOTTA, M. B.; SILVA, D. P. B. **Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas, escala de integração 1:500.000**, Manaus, ISBN: 978-85-7499-285-3.

DA LUZ, A. B. **Zeólitas: propriedades e usos industriais**. Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995. <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/132/1/stm-68.pdf>. Acessado em: 09 de out. de 2021.

DAVIDOVITS J. Geopolymer - Chemistry and Applications. **Institute Geopolimère**, 3rd edition.-France, Saint-Quentin, (2011) pp. 612.

DAVIDOVITS J. Geopolymer Cement a review, published in Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21 (2013), **Geopolymer Institute Library**. www.geopolymer.org.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 37 (8) (1991) pp. 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/bf01912193>.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry & Applications. **Institute Géopolimère**, 5th edition, France (2020).

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymers and methods of making them**, US Patent 4, pp.349-386, 1982. Google Patentes.

DIAS, N. A. **Geopolímeros contributos para a redução da eflorescência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho (2012). <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/30326/1/Nuno%20Amadeu%20Antunes%20Dias.pdf>.

DAOU, I.; LECOMTE-NANA, G. L.; TESSIER-DOYEN, N.; PEYRATOUT, C.; GONON, M. F.; GUINEBRETIERE, R. Probing the Dehydroxylation of Kaolinite and Halloysite by In Situ High Temperature X-ray Diffraction. **Minerals**, (2020). Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/minerals-10-00480.pdf>. Acessado em: 01 de nov. de 2022.

DREYER, L. C.; NIEMANN, A. L.; AND HAUSCHILD, M. Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 4 (2003) 191–200. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2003.06.115>.

ECO. Planos municipais de resíduos sólidos esbarram em interesses econômicos e políticos. 2018. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/reportagens/planos-municipais-de-residuos-solidos-esbarram-em-interesses-economicos-e-politicos/>. Acesso 25/05/2019.

FAQIR, N.M.; SHAWABKEH, R.; AL-HARTHI, M.; WAHHAB, H.A. Fabrication of Geopolymers from Untreated Kaolin Clay for Construction Purposes. **Geotech Geol Eng**, 2019, 37, 129. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0597-5>.

FERCAL, foros e divisórias. <http://fercaljba.com.br/produto-detalhes/22/placa-ciment%C3%ADcia>. Acessado em: 27 de nov. de 2021.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; MONZÓ, M.; VICENT, M.; BARBA, A./ PALOMO, A. 2008. Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: obtain of Zeoceramics and Zeocements. Microporous Mesoporous. **Microporous and Mesoporous Materials**. 108, 41e49. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.03.024>.

FIRDOUS, R. STEPHAN, D.; DJOBO, J. N.Y. Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. **Construction and Building Materials**, 190 (2018) pp.1251– 1263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.191>.

FRIAS, M., CANEDA-MARTINEZ, L.; ROJAS, S. M.I.; MEDINA, MEDINA,C. Future Eco-Efficient Cements Prepared With Kaolinite-Based Industrial Wastes. **Reference Module in Materials Science and materials Engineering** (2019). <https://doi-org.ez2.periodicos.capes.gov.br/10.1016/B978-0-12-803581-8.11436-5>.

F3 CONSTRUÇÕES. Disponível em: <https://www.f3construcoes.com.br/instalacao/placa-cimenticia.html>. Acessado em: 30 de out. de 2022.

GERALDO, R. H.; OUELLET-PLAMONDON, C. M.; MUIANGA, E. A.; CAMARINI, G. Alkali-activated binder containing wastes: a study with rice husk ash red ceramic. **Ceramics** 63 (2017) 44-51. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633652057>.

GRANIZO, M. L.; BLANCO-VARELA, M. T.; PALOMO, A. Influence of the starting kaolin on alkali-activated materials based on metakaolin. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry. **Journal of Materials Science**, 35 (2000) pp. 6309-6315. <https://doi.org/10.1023/A:1026790924882>.

GARCES, J. I. T.; DOLLENTE I. J.; BELTRAN, A. B.; TAN, R. R.; PROMENTILLA, M. A. B. Life cycle assessment of self-healing geopolymer concrete. **Cleaner Engineering and technology**. 4 (2021) 100147. <https://doi.org/10.1016/j.cleat.2021.100147>.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, 3 (2017) pp. 1700782. Acessado em: 04 de abril de 2021.

GÖRHAN, G.; KÜRKLÜ, G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites Part B: Engineering**. 58 (2014) pp. 557-579.

GRILLO, C. C. **Reciclagem de rejeitos de polietileno de baixa densidade provenientes de uma cooperativa de catadores na forma de madeira plástica**. Dissertação (mestrado em Ciências - Engenharia de Materiais na Área de Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (2016).

GUO, X. SHI, H.; DICK, W. A. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, 32 (2010) pp.142–147. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003.

HARIADI, D.; SALEH, S. M.; YAMIN, R. A.; APRILIA, S. Utilization of LPDE plastic waste on the quality of pyrolysis oil as an asphalt solvent alternative. **Thermal Science and Engineering Progress**, 23 (2021) pp. 100872. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100872>.

IZADIFAR, M.; THISSEN, P.; STEUDE, A.; KLEEBERG, R.; KAUFHOLD, S.; KALTENBACH, J.; SCHUHMANN, R.; DEHN, F.; EMMERICH, K. Comprehensive examination of dehydroxylation of kaolinite, disordered kaolinite, and dickite: experimental studies and density functional theory. **Clays and Clay Minerals**, 2020, 68, 319-333. Disponível em: <https://link-springer-com.ez2.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s42860-020-00082-w>. Acessado em: 20 de out. de 2022.

ISTUQUE, D. B.; REIJ, L.; AKASAKI, J. L.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; TASHIMA, M. M. Behaviour of metakaolin-based geopolymers incorporating sewage sludge ash (SSA). **Materials Letters**, 180 (2016) pp. 192-195. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.05.137>.

JASSIM, A. K. Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. **Procedia Manufacturing**, 8 (2017) pp. 635-642. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.08>.

JENKINS, S. Q; QUER, A. M. I.; FONSECA, C.; VARRONE, C. Microbial degradation of plastics: new plastics degraders, mixed cultures and engineering strategies. *Soil Microenvironment for Bioremediation and Polymer Production*. **Scrivener Publishing LLC**, (2019) pp. 213-238. <https://doi.org/10.1002/9781119592129.ch12>.

KUNTHAWATWONG, R.; SYLISOMCHANHA, L.; PANGDAENG, S.; WONGSA, A.; SATA, V.; SUKONTASUKKUL, O.; CHINDAPRASIRT, P. Recycled Non-Biodegradable polyethylene terephthalate waste as fine aggregate in fly ash geopolymer and cement mortars. **Construction and Building Materials**. 328 (2022) 127084. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.021>.

LAHOTI, L.; NARANG, P.; TAN, K. H; YANG, E. H. Mix design factors and strenght prediction of metakaolin-based geopolymer. **Ceramics International**, 43 (2017) pp. 11433-11441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.006>.

LENKA, S.; PANDA, C. K. Effect of metakaolin properties of conventional and self-compacting concrete. **Advances in Concrete Construction**, 5 (2017) pp. 31-48. <https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.1.031>

LIU, D.; ZHANG, Y.; ZHOU, A.; NNACHI, E. N.; HUO, S.; ZHANG, Q. The Kaolinite Crystallinity and Influence Factors of Coal-Measure Kaolinite Rock from Datong Coalfield, China. **Minerals**, 2022, 12, 54. <https://doi.org/10.3390/min12010054>

LONGHI, M. A.; RODRIGUEZ, E. D.; WALKLEY, B.; ZHANG, Z.; KIRCHHEIM, A. P. Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation. **Composites B**, 182 (2020) pp. 107671. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107671>.

LOT, A. V.; MELCHIADES, F. G.; BOSHI, A. O. Influência das características de metacaulim no desempenho de geopolímeros. **Cerâmica Industrial**. 20 (2015). <https://dx.doi.org/10.4322/cerind.2015.017>.

MARQUES, M.G.S.; MELO FILHO, J.A.; MOLINA, J. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; VASCONCELOS, R. P.; CALIL JÚNIOR, C. Numerical-experimental assessment off the arumã fiber as reinforcement to the cementitious matrix. **Key Enginnering Materials**, 600 (2014) pp. 460-468. Disoinível em: <https://www.scientific.net/KEM.600.460>. Acessado em 3 de maio de 2021.

MC LELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. C. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. **Journal Cleaner Production**, 19 (2011) pp. 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>.

MIKHAILENKO, P.; CASSAGNABÈRE, F.; EMAM, A.; LACHEMIC, M. Influence of physico-chemical characteristics on the carbonation of cement paste at high replacement rates of metakaolin. **Construction and Building Materials**, 158 (2018) 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.021>.

NEVES, K. P. L.; MELO FILHO, J. A.; Produção de metacaulinita a partir de caulim da região de Presidente Figueiredo. 75º Congresso Técnico Científico de Engenharia e da Agronomia, CONTECC, Alagoas. **Anais...**Maceio, 2018.

NORTON, F. H. **Cerâmica fina**. Barcelona: Ediciones Omega, 1975. P. 27-29.

NUAKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer properties. **Journal Cleanear Production**, 112 (2018) 2300-2307. <https://doi.org/10.1016/j.clepro.2015.10.109>.

OIKAVA, F.F.; PORTELA, G. O. DE S.; MELO FILHO, J. A. Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com fibras da Amazônia. **Scientia Amazônia**, Amazonas, (2018) pp. 65-70. ISSN:2238.1910.

OLUSEYI, A.K.; OLANREWAJU, A.; PAL, M.; DAS, S.K. Evaluation of Nigerian Source of Kaolin as a Raw Material for Mullite Synthesis. **Oriental j. chemistry**, 2016, 32, 1571-1582. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/320333>.

O mundo do cimento. Available from: <www.cimento.org>. Acessado em: 15 de out. 2021.

PALOMO, Á.; KAVALEROVA, E.; FRENANDÉZ-JIMÉNEZ, A.; KRIVENKO, P.; GARCÍA-LODEIRO, I.; MALTISEVA, O. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. **Materiales de Construcción**. 315 (2015). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10261/110274>. Acessado em: 15 de outubro de 2021.

PTÁČEK, P.; FRANTIŠEK, S.; OPRAVIL, T.; HAVLICA, J.; BRANDŠTETR, J. The kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite by DTG technique. **Powder Tech.** 2011, 208, 20-25. doi:10.1016/j.powtec.2010.11.035.

PEREIRA, M. A.; VASCONCELOS, D. C. L.; VASCONCELOS, W. L. Synthetic Aluminosilicates for Geopolymer Production. **Materials Research**, 22 (2019). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0508>.

PLACLUX. <https://www.placlux.com/qual-a-diferenca-entre-chapa-de-fibrocimento-e-chapa-cimenticia/> Acessado em: 12 de ago. 2022.

PORTAL METÁLICA. Disponível em: <https://www.bing.com/images/search?q=portal+metálica+light+steel+frame&qpv=portal+metálica+LIGHT+STEEL+FRAME&form=IGRE&first=1&tsc=ImageHoverTitle>. Acessado em: 31 de out. 2022.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. Situação atual dos resíduos sólidos no brasil. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/situacao-atual-dos-rs-no-brasil/>. Acesso 29/10/2018.

PORTELA, G. **Compósito geopolimérico reforçado com tecido de juta**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas (2016).

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review of Materials Research**, 44 (2014) pp. 299-327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>.

POON, C.-S.; LAM, L.; KOU, S.; WONG, Y.-L.; WONG, R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. **Cement and Concrete Research**, 31 (2001) pp. 1301–1306. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00581-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00581-6).

RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, 41 (2013) pp. 303-318. <http://dx.doi.org/j.conbuildmat.2012.12.001>.

SÁ RIBEIRO, R. A.; SÁ RIBEIRO, M. G.; SANKAR, K.; KRIVEN, W. M. Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, 123 (2016) 501-507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>.

ROCHA, T. DA S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Universidade estadual do norte fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2017. https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2017/12/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Thais-da-Silva-Rocha_2017.pdf

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

ROZECK, P.; KRÓL, M.; MOZGAWA, W. Geopolymer-zeolite composites: A review. **Journal of Cleaner Production**, 230 (2019) pp. 557-579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.152>.

SANTANA, H. A.; NETO, J. S. A.; JÚNIOR, N. S. A.; RIBEIRO, D. V.; CILLA, M. S.; DIAS, C. M. Self-compacting Geopolymer mixture: Dosaging based on statistical mixture design and simultaneous optimization. **Construction and Building Materials**, 249 (2020) pp. 18677. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118677>.

SANTOS, M. R. G.; SÍGOLO, J. B. MEV como ferramenta na determinação de sais formados em uma lagoa salina no Pantanal. Estudo de Caso. **Geochimica Brasiliensis**, 33(2019) pp. 121-132. DOI:10.21715/GB2358-2812.2019331121.

SANTOS, G. Z. B.; OLIVEIRA, D. P.; MELO FILHO, J. A.; SILVA, N. M. Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. **Journal of Building Engineering**, 43 (2021) 102568. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102568>.

SANTOS, G. Z. B.; CALDAS, L. R.; MELO FILHO, J. A.; MONTEIRO, N. B. R.; RAFAEL, S. I. M.; SILVA, N. M. Circular alternative in the construction industry. **Journal Pre-proof**, 22 (2022) 104603. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022104603>.

SANI, M. A. N.; MAN, Z.; SHAMSUDIN, R. M.; AZIZLI, K.A.; SHAARI, K. Z. K. Determination of Excess Sodium Hydroxide in Geopolymer by Volumetric Analysis. **Procedia Engineering**, 148 (2016) pp. 298–301. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.621>.

SERRANO-RUIZ, H., MARTIN-CLOSAS, L., PELACHO, A.M. Biodegradable plastic mulches: impact on the agricultural biotic environment. **Science Total Environment**, 750 (2021) pp. 141228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141228>.

SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de materiais e processos**, (2013) 55-67. ISSN 1809-8797. Disponível em: Microsoft Word - REMAP_Editado_Review_pp_X_.doc (ufcg.edu.br). Acessado em: 01 de março de 2021.

SHARMIN, A.; ALEGARAN, U. J.; JUMAATA, M. Z.; YUSUF, M. O.; KABIR, S. A.; BASHAR, I. I. Influence of source materials the role of oxide composition on the performance of ternary blended sustainable geopolymer mortar. **Construction Building and Materials**, 144 (2017) pp. 608-623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.178>.

SILVA, G.; KIM, S.; BERTOLOTTI, B.; NAKAMATSU, J.; AGUILAR, R. Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes. **Construction and Building Materials**, 258 (2020) pp. 119697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119697>.

SILVA, K.C.; ROSAS, L. S. P.; OLIVEIRA, S. R. N. Gestão dos Resíduos Sólidos do Brasil evolução e desafios a caminho: Uma Revisão Integrativa. **Scientia Amazonia**, v.7, n.2, CA1-CA15 (2018). Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org> ISSN:2238.1910.

SILVEIRA, E. Mar de plástico. **Revista planeta**, ed. 540, 2018. <https://www.revistaplaneta.com.br/mar-de-plastico-2/> Acesso em: 08 de out. 2021.

SIMÃO, L.; FERNADES, E.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M. J.; MONTEDO, O. R. K., RAUPP-PEREIRA, F. Controlling efflorescence in geopolymers: A new approach. **Case Studies in Construction Materials**, 15 (2021) e00740. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00740>.

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S.K. Geopolymer concrete: a review of some recent developments. **Construction Building and Materials**, 85 (2015) pp. 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.

ŠKVÁRA, F.; KOPECKÝ, L.; ŠMILAUER, V.; BITTNAR, Z. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium Brown coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, 168 (2009) pp.711-720. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.089>.
ANDREJKOVIČOVÁ, S.; SUDAGAR, A.; ROCHA, J.; PATINHA, C.; HAJJAJI, W.; DA SILVA, E. F.; ROCHA, F. The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers. **Apply Clay Science**, 126 (2016) pp. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.009>.

SUN, K.; PENG, X.; WANG, S.; ZENG, L.; RAN, P.; JI, G. Effect of nano-SiO₂ on the efflorescence of an alkali-activated metakaolin mortar. **Construction and Building Materials**, 253 (2020) pp. 118952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118952>.

TAN, D; YUAN, P.; ANNABI-BERGAYA, F.; LIU, D.; HE, H. Methoxy-modified kaolinite as a novel carrier for high-capacity loading and controlled-release of the herbicide amitrole. **Scientific Reports**, 2015. DOI: 10.1038/srep08870. Acessado em 11 de outubro de 2022.

TAPKIRE, G.; PARIHAR, S.; PATIL, P.; KUMAVAT H. R.; Recycling plastic used in concrete paver block. **International journal of research in engineering and technology**, 3 (2014) pp. 33-35. ISSN: 2319-1163. Disponível em: <https://ijret.org/volumes/2014v03/i21/IJRET20140321009.pdf>. Acessado em: 15 de junho de 2021.

TAYLOR-LANGE, S. C.; RIDING, K. A.; JUENGER, M. C. Increasing the reactivity of metakaolin–cement blends using zinc oxide. **Cement and Concrete Composites**, 34 (2012) pp. 835–47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.004>

TELHATON.

https://www.telhaton.com.br/30/placa_cimenticia/eterplac/eterplac_standart.html. Acesso em: 28 de nov. de 2021.

THORNEYCROFT, J.; ORR, J.; SAVOIKAR, P.; BALL, R. J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. **Construction Building Materials**, 161 (2018) pp.63-69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.

TURRA, A.; MANZANO, A. B.; DIAS, R. J. S.; MAHIQUES, M. M.; BARBOSA, L.; , BALTHAZAR-SILVA, D.; MOREIRA, F. T. Three-dimensional distribution of plastic pellets in sandy beaches: shifting paradigms. **Science Reports** (2014). doi: 10.1038/srep04435.

United States Geological Survey (USGS). **Cement Statistics and Information**. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement>. Acessado em: 18/05/2021.

VASSALO, E. A. de S.; AGUILAR, M. T.P.; GUMIERE, A. G. Caracterização Microestrutural do Geopolímero Obtido de Metacaulim Rico em Ferro. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia de Materiais, Cuiabá - MT, 2014.

VAN DEVENTER, J. S.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**, 201 (2012) pp. 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>.

WAN, Q.; RAO, F.; SONG, S.; GARCÍA, R.E.; ESTRELLA, R. M.; PATINO, C. L.; ZHANG, Y. Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin-based geopolymers at extended Si/Al ratios. **Cement Concrete Composites**, 79 (2017) pp. 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.014>.

WEIL, M.; DOMBROWSKI, K.; BUCHWALD, A. Life-cycle analysis of geopolymers. **Geopolymers**, (2009) 194-210. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>.

WIANGLOR,K.; SINTHUPINYO, S.; PIYAWORAPAIBOON, M.; CHAIPANICH, A. Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars. **Apply Clay Science**, 141 (2017) 272–279.<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.025>.

XUE, X.; LIU, Y-L.; DAI, J. G.; POON, C-S.; ZHANG, W-D.; ZNAG, P. Inhibition efflorescence formatation on fly-ash Geopolymer via silane surface modification. **Cement and Concrete Reserch**, 94 (2018) pp. 43-52.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.013>.

YANG, K. H.; SONG, J. K.; SONG, K .L. Assessment of CO2 reduction of alkali-activated concrete. **Journal of Cleaner Production**, 39 (2013) 265-272.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>.

ZHANG^a, Z.; PROVIS, J. L.; REID, A.; WANG, H. The relationsship between composition, por estructure and efflorescence. **Cement Concrete Research**, 64 (2014) pp. 30-42.
<https://dx.doi.org/j.cemconres.2014.06.004>.

ZHANG^b, Z. H.; ZHU, H. J.; ZHOU, C. H.; WANG, H. Geopolymer from kaolin in China: na overview. **Apply Clay Science**, 119 (2016) 31–41.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.023>.