

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 09/06/2024.



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**

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 geopolymerização 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.

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>.