



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



RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS
SINTERIZADOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE VIDRO E RESÍDUOS DA
PRODUÇÃO DE CAULIM**

ANANINDEUA

2025

RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS
SINTERIZADOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE VIDRO E RESÍDUOS DA
PRODUÇÃO DE CAULIM**

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

Orientador(a): Prof. Dr: Alisson Clay Rios Da Silva.

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação dos materiais.

Linha de pesquisa: Tecnologia dos materiais.

ANANINDEUA-PA

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com
ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L768p Lira, Rodolfo Augusto do Rosário.
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS
SINTÉTICOS SINTERIZADOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE
VIDRO E RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAULIM / Rodolfo
Augusto do Rosário Lira. — 2025.
83 f.: il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva Dissertação
(Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Agregados sintéticos. 2. Resíduo de caulim. 3. Resíduo de vidro.
4. Argila. 5. Caracterização. I. Título.

CDD 620.1

RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS
SINTERIZADOS UTILIZANDO DE RESÍDUOS DE VIDRO E RESÍDUOS DA
PRODUÇÃO DE CAULIM**

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

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais.
Linha de pesquisa: Tecnologia dos Materiais

Data de aprovação: ___/___/___.

Banca examinadora

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

Prof. Dra. Verônica Scarpini Cândido
Examinador interno – (PPGCEM/UFPA)

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

Dedico este trabalho a todos os trabalhadores(as), que mediante aos pagamentos de impostos financiam a pesquisas e pagamentos de bolsas nas universidades brasileiras.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho integralmente a minha amada mãe Odiléia Lira, que é a personificação de amor, força, resiliência e resistência, obrigado por todo o apoio e incentivo, amo-te. Ao meu pai José Lino (in memoriam), todo meu amor e saudades.

A minha família (Rosário) que sempre me incentivou, apoiou na realização deste sonho acadêmico. Agradeço especialmente a minha irmã Renata Cristina, pelas palavras de incentivo, encorajamento durante este período. A minha afilhada Luna, por me arrancar os sorrisos mais sinceros e trazer momentos de leveza e ternura a minha vida.

As minhas tias Alzira e Maria José (Zezé), pelo incentivo e apoio em todos os períodos de minha vida, minha eterna gratidão.

A minha amiga (fiel escudeira) Kate Santos, pelo incentivo, apoio, momentos de descontração no período tão árduo de construção deste trabalho, te amo. A Brenda Matos, muito obrigado pelas dicas, orientação, incentivo, tu és uma fonte de admiração, força e conhecimento, muito obrigado. A Thayna Palheta, muito obrigado por se fazer presente neste momento de muitas mudanças, muitíssimo obrigado.

Agradeço ao meu orientador o professor doutor Alisson Rios, pelo companheirismo, orientação, compartilhamento de conhecimento, humanidade e paciência pela qual sempre teve comigo em momentos difíceis. Aos companheiros de laboratório, em especial a Taiana Matos, Fabio Brito, Marcelo Junior, Alex Modesto, professor Leôncio, muito obrigado por tornar essa caminhada menos árdua, e mais leve.

E meu eterno agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram e incentivaram para a construção deste trabalho, obrigado.

A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.
(Nelson Mandela)

RESUMO

A excessiva preocupação com a crescente produção de resíduos industriais está pertinentemente ligada aos efeitos que estes materiais podem ter sobre o meio ambiente e a saúde humana, haja vista, que os resíduos perigosos gerados pela indústria necessitam de cuidado e atenção especial. O presente estudo desenvolvido nas dependências da Universidade Federal do Pará (UFPA), tem como objetivo caracterizar as matérias-primas que foram utilizadas para a produção de agregados sintético. As matérias-primas utilizadas para essa confecção foi a argila, resíduo de vidro e resíduo de caulim passaram por caracterizações de morfologia, difratometria e quantitativa. Ademais, os agregados sintéticos passaram por ensaios das propriedades físicas: absorção de água (A.A%), Porosidade aparente (A.P%) e massa específica aparente (MEA) e ensaio de compressão. As propriedades físicas demonstram que os agregados produzidos com resíduo de caulim e argila, aumentam com a elevação da porcentagem em peso do resíduo de caulim, exceto a massa específica aparente e uma média de resistência a compressão dos agregados produzidos com resíduo de vidro de 3,62 MPa para os corpos de provas em formato esférico. Ademais, mediante a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a morfologia dos agregados sintéticos sinterizados a 1100°C observou-se a formação de poros, além de alcançar a produção de agregados sintéticos leves com a utilização do resíduo de vidro 1,94 g/cm³ e 1,85g/cm³, com a porcentagem de 30 e 50 % de resíduo respectivamente. Adicionalmente, observa-se que a adição do resíduo de caulim prejudica as propriedades estudadas no presente trabalho.

Palavras-chave: caracterização; resíduo de vidro; resíduo de caulim; agregados sintéticos; agregados leves.

ABSTRACT

The excessive concern about the growing production of industrial waste is closely linked to the potential impacts these materials can have on the environment and human health, given that hazardous waste generated by industry requires special care and attention. This study, conducted at the Federal University of Pará (UFPA), aims to characterize the raw materials used to produce synthetic aggregates. The materials used for this production were clay, glass waste, and kaolin waste, which will undergo morphological, diffractometric, and quantitative characterization. Furthermore, the synthetic aggregates underwent ceramic property tests: water absorption (WA%), apparent porosity (AP%), and apparent specific gravity (ASM), as well as compression testing. The ceramic properties demonstrate that the aggregates produced with kaolin and clay residue increase with increasing weight percentage of kaolin residue, except for the apparent specific gravity and an average compressive strength of the aggregates produced with glass residue of 3.62 MPa for the spherical specimens. Furthermore, using scanning electron microscopy (SEM), the morphology of the synthetic aggregates sintered at 1100°C showed pore formation, in addition to achieving the production of lightweight synthetic aggregates with the use of glass residue at 1.94 g/cm³ and 1.85 g/cm³, with a percentage of 30 and 50% residue, respectively. Additionally, it is observed that the addition of kaolin residue impairs the properties studied in this work.

Keywords: characterization; glass residue; kaolin residue; synthetic aggregates; lightweight aggregates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura do caulim.....	15
Figura 2 – Principais jazidas de caulim no Brasil.....	16
Figura 3 – Caulim <i>flint</i> ou duro.....	17
Figura 4 – Lagoas de resíduos de caulim.....	18
Figura 5 – Representação esquemática dos argilominerais dos tipos 1:1 e 2:1.....	20
Figura 6 – Estrutura molecular do vidro: a) típica de uma estrutura de quartzo; b) do silicato amorfo) silicatos de sódio/cálcio.....	22
Figura 7 – Pedras- pomes de variadas origens.....	27
Figura 8 – Agregados produzidos com argila expandida.....	28
Figura 9 – Agregados produzidos de argila e vidro.....	29
Figura 10- Fluxograma dos materiais compósitos	30
Figura 11 – Observa-se o efeito pullout nos compósitos de matriz cerâmica.....	31
Figura 12- Etapas do processo de pesquisa.....	32
Figura 13 – Argila após processo de beneficiamento.....	33
Figura 14- Resíduo de caulim após o processo de beneficiamento.....	34
Figura 15 – Resíduo de vidro após o processo de beneficiamento.....	34
Figura 16-Equipamentos utilizados no beneficiamento.....	35
Figura 17 – Equipamento Raio-X.....	35
Figura 18 – Máquina de FRX.....	37
Figura 19 – MEV.....	37
Figura 20 – Equipamento para medir a massa imersa.....	38
Figura 22 – Máquina de ensaio de compressão.....	40
Figura 23 –Agregados após a sinterização.....	42
Figura 24 –Agregados após a sinterização a 1100°C.....	43
Figura 25 – Fluxograma do processo.....	44
Figura 26 – DRX do resíduo de vidro.....	45
Figura 27 – DRX da argila.....	46
Figura 28 – DRX do resíduo de caulim.....	47
Figura 29 – MEV da argila.....	48

Figura 30 – MEV do resíduo de vidro.....	49
Figura 31 – MEV do resíduo de caulim.....	50
Figura 32– FTIR da argila.....	50
Figura 33 – FTIR do resíduo de vidro.....	52
Figura 35 – Resistência a compressão (MPa) a 1000°C contendo as três matérias-primas	54
Figura 36- Agregados produzidos com as três matérias-primas a 1000°C.....	55
Figura 37- Agregados produzidos a 1000°C com a argila e resíduo de vidro e caulim.....	56
Figura38-Agregados produzidos a 1100°C com os três materiais primas.....	57
Figura 39- MEV dos agregados contendo argila e vidro.....	62
Figura 40- MEV dos agregados contendo argila e resíduos de caulim.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela1- Reserva de caulim.....	12
Tabela2-Reservas de caulim em vários países.....	14
Tabela 3 - Principais tipos de vidro.....	23
Tabela 4 - Mostra o índice de reciclagem do vidro em diversos países.....	26
Tabela 5- Composição de argila e resíduo de caulim.....	40
Tabela 6- Composição com argila e resíduo de vidro.....	41
Tabela 7- Composição com as três matérias-primas.....	41
Tabela 8-Propriedades física	58
Tabela 9- Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de vidro sinterizados a 1000°C.....	58
Tabela10- Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de caulim sinterizados1000°C.....	59
Tabela 11- Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos produzidos com as três matérias-primas sinterizados 1000°C.....	59
Tabela 12- Propriedades cerâmicas doas agregados sintéticos produzidos com argila e vidro sinterizado 1100°C.....	60
Tabela 13- Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de caulim sinterizado 1100°C.....	60
Tabela14- Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos produzidos com as três matérias-primas 1100°C.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.A	Absorção de Água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARG	Argila
°C	Celsius
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MEA	Massa Especifica Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
MPa	Megapascal
RC	Resíduo de Caulim
RV	Resíduo de Vidro
P.A	Porosidade Aparente
T	Temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_3O_2 Óxido de Alumínio

CaO Óxido de Cálcio

Fe Ferro

Na_2O Óxido de Sódio

SiC Carbetto de Silício

SiO_2 Óxido de Silício

TiO_2 Óxido de Titânio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Caulim.....	17
2.1.2 Caulim Duro ou Flint.....	18
2.2 Argila.....	20
2.1.2 Argilominerais.....	21
2.3 Vidro.....	23
2.3.1 Reciclagem do Vidro.....	25
2.4 Agregados	27
2.4.1 Agregados Leves.....	28
2.5 Compósitos.....	29
2.5.1 Compósitos de Matriz Cerâmica.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Materiais.....	31
3.2 Método.....	31
3.2.1 Beneficiamento das Matérias-primas.....	32
3.2.2.1 Difração de Raios-X.....	34
3.2.2.2 Fluorescência de Raios-X.....	34
3.2.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	36
3.2.2.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.....	36
3.2.2.5 Propriedades Tecnológicas.....	36
3.2.2.6 Ensaio Mecânicos.....	37
3.2.2.7 Produção dos Agregados.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 Caracterização das Materias-primas.....	42
4.1.2 Fluorescência de Raios-X.....	42
4.1.3 Caracterização Mineralógica.....	43
4.1.4 Caracterização Morfológica das Materias-Primas.....	45

4.1.5 Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	46
4.2 Caracterização do Agregados.....	50
4.2.1 Propriedades Mecânicas dos Agregados (pellets).....	52
4.2.2 Propriedades Tecnológicas.....	55
5 CONCLUSÃO.....	60
6 SUGESTÃO DE TRABALHOS	
FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Em aproximadamente dois séculos e meio a sociedade industrial felizmente dobrou a expectativa de vida do ser humano, multiplicando-a, por volta de seis a população do planeta (Ibracon, 2017). Esse crescimento populacional vem acompanhado da exploração do fluxo crescente e contínuo de materiais de fontes não renováveis, tais como brita e seixo rolado.

De acordo com Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção (Anepac), no ano de 2022 foram produzidas aproximadamente 700 milhões de toneladas de agregados para as mais variadas empregabilidades. No cenário nacional a utilização crescente de agregados graúdos, tende a uma exploração demasiada causando a degradação do meio ambiente, assim com a escassez dos recursos naturais em virtude da elevada demanda (Oliveira & Ângulo, 2020). A busca pela proteção destes recursos naturais sinaliza para a necessidade de formas de lograr agregados, objetivando a diminuição da degradação direta do meio ambiente.

A mineração é uma das mais antigas e essenciais atividades da humanidade. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram) no ano de 2022, o Brasil produziu 1,2 bilhão de toneladas de minérios, sendo 1,77 milhões de toneladas de minério de caulim. A gigantesca produção de caulim está concentrada no estado do Pará que detém 90 % da produção nacional, este minério é utilizado na fabricação dos mais diversificados produtos, como tintas, polímeros, cosméticos e como cobertura na produção de papel, devido a sua principal característica, a alvura. Todavia, a técnica de mineração, é constituída por várias etapas: centrifugação, separação magnética, branqueamento químico e filtração. Como resultado, é comum o desenvolvimento de um excessivo volume de resíduos de caulim (Marlon *et al*, 2022).

O resíduo do caulim é constituído basicamente de argila abundante em caulinita e outros minerais acessórios, como anatásio e quartzo. Durante o beneficiamento do caulim são geradas gigantescas quantidades de resíduos, dentre eles o que é conhecido como caulim duro ou caulim ferrítico, por apresentar uma quantidade de óxidos de ferro elevada (Faria, 2015; Preza, 2021). Ademais, o caulim duro por apresentar elevada quantidade de óxidos de ferro não apresenta alto grau de alvura, possuindo assim uma tonalidade avermelhada. O caulim duro é muitas vezes defenestrado na própria mina ou em lagoas de sedimentação localizadas nas plantas de beneficiamento deste minério (Rocha Júnior, 2015; Pinheiro, 2021).

De modo hodierno, o descarte inadequado de garrafas de vidro, acometem em transtornos para o meio ambiente e para a sociedade. São defenestrados aproximadamente em todo mundo 200 milhões de toneladas de resíduos de vidro em aterros sanitários (Yi Jing *et al*,

2019). O vidro é uma substância homogênea, amorfa e inorgânica, adquirido mediante ao resfriamento de uma massa proveniente de uma combinação de matérias-primas a base de sílica fundida e resfriada, além disso, o vidro do tipo sodo-cal utilizado na fabricação de garrafas de bebidas apresenta em sua composição óxidos fundentes, que auxiliam na redução da temperatura de sinterização (Oliveira, 2018; Heriyanto, *et al*, 2018).

Segundo Krausman *et al* (2009) ao longo das últimas dez décadas, o consumo global de material aumentou drasticamente, rodeado com a elevação da geração de resíduos. Estima-se que no ano de 2016 o resíduo de vidro foi responsável por 5% dos resíduos sólidos urbanos mundialmente (Eduardo Harrison, *et al*, 2020).

Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivo e relevância analisar a incorporação do resíduo do caulim e resíduo de vidro na produção de agregados sintéticos sinterizados. O presente trabalho apresenta profunda relevância, pois se dispõe a avaliar a produção dos agregados sintéticos produzidos da combinação de argila, resíduo de vidro (pó) e resíduo de caulim (caulim duro) sinterizados a 1000°C, 1100°C. Neste sentido, foram estabelecidas composições com resíduo de vidro e caulim com 10%, 30% e 50%, assim como também a as composições formados pelas três matérias-primas com variações de 5%, 15%, 25% e 30% dos resíduos. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi a mesma utilizada por Souza (2009) que investigou a incorporação de resíduo da bauxita na produção de agregados sintéticos. A incorporação do resíduo de vidro diminuiu a massa específica aparente tendo alcançado 1,94 g/cm³ e 1,85 g/cm³ com a incorporação de 30% e 50% de resíduo de vidro respectivamente, ademais visualizou-se mediante a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV), que a morfologia dos agregados apresenta a presença de poros ocasionados pela decomposição de óxidos fundentes, gerando gases e conseqüentemente o surgimento de poros.

Portanto, no decorrer do estudo expôs acerca das principais conceituações que envolvem as categorias concernentes a argila; resíduo de vidro; resíduo de caulim. Ademais, a importância da pesquisa consiste na possibilidade da formação de agregados classificados como leves, conforme ocorre a adição de resíduo de vidro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- O objetivo geral deste trabalho visa a produção e caracterização de agregados sintéticos sinterizados produzidos utilizando resíduos de vidro e caulim.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da temperatura nas propriedades cerâmicas dos agregados;
- Avaliar as diferentes composições dos agregados sintéticos, produzidos com resíduo de vidro, caulim duro e argila;
- Desenvolver agregados sintéticos classificados como leves;
- Investigar as propriedades mecânicas de compressão dos agregados;
- Avaliar a morfologia dos agregados produzidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- CAULIM

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) no ano de 2018 o Brasil, produziu um total de 1,77 Mt (milhões de toneladas) de caulim beneficiado, sendo o estado do Pará o principal produtor de caulim com 90,6% (1,66 Mt), seguidos de São Paulo com 81,3 mil toneladas e do Rio Grande do Sul, com aproximadamente 54,9 mil toneladas de caulim beneficiado. Adicionalmente, as maiores produtoras de caulim do país são responsáveis por produzirem 89%, e estão situadas no estado do Pará, são elas a Imerys Rio Capim Caulim, Pará Pigmentos e Cadam. O Brasil, se destaca no cenário internacional como o maior exportador de caulim do mundo, adicionalmente dos bens primários o caulim atinge 99% da quantidade total das exportações, com aproximadamente 2,05 milhões de toneladas (Soeiro, 2014). A tabela 1, apresenta as reservas em demasia ao redor de mundo.

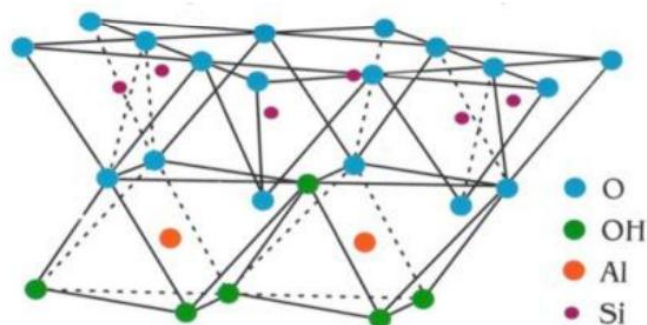
Tabela 1- Reservas de caulim em vários países.

Discriminação Países	Reservas (10 ⁶ t) 2013	Produção		
		2012 (M)	2013(M)	%
Brasil	7068	2189	2139	5,8
Uzbequistão		7000	7000	19
Estados Unidos da América		5980	5950	16
Alemanha		4900	4500	12,1
República Tcheca		3320	3300	9
Turquia	Abundante	1200	2000	5,4
Ucrânia		1300	1600	4,3
Reino Unido		900	900	2,4
Itália		640	640	1,7
Espanha		303	300	0,8
México		163	160	0,4
Outros Países		88540	8600	23,1
Total	-	36435	37089	100

Fonte: Soeiro (2014).

A designação caulim é empregado para nomear a rocha que contém o argilomineral caulinita, com tacinho teor de ferro. A baixa presença de óxidos de ferro é responsável pela sua alvura ou tal particularidade é conseguida após o beneficiamento, tal característica é ajuizada pelo relevante destaque na indústria do papel, haja vista que este é aplicado como cobertura e preenchimento. Além disso, o caulim apresenta copiosas aplicações fazendo-se matéria-prima para indústria cerâmica, produção de tintas, na área médica, assim como a mistura com outros minerais podem maximizar as áreas de empregos do caulim, como para confecção de inseticidas, abrasivos suaves endurecedor na indústria têxtil, carga e revestimento de oleados e linóleos, em sabões, carga para gesso de parede e dentre outras inúmeras aplicações (Oliveira, 2019; Moraes, 2014; Preza, 2021). A figura 1, mostra a estrutura do caulim.

Figura 1- Estrutura do caulim.



Fonte: Schackow (2015).

O Brasil, apresenta uma variedade gigante de reservas de caulim, provenientes sobretudo dos estados do Pará e Amapá, que são os maiores produtores. O caulim, pode ser dividido em dois subgrupos: os caulins primários formados por processos de intemperismo, conhecido como caulins residuais, ou por atividade hidrotermal. Adicionalmente, o segundo grupo é formado por processos erosivos, transporte e sedimentação de material caulinizado do primeiro grupo, o referido grupo é conhecido como caulim secundário, constituídos geralmente por mica, quartzo e teores que variam de 1%-2% de dióxido de titânio, e sua origem está relacionada diretamente com a ação, deposição e purificação. (Bezerra, 2023). A figura 2, mostra os principais depósitos de caulim nos entes federativos.

Figura 2- Principais jazidas de caulim no Brasil.



Fonte: Adaptado de Luz e Damasceno (1993).

2.1.2- Caulim duro ou caulim *flint*

O Estado do Pará, destaca-se no cenário nacional e internacional quando se fala em produtividade mineral com a produção dos mais diversificados minérios, tais como ferro, cobre, alumínio, ouro, calcário e caulim. O extrativismo mineral apresenta uma grande relevância na balança comercial do Estado do Pará (Simineral, 2023).

Tendo o ponto de vista da exploração, dados do período de 2022 demonstram que o Pará encabeça entre produtores da indústria do extrativismo e transformação mineral, sendo o caulim o sexto colocado entre os produtos exportados pela indústria de extração mineral que geraram superlucro, em torno de US\$ 151 milhões (Simineral, 2023), mostrando dessa maneira a sua relevância no cenário extrativismo mineral nacional.

Apesar da dimensão colossal na balança econômica dos estados da região norte do Brasil, a exploração do caulim causa prejuízos socioambientais, uma vez que tal abuso exploratório provoca a produção em excesso de resíduos. A região amazônica possui notáveis e extensos depósitos de caulim utilizados nos mais diversificados ramos industriais. Durante o processamento do caulim são geradas demasiadas quantidades de resíduo, sendo estes de três tipos: um ricamente constituído em quartzo, outro concebido principalmente em caulim com granulometria grosseira e o terceiro formado por caulim com alto teor de ferro (caulim ferrítico), como também é conhecido caulim duro ou *flint* (Junior et al, 2022; Preza,2021).

O resíduo de caulim (RC) é proveniente dos rejeitos dos processamentos da sua matéria-prima, o caulim. De acordo, com Junior et al (2022), esses rejeitos são obtidos futuramente a

etapa inicial de tratamento de minérios e não serão mais utilizados em determinadas atividades industriais, nem possuem valor comercial.

O caulim duro por apresentar um percentual significativo de óxidos de ferro e óxidos de titânio em sua composição é responsável pela baixa alvura, exibe uma tonalidade branca avermelhada. Ademais, mediante a elevada coesão das partículas expõe como uma de suas principais singularidades a granulometria extremamente fina que não se distâcia com facilidade na presença de água (Pinheiro, 2021). A figura 3, apresenta o caulim duro, onde destaca-se tons de brancos e vermelhos.

Figura 3- Caulim flint ou duro.



Fonte: Pinheiro (2021).

O Brasil figura entre os cinco maiores produtores de caulim do mundo. Como resultado é comum conceber uma demasiada quantidade de resíduos, classificados pela legislação brasileira como material inorgânico, material inerte e não perigoso (Longhi et al, 2022). Ademais, diversas empresas mineradoras de caulim utilizam-se de lagoas sedimentação de resíduos para o armazenamento, neste método a caulinita encontra-se em suspensão com outras impurezas (Pinheiro, 2021). Adicionalmente, de acordo com Hugo Alves et al (2022) a reutilização e o reaproveitamento dos resíduos provenientes do beneficiamento do caulim, não pode ser vista somente de uma praticabilidade econômica, mas também de uma visão mais ecologicamente correta, haja vista que proporciona um valor agregados superior aos produtos obtidos, assim como estimulando a cultura do reaproveitamento. Portanto, é apreciável conhecer as características químicas, físicas e mineralógicas, somente assim será possível como e onde o resíduo de caulim pode ser empregado. A figura 4, mostra a lagoas com resíduo de caulim.

Figura 4- Lagoas com resíduo de caulim.



Fonte: Google Earth (2025).

A utilização de caulim duro ou *flint*, não apresenta muita regularidade, uma vez que este apresenta uma quantidade grande de óxidos de ferro (Pinheiro, *et al* 2016). Demanda-se, o desenvolvimento de alternativas para a sua utilização, devido aos impactos ambientais que estes podem causar, adicionalmente, este resíduo apresenta um grande potencial para a sua utilização, uma vez que é fonte de alumíniossilicatos (Doyle, *et al* 2016).

Segundo Silva et al (2021) os depósitos de resíduos de caulim processados no estado do Pará ultrapassam 10 milhões de toneladas. Essa quantidade gigante de resíduo configura um problema de ordem financeira, mas sobretudo ambiental, necessitando o desenvolvimento de novas tecnologias ou a destinação mais ecológica a este resíduo.

2.2 ARGILA

O Brasil de acordo com Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Louças Sanitária e Congêneres (Anfacer), tem relevância no cenário internacional, no mercado de revestimento e produtos cerâmicos, ocupando o terceiro lugar como produtor e consumidor destes produtos. O estado do Pará detém a maior produção de produtos cerâmicos da região norte do país, o município de maior importância neste setor é o de São Miguel do Guamá, localizado no nordeste paraense. Adicionalmente, o distrito de Icoaraci, distante 17 quilômetros de Belém, detém a sua relevância na produção de produtos cerâmicos onde para a produção das mercadorias cerâmicas, a argila utilizada é extraída do rio Paracuri, além disso, o distrito apresenta um patrimônio cultural indígena grandioso (Miranda, 2014).

O conceito de argila é bastante diversificado por motivo das mais variadas formas de utilização, especialistas na área tem diversos termos para definição de argila. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica -ABCERAM (2025), define argila como sendo um material natural que quando umedecido com água ostenta certa plasticidade, de granulometria fina, geralmente abaixo de 2 μm (micrometro), apresentando textura terrosa e formados quimicamente por silicatos hidratado de alumínio, alumio, ferro e magnésio.

As argilas são encontradas com certa e demasiada facilidade nos depósitos sedimentares na crosta terrestre, podendo ser encontrada em estado natural, ou misturado com outros constituintes (Piovesan, 2022). Segundo Kalendava, et al (2024), as argilas apresentam como principais constituintes folhas tridimensionais de tetraédrico de silício-oxigênio e folhas bidimensionais de octaédrico de alumínio ou magnésio. Argilominerais, como caulim, bentonita e vermiculita, afetam de forma significativa as propriedades físicas e químicas das argilas tais como área superficial, plasticidade, tamanho da partícula e viscosidade, o que pode contribuir para as modificações de particularidades mecânicas, térmicas e físicas.

As argilas são materiais muito mutáveis e opimo, sendo largamente utilizadas como matéria-prima para variadas aplicações, como materiais de construção, cerâmicas, papéis, perfuração de petróleo, indústria farmacêutica, além da sua utilização como adsorventes, catalisadores ou suportes de catalisadores, trocadores iônicos e outras, dependendo da propriedade específica que ela apresenta (Vazzoller,2017).

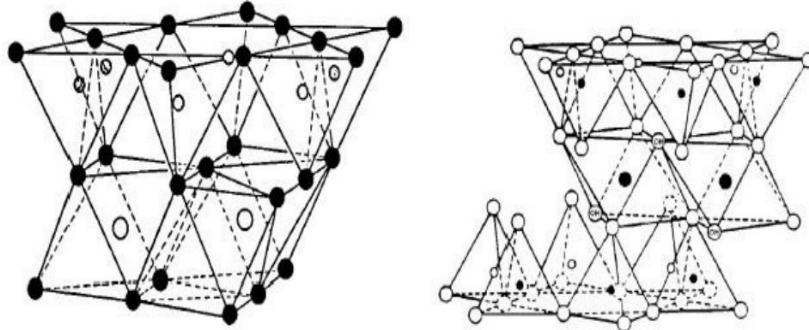
2.2.1 ARGILOMINERAIS

Segundo Sieben (2024), os argilominerais são constituintes primaciais na formação das argilas. Quimicamente os argilominerais são formados por silicatos hidratados de alumínio e ferro, geralmente, contendo ainda, com frequência, certa quantidade de elementos alcalinos e alcalino- terrosos e apresentam estrutura cristalina na maioria das vezes, além de conferir plasticidade as argilas, por serem hidrofílicos. Ademais, os argilominerais são matérias naturais derivados da decomposição de solos, erosões e a ação de agentes ambientais, ou podem ser sinterizados. As estruturas são formadas por silicatos de magnésio ou alumínio, mas também podendo ter a presença de outros íons constituintes como ferro, sódio, cálcio e potássio.

Os argilominerais podem ser divididos em duas classes gerais: a) silicatos cristalinos em camadas ou lamelas e b) silicatos cristalinos com estrutura fibrosa. Os silicatos com estrutura lamelar podem ser divididos em dois grupos ou famílias :a) camadas 1:1 ou difórmicos; b) camadas 2:1 trifórmicos. A nomenclatura 1:1 e 2:1 é utilizada para as camadas

de tetraedros SiO_4 e octaedros de hidróxidos, respectivamente que entram na constituição da célula unitária da estrutura cristalina do argilomineral (Adekeye et al, 2020). A figura 5, expõe esquematicamente dois argilominerais do tipo 1:1 e 2:1, respectivamente.

Figura 5- Representação esquemática dos argilominerais dos tipos 1:1 e 2:1.



Fonte: Adaptado de Aguiar et al (2002).

O argilomineral caulinita, é formado pelo apinhamento regular de camadas 1:1, em que cada camada de uma folha de tetraedros SiO_4 e uma folha de octaedros $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ igualmente conhecida de folha de gibsita, unidas entre si por uma única camada, por meio de oxigênio em comum, fornecendo uma estrutura fortemente polar. A caulinita apresenta fórmula estrutural: $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, o que teoricamente resulta em uma porcentagem em peso de 46,54% de SiO_2 , 39,50 % Al_2O_3 e 13,96% de H_2O . São minerais que não apresentam cargas residuais, sendo a presença de cargas negativas, oriundas da presença grãos finos de impurezas, tais como mica ou esmectita (Zunino e Schivener, 2024).

A caulinita é o principal mineral argiloso e está vastamente distribuída na camada superficial do solo e no subsolo do mundo. As propriedades estruturais, eletrônicas e mecânicas da caulinita estão relacionadas intimamente às suas diversas aplicações (Jian, Wein, Zhalong, Manchao, 2023).

2.3 VIDRO

Não há uma exatidão de quando a humanidade começou a produzir vidro, no entanto, achados arqueológicos datam que o primeiro vidro fabricado foi encontrado na Mesopotâmia, por volta de 3000 a.C, e os primeiros vasos foram feitos em 1500 a.C no Egito e na Mesopotâmia, durante o reinado do faraó Akhenaten (Filgueiras, Silva, 2023).

Atualmente, o descarte inapropriado de embalagens de vidro traz diversos transtornos para o meio ambiente e a sociedade a nível mundial. De acordo com Belie, Soutstos, Gruyaert

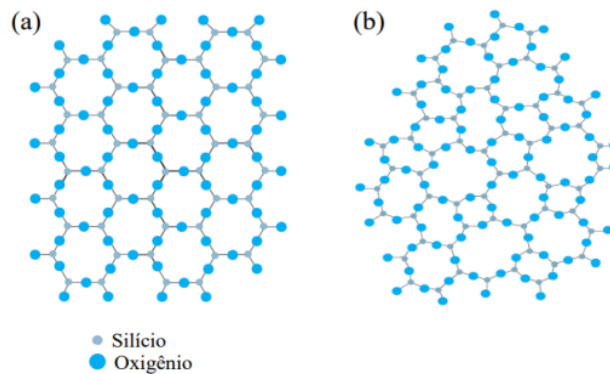
(2018) são depositados aproximadamente 200 milhões de toneladas em aterros sanitários de resíduos de vidro ou reciclados após a coleta em todo o mundo. No ano de 2021, somente a China produziu 22,5 milhões de toneladas de vidro, enquanto a reciclagem foi de 10,05 milhões de toneladas de resíduo de vidro (Ruixue, Zijing, Xinghua, Lu, Zhenming, 2023).

No Brasil o governo federal mediante ao Ministério do Meio Ambiente (2022), estima que aproximadamente 1 bilhão de garrafas de vidro sejam defenestradas de maneira inadequadas em lagos, rio, terrenos baldios e lixões. De acordo, com a Associação Brasileira Indústrias de Vidro (Abividro), o Brasil produz aproximadamente em média 980 mil toneladas de vidro, porém somente 25,8% é reciclada. Os resíduos de vidro de embalagens correspondem a 3% dos resíduos urbanos reciclados no país.

O vidro é um produto fisicamente homogêneo, obtido pelo aquecimento até a temperatura de fusão de diversas matérias-primas inorgânicas minerais a base de sílica, e não apresenta estrutura cristalina, ou seja, amorfo (Neto, 2020; Oliveira, 2018). Ademais, o vidro o apresenta particularidades que o diferenciam de outros materiais: não é poroso, nem é um material absorvente, é um excelente isolador e apresenta baixo coeficiente de dilatação. As garrafas de bebidas descartadas de forma inadequada, podem ser utilizadas como alternativa para o reaproveitamento na industrial cerâmica (Oliveira, 2018). A figura 6, mostra as estruturas a) de uma rede bidimensional cristalina de matriz silicática com ordenamento e periodicidade; b) mostra a falta de organização cristalina(amorfa).

O vidro é pertencente à família dos materiais cerâmicos, sendo formados por silicatos não cristalinos. Os óxidos geralmente encontrados na composição do vidro são classificados como vidro-formadores (SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 e AsO_3), intermediários (Al_2O_3 , Sb_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , PbO , BeO , ZnO) e modificadores (MgO , Li_2O , BaO , CaO , SrO , Na_2O e K_2O). Quanto à função desses óxidos no processo de fabricação do vidro, a classificação é feita em vidro-formadores, estabilizadores, fluxos ou fundentes e acessórios (Callister, 2020).

Figura 6- Estrutura molecular do vidro: a) Rede bidimensional cristalina; b) evidencia a falta de simetria e periodicidade (amorfo).



Fonte: Oliveira, 2023.

Consoante com a Abividro (2023), as diferentes composições químicas do vidro o classificam em três tipos:

- Vidro sodo-cálcico ou silicato soda-cal: é o tipo de vidro mais comumente encontrado, utilizado em embalagens de forma geral (garrafas, potes, entre outros) e como vidro plano (placas), aplicado na indústria automobilística, construção civil e em eletrodomésticos. É constituído principalmente por óxido de silício (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), podendo sofrer exíguas variações em sua composição química para alteração da cor ou de alguma propriedade específica.

- Vidro boro-silicato: é utilizado em utensílios domésticos resistentes a choques térmicos, por possuir baixa expansão térmica.

- Vidro ao chumbo: é utilizado em peças que requerem maior brilho, função atribuída à adição de chumbo, como copos, taças, cálices, ornamentos etc.

Conforme estudo realizado por Scheuermam Filho (2019) que 85% do vidro produzido globalmente, é do tipo sodo-cálcico, o que evidencia a grande demanda. A elevada demanda é ocasionada em virtude deste tipo de material ser empregado em itens de maior consumo como janelas e garrafas de bebidas, tornando-se conseqüentemente maior o seu descarte. A Tabela 2, mostra os principais tipos de vidro e as suas características.

Tabela 2- Principais tipos de vidros.

Tipos de vidro	Características
Soda- Cal	Tipo mais comum de vidro produzido. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e itens que não necessitam de grande resistência química e /oi ao calor
Chumbo	Dotados de elevados índice de refração, brilho e densidade. São comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes
Boro-Silicatos	Tem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e grande estabilidade química, sendo empregado em situações que requerem alta durabilidade do material vítreo
Ópticos	Possuem altas densidade e grande índice de refração. Largamente usados na produção de lentes e afins
Alumino-Silicatos	Tem resistência a altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão

Fonte: Scheuermam (2019).

No tocante à fabricação do vidro soda-cal, Askelend e Wright (2014) afirmam que é necessário aquecimento do SiO_2 pura em temperaturas muito elevadas (como o caso da sílica fundida) para resultar em viscosidades que permitam uma fabricação economicamente viável. Para circundar essa problemática, a maioria dos vidros comerciais à base de sílica, adicionam modificadores como a soda (Na_2O) com o intuito de romper a estrutura do reticulado e formar uma mistura eutética que, por consequência, diminui a temperatura de fusão e facilita o processo de fabricação. A cal (CaO), por sua vez, é misturada para reduzir a solubilidade do vidro na água.

Os resíduos de vidro são produzidos durante o processo produtivo, descarte e utilização dos mesmos. Os resíduos principais são do tipo em formas de garrafas, embalagens com uma grande variedade de cores e formatos, cacos e pós finos (Anupya et al, 2022).

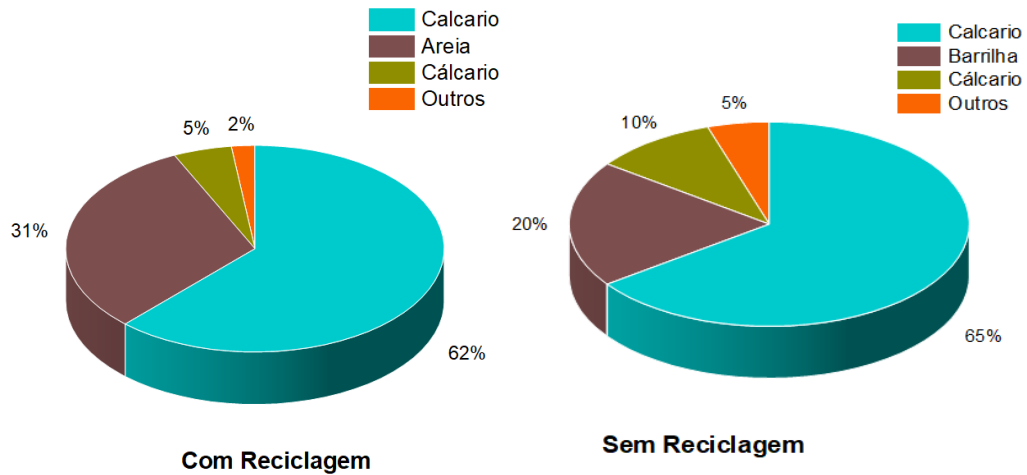
O vidro moído reciclado, é o principal subproduto da indústria de reciclagem do vidro. No entanto, ainda existe incontáveis barreiras para a sua aplicação, sendo a principal delas, o conhecimento incipiente sobre as características do pó de vidro, assim como os riscos ambientais. Oliveira (2018), mediante realização de pesquisa evidenciou que o pó de vidro, oriundo de embalagens pode ser utilizado para a produção de agregados sintéticos calcinados.

2.3.1 RECICLAGEM DO VIDRO

O vidro é largamente utilizado pela sociedade atualmente, na construção civil, embalagens, produtos eletrônicos e como material de suporte em pesquisas científicas, resultando na geração de uma quantidade gigantesca de resíduo de vidro (Abedelli *et al*, 2020). O descarte de uma elevada quantidade de vidro não é apenas um desperdício de recursos e energia, bem como ocupa terras e polui o meio ambiente. Por ser um material inerte, o vidro no lixo não pode ser incinerado, degradado naturalmente, ou degradado e tratado por meios físicos e químicos gerais (Ruixue Wang *et al.*, 2023).

O vidro é um material reciclável que pode ser derretido/reciclado sem haja qualquer perda de qualidade. Uma tonelada de cacos de vidro pode ser modificada em uma tonelada de vidro novo. Esta técnica é muitas vezes limitada à mesma fábrica que produziu o vidro original devido ao seu conhecimento da exata composição. Vidros de diferentes origens, no entanto, são incapazes de passar por este processo devido a diferentes componentes químicos. Os resíduos de vidro são produzidos por consumidores e processadores de vidro, e podem ser reaproveitados em outras funções, como enchimento ou como material abrasivo, espuma ou fibra de vidro, tinta reflexiva, arte e até mesmo como matéria-prima na produção de asfalto (Peixoto, 2023). A produção a partir da reciclagem acaba ocasionando privilégios econômicos na fabricação de vidros novos, pois diminui drasticamente o uso de outros componentes e de outras matérias-primas, como pode ser visto nos gráficos a seguir (Abvidro, 2023). O Gráfico 1, mostra o conteúdo dos componentes do vidro.

Gráfico 1- Diferença dos conteúdos dos componentes.



Fonte: Adaptado de Dell Castilho (2021).

A reciclagem do vidro é o procedimento pelo qual os resíduos são diversificados em produtos favoráveis, passando pelo circuito da economia circular no qual o material é reaproveitado. O vidro é um dos materiais mais recicláveis do mundo. O vidro encontra aplicações em variadas áreas e funções, inclusive em janelas e embalagens. Como material de embalagem, a utilização do vidro é compelida pelas percepções dos consumidores, uma vez que os consumidores muitas vezes relacionam a qualidade dos produtos com o tipo de embalagem utilizada. Verificou-se que os consumidores optam por embalagens de vidro às embalagens de plástico (Kuan Harn *et al*, 2023).

A produção mundial de vidro é de aproximadamente 143 milhões de toneladas anualmente. Em torno de 47 % desta quantidade de vidro era para recipientes, 42 % eram para a produção de vidro plano (janelas e vidros para automóveis), 5% utensílios de mesa e 6% de outros produtos de vidro (Washington Recycling Development Center, 2021). O serviço de bebidas alcólicas é responsável por uma quantidade significativa de volume global de vendas de embalagens (Kuan Harn *et al*, 2023). De acordo com as informações encontradas no portal G1, no período pandêmico a maior fábrica de produção de garrafas do Brasil, produz diariamente 3 milhões de unidades. Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional, o vidro é responsável por 5% de toda a composição do lixo em escala mundial. Porém, no Brasil, a coleta seletiva é extremamente escassa sendo mais eficiente nas áreas mais desenvolvidas e majoritariamente mais urbanizada. A tabela 3, expõe o índice de reciclagem do vidro em variados países. Observa-se, entre os diversos países que a Bélgica se destaca, uma vez que há uma reciclagem de 96% do vidro. Enquanto o Brasil, apresenta-se com 47%, distante da maior parte dos países que apresentam reciclagem significativa do vidro. Nessa circunstância defende-se a preocupação com a reciclagem do vidro (Lordelo, 2018).

Tabela 3- Mostra o índice de reciclagem do vidro em diversos países.

País	Índice (%)
Bélgica	96
Suécia	91
Holanda	91
Alemanha	81
República Tcheca	78
Itália	74
Brasil	47
França	68
Lituânia	67
Reino Unido	61
Portugal	57
Estônia	41
Eslováquia	37
Bulgária	34

Fonte: MME, (2011).

2.4 AGREGADOS

Agregados são materiais particulados, incoesivos e de baixa atividade química, cujas partículas cobrem uma ampla gama de tamanhos. Eles podem ser classificados segundo a origem, as dimensões das partículas e ao seu peso específico aparente. Segundo a origem, os agregados classificam-se como naturais e industrializados. Segundo as dimensões das partículas, os agregados usados na tecnologia do concreto são divididos em miúdos ou graúdos. Mediante a densidade aparente, eles podem ser classificados em leves ou pesados (Souza, 2022).

A norma NBR 7211, define agregados graúdos ou britas quando estes ficam retidos nas peneiras de abertura de malha de 4,8 mm. Estes agregados apresentam massa específica aparente entre 2400- 3000 kg/m³, enquanto os agregados produzidos de argilas calcinadas apresentam massa específica em torno de 450- 1900 kg/m³. Adicionalmente, os agregados

podem ser classificados pesados quando sua massa específica aparente é superior a 2000 kg/m^3 e leves quando a massa específica aparente é inferior a 2000 kg/m^3 .

A expressão “agregado” é utilizada no Brasil, para se identificar matérias-primas minerais para a construção civil (Oliveira, 2017). De acordo com Souza (2022) agregados são materiais granulares sem forma e volume definido, comumente inertes de dimensões e atributos compatíveis para a utilização em obras de engenharia, sendo usualmente utilizados na produção de concreto e argamassas de cimento Portland.

2.4.1 AGREGADOS LEVES

A definição de agregados leves, ainda não há um consenso, porém, muitos pesquisadores utilizam a massa específica seca inferior a 2000 kg/m^3 como parâmetro de definição, esse parâmetro será utilizado neste trabalho. A microestrutura celular ou altamente porosa é responsável por conferir aos agregados baixa densidade (Campello, 2023).

Os agregados leves podem ter duas origens, a natural ou sintética (artificiais). Os agregados leves naturais são fundamentalmente de origem vulcânica, sendo a pedra-pomes e a escória os mais antigos de que se tem conhecimento; ambos foram usados largamente período de domínio romano (Chandra & Berntsson, 2002). A Figura 7 mostra a variedades de pedras-pomes.

Figura 7- Pedras-pomes de variadas origens.



Fonte: Rashd (2019).

Mediante a pífia disponibilidade dos agregados naturais leves, se faz necessário a produção de agregado sintéticos leves, que são produzidos a partir de matérias-primas naturais, como a argila, ardósia, xisto e de subprodutos industriais como cinzas volantes, escória do aço, resíduos de mineração e vidro reciclado. A fabricação de agregados artificiais consiste basicamente na transformação da matéria-prima, geralmente na forma de pó em aglomerados,

mediante ao de processo de pelotização, sendo esses aglomerados posteriormente tratados por diferentes técnicas, sendo a técnica de sinterização a mais utilizada comumente, colagem a frio e autoclavagem (Mohammed, Elkady & Abdel- Gawwad, 2021). A figura 8, mostra agregados produzidos com argila expandida.

Figura 8- Agregados produzidos com argila expandida.



Fonte: Ayati et al, (2018).

Agregados leves artificiais produzidos a partir de resíduos podem ser desenvolvidos por granulação, aglomeração ou pelotização e são oportunos do ponto de vista ambiental, uma vez que diminui exploração de recursos naturais e as atividades nocivas de mineração. Os agregados leves também promovem redução de custos porque os resíduos são transformados em produtos comercializáveis (Yliniemi et al., 2016). A obtenção de agregados leves com resíduos industriais envolve a expansão ou aglomeração. A expansão ocorre mediante ao aquecimento do material até a temperatura de fusão, ponto em que a piroplasticidade do material e a formação de gás ocorrem simultaneamente. A aglomeração ocorre quando há a fusão do material, unindo as partículas. A expansão da matéria-prima é induzida por tratamento térmico, que é realizado em diferentes tipos de fornos industriais, como fornos rotativos, fornos de eixo vertical, reatores de leito espumante, entre outros (Chandra & Berntsson, 2002). A figura 9, mostra agregados sintéticos produzidos de argila e resíduo de vidro provenientes de garrafas de bebidas.

Figura 9- Agregados produzidos de argila e vidro.

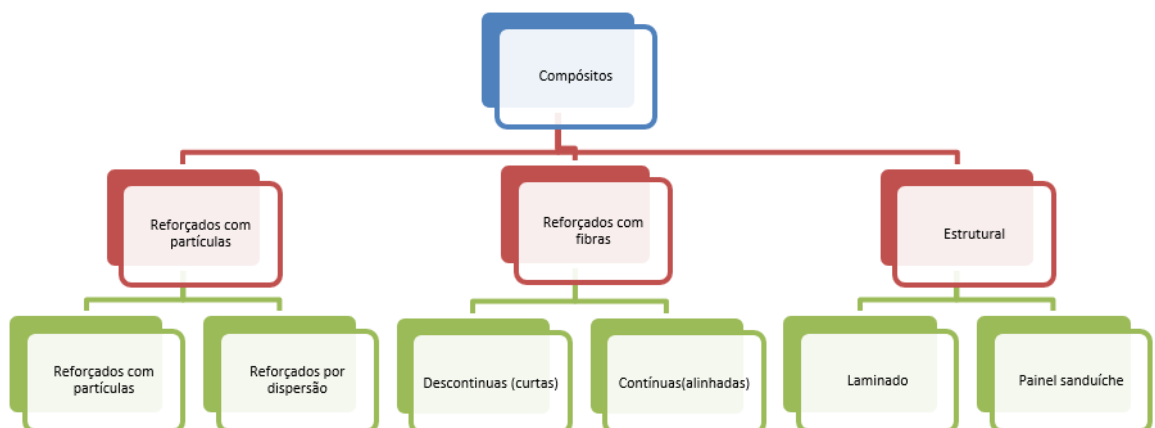


Fonte: Campelo (2023).

2.5 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são formados pela combinação de fases de macrocomponentes, compostos de materiais diferentes sob o ponto de vista de composição química e forma. Os macrocomponentes mais relevantes são fibras, partículas, lâminas, escamas e elementos de reforços. Os compósitos são tipos de materiais multifásicos, que reúnem dois ou mais materiais, com o objetivo de se obter a melhor combinação de suas propriedades, tais como resistência, rigidez, tenacidade, entre outras (Callister, 2020; Yadav et al,2024). As fases dos compósitos são chamadas de matriz, que é a parte contínua e, a dispersa ou reforço. As principais matrizes dos materiais compósitos são metálica, polimérica e cerâmica (Callister, 2020). A figura 10, mostra o fluxograma do esquema de classificação dos diversos tipos de compósitos.

Figura 10- Fluxograma de classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2020).

Osso, madeira e concreto são exemplos da classe atinente dos materiais compósitos. Nas últimas décadas os materiais compósitos, tornaram-se escopo de robustas pesquisas ao redor do mundo. Está elevada relevância está intimamente ligada a obtenção de materiais com particularidades elevadas e a possibilidade de adaptação dos compósitos de acordo com as áreas de aplicação. Estes materiais expõem propriedades vivamente atrativas, todavia essas propriedades são dependentes das propriedades que os materiais constituintes apresentam em caráter individual (Shulka *et al*, 2024; Ullah *et al*, 2019; Khalid *et al*, 2021).

Os compósitos são materiais que apresentam em sua composição duas fases; a fase matriz e a fase reforço. A fase contínua é denominada matriz, enquanto a fase descontínua é chamada de reforço, e geralmente é mais dura e forte (Shulka *et al*, 2024).

As matrizes utilizadas para fabricação dos materiais compósitos podem ser divididas em três categorias: Compósitos de Matriz Cerâmica (CMC), Compósitos de Matriz Metálica (CMM) e Compósito de Matriz Polimérica (CMP).

2.5.1 COMPÓSITOS DE MATRIZ CERÂMICA

Os compósitos de matrizes cerâmicas (CMC) são geralmente empregados em ambientes com elevadas temperaturas, com excelente resistência a corrosão. O CMC, apresentam uma ampla gama de aplicações em ambientes de alta temperatura, incluindo pás de turbinas, pastilhas de freio de automóveis (Kuan-Wen, Luang- Hao, 2023).

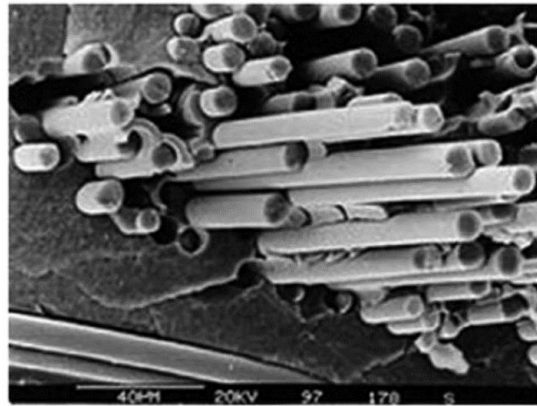
Os CMC compõem de uma matriz cerâmica com elementos de reforço (geralmente fibras), também de natureza cerâmica. Os materiais da matriz e da fibra podem ser carbono (C), carbetto de silício (SiC), alumina (Al_2O_3) e mulita ($Al_2O_3-SiO_2$), dentre outros (Da Silva *et al*, 2014). Materiais cerâmicos, comumente são frágeis, e, segundo a teoria da mecânica da fratura, sua resistência tem relação com o tamanho das microtrincas e poros existentes no material.

No que se imputa aos compósitos de matriz cerâmica, seu progresso nas últimas décadas tem harmonizado melhoria relevantes nos quesitos resistência mecânica e tenacidade à fratura, quando comparados a esses materiais na ausência do reforço (Liu, *et al*, 2024). Os CMC, mais comumente encontrados são reforçados com fibras contínuas, fibras descontínuas (agulhas ou *whiskers*) e partículas. A incorporação destes reforços em uma matriz cerâmica tem o potencial de aumentar a tenacidade a fratura em até próximo de 6 e 20 Mpa \sqrt{m} (Callister, 2020).

Segundo Silva *et al* (2014) os compósitos de matriz cerâmica podem ser classificados em dois grupos. O primeiro tem como elementos de reforço partículas ou whiskers, os quais exibem comportamento frágil mesmo com aumentos consideráveis de tenacidade à fratura e

resistência mecânica. O segundo grupo consiste em compósitos com fibras contínuas que exibem um comportamento de trinca quase dúctil acompanhado de *fiber pullout* (tipo de falha em compósitos com fibra onde as fibras “escorregam” pelo material matriz quando submetidas a trincas). A figura 11, mostra o *fiber pullout* em um compósito de matriz cerâmica.

Figura 11- Observa-se o efeito pullout nos compósitos de matriz cerâmica.



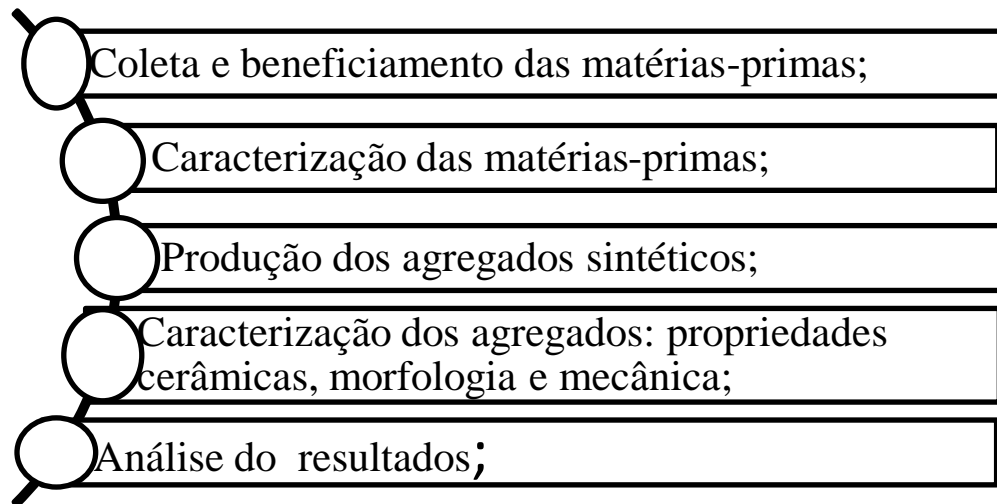
Fonte: Da Silva et al, (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados no decorrer desta pesquisa. Foram realizados estudos de adição de resíduo de caulim duro (flint) proveniente da mineração realizada no estado do Pará, ademais o resíduo de vidro também foi adicionado na produção de agregados sintéticos.

A pesquisa foi primacialmente desenvolvida experimentalmente no Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará (LPT/UFPA) campus Ananindeua. Os experimentos foram realizados em cinco etapas diferentes que seguem a ordem cronológica em que as atividades foram realizadas. A figura 12, mostra as etapas da pesquisa.

Figura 12- Etapas da Pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Cada etapa da pesquisa foi realizada em conformidade com as normas existente e concernentes a cada procedimento. Os procedimentos realizados neste trabalho foram os mesmos empregados por Souza (2010), no beneficiamento das matérias-primas e produção dos agregados sintéticos. As propriedades físicas foram realizadas de acordo com a ASTM (2001) e Souza (2010), e os ensaios mecânicos de compressão dos agregados sintéticos(pellets), foi realizado seguindo o estudo de Hiramatsu e Oka (1966).

3.1. MÉTODO

3.1.1. Beneficiamento da Matérias- Primas

As matérias-primas utilizadas na produção dos agregados sintéticos foram beneficiadas da seguinte forma:

A argila proveniente do município de São Miguel do Guamá, localizado no nordeste do estado do Pará, a argila foi selecionada em virtude da qualidade e da composição já comprovada em diversos estudos realizados com argila dessa região. Foi realizado primeiramente um processo de secagem utilizando em estufa da marca Solid Stel 100L, por um período de 24 horas, posteriormente houve a desagregação da argila utilizando um moinho de bolas da marca Solid, com capacidade de 30 litros, por um período de 20 minutos. Em processo contínuo com o intuito de uniformização granulométrica, foi utilizado um agitador de peneiras por um período de 30 minutos, usou-se peneiras com abertura de 80 mesh (0,177mm). A figura 13, mostra argila após o processo de beneficiamento.

Figura 13- Argila após o processo de beneficiamento.



Fonte: Autoria própria, 2025.

O resíduo de caulim, foi doado por uma empresa localizada no Estado do Pará. O resíduo foi primacialmente seco utilizando estufa da marca Solid Stel, por um período de 24 horas, posteriormente, o resíduo de caulim foi inserido em um moinho de bolas da marca Solid, por um período de 30 minutos, para o processo de cominuição, em seguida houve o peneiramento com peneiras com abertura de 80 mesh (0,177mm). A figura 14, mostra o resíduo de caulim após o processo de beneficiamento.

Figura14- Resíduo de caulim após o processo de beneficiamento.



Fonte: Autoria própria, 2025.

As garrafas de vidro do tipo long neck foram coletadas em empresas e locais de vendas deste produto. Posteriormente, a sua coleta houve um processo de assepsia para a retirada de sujidades e resíduos com a utilização de água e sabão, sendo submetido ao processo de secagem naturalmente. Em processo contínuo as garrafas de vidro foram quebradas (cacos de vidro), com o auxílio de um martelo. Em seguida os cacos de vidro foram inseridos em um moinho de bolas da marca Solid, por um período de 30 minutos com o objetivo melhorar o processo de

peneiramento, o processo de peneiramento foi realizado usando peneiras com aberturas de 80 mesh. A figura 15, mostra o resíduo e vidro após o processo de beneficiamento.

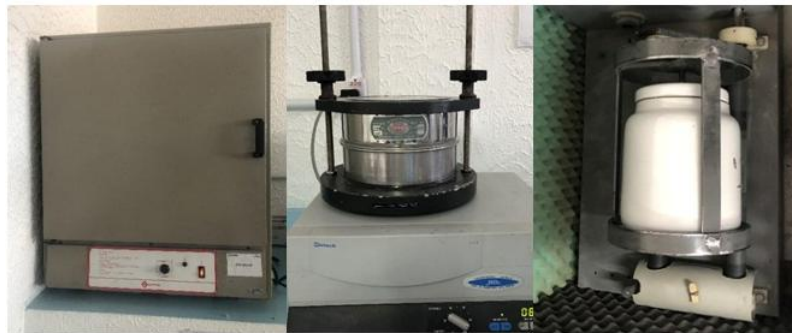
Figura 15- Resíduo de vidro após processo de beneficiamento.



Fonte: Autoria própria (2025).

A figura 16 mostra os equipamentos utilizados durante o processo de beneficiamento das matérias-primas.

Figura 16- Equipamentos utilizados no beneficiamento das matérias-primas.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2. Caracterizações das Matérias Primas e dos Agregados Sintéticos

As técnicas de caracterização que foram utilizadas neste trabalho foram: Difração de raios-X, Fluorescência de raios-X, Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier. Adicionalmente, os agregados foram investigados as suas propriedades físicas e ensaio de mecânico de compressão. Para a realização das caracterizações foram utilizados os equipamentos dos laboratórios pertencentes a Universidade Federal do Pará, pertencentes ao Campus Guamá- UFPA: Laboratório da Faculdade de Engenharia Química para a realização da aferição das propriedades físicas dos agregados

sintéticos após o processo de sinterização; Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Petroquímica e Geologia foram utilizados para a caracterização mediante as técnicas de caracterização DRX e FRX das matérias-primas, ademais foram utilizados as dependências do laboratório do Programa de Pós- Graduação em Física, para as caracterizações de Ftir e Mev com o objetivo de observar a morfologia das matérias-primas. Além disso, as caracterizações mecânicas foram realizadas no Laboratório de Práticas Tecnológicas (LPT), pertencente ao campus universitário de metropolitano de Ananindeua- UFPA.

3.2.2.1 Difração DE Raios- X (DRX)

Foi utilizado para a realização da caracterização mineralógica das amostras. O equipamento empregado foi da modelo PANalytical, tubo de raios-X cerâmico selado de Co ($K\alpha_1 = 1,78901\text{\AA}$). As condições de realização foram: voltagem de 40 kV, corrente de 35 mA, fenda de Soller de 0,04 rad (nos feixes difratados e incidentes), faixa de varredura de 2 a $110^\circ 2\theta$. A figura 17, observa-se o equipamento de difração de raios-x utilizado durante a pesquisa.

Figura 17- Equipamento de difração de Raios-X.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2.2- Fluorescência de Raios- X

Foi realizado por meio da Espectrometria de Fluorescência de Raios- X (FR-X). Com o instrumento de espectrometria dispersiva de comprimento de onda sequencial, modelo PANalytical Axions Minerals, om tubo de raios-X de cerâmica, anodo de Ródio (Rh) e potência máxima de 2,4 KW. A Figura 18, expõe a o equipamento de fluorescência de raio-X, utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 18- Equipamento de fluorescência de raios-X.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):

O MEV foi utilizado para a observação da microestrutura das amostras das matérias primas e dos agregados sintéticos com a composição de 70% ARG-30% RV e 70% ARG-30%RC, sinterizados a 1100°C, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo LEO 1430. Além disso, as amostras passaram por um processador de metalização com a utilização de partículas de ouro. O equipamento fica localizado o Instituto de Geociências (IG/UFPA). A figura 19 expõe o microscópio eletrônico de varredura (MEV), utilizado para realizar as análises dos agregados.

Figura19- Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autoria própria, 2025.

3.2.2.4. Espectrometria na Região de Infravermelho (FTIR):

Os espectros de infravermelhos das amostras foram obtidos na região espectral de 4000-400 cm^{-1} por transmissão com pastilhas KBr. As leituras das amostras foram realizadas em um Thermo, Nicolet IS50 FT-IR. A Aquisição dos dados foi realizada utilizando o *software* OMNIC.

3.2.2.5. Propriedades tecnológicas

O método empregado para determinar propriedades tecnológicas foram feitos seguindo as seguintes normas especificados por SOUZA (1989) e ASTM (2001) conforme as equações (1), (2) e (3) respectivamente: porosidade aparente (P.A), absorção de água (A.A) e massa específica aparente (MEA). Onde Mu (Massa Úmida), Mi (Massa Imersa) e Ms (Massa seca). A figura 20, mostra o equipamento utilizado na medição da massa imersa.

$$P.A(\%) = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} * 100 \quad (1)$$

$$A.A(\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad (2)$$

$$MEA(g/cm^3) = \frac{Ms}{Ms - Mi} * \rho_{H_2O} \quad (3)$$

Figura 20- Equipamento utilizado na medição na massa imersa.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2.6 Ensaios Mecânicos de compressão dos agregados

Ademais, a resistência dos agregados sintéticos (pellets), foi realizada com base na adaptação do ensaio proposto por Hiramatsu e Oka (1966) representado na equação 4, onde; R_c : Resistência a compressão, P_c : carga de ruptura e X diâmetro do agregado, com velocidade de cruzeta de 0,25mm/s e célula de carga de 2000 kg. Os ensaios foram realizados na máquina universal da Intermetric. A Figura 21, mostra o equipamento utilizado no ensaio dos agregados sintéticos.

$$R_c = \frac{2,8 \cdot P_c}{\pi X^2} \quad (4)$$

Figura 21- Máquina de ensaio compressão dos agregados sintéticos.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.3. Produção dos Agregados Sintéticos

Os agregados sintéticos foram produzidos utilizados as seguintes proporções, conforme pode ser observado nas tabelas abaixo:

Tabela 4- Composição de argila e resíduo de caulim.

Argila (%)	Resíduo de caulim (%)	Resíduo de vidro (%)
100	0	0
90	10	0
70	30	0

50	50	0
----	----	---

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 5- Composição de argila e resíduo de vidro.

Argila (%)	Resíduo de caulim (%)	Resíduo de vidro (%)
100	0	0
90	0	10
70	0	30
50	0	50

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 6- Composição com os três constituintes.

Argila (%)	Resíduo de caulim (%)	Resíduo de vidro (%)
90	5	5
70	15	15
50	25	25
40	30	30

Fonte: Autoria própria (2025).

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi a mesma utilizada por Souza (2010) sua tese que investigou a produção de agregados sintéticos utilizando resíduos do processo Bayer. O presente trabalho visa investigar a adição de resíduo de caulim e resíduo de vidro (pó) e as características alcançadas com este incremento. Em seguida, a composição foi inserida em um misturador de bancada por 20 minutos para a harmonização e melhor distribuição dos componentes na massa cerâmica, sendo posteriormente, a massa cerâmica inserida ao tambor

rotativo com capacidade de 160 litros (betoneira) para a pelotização do agregado sintético, além disso, com auxílio de um borrifador foi adicionado cerca de 30% de água para auxiliar na pelotização dos agregados. Em seguida, os agregados foram selecionados em variados diâmetros e posteriormente passaram por um processo de secagem por 24 horas com temperatura de aproximadamente 105° C em estufa.

Posteriormente, ocorreu o processo de sinterização dos agregados sintéticos, foram pré-estabelecidas as temperaturas de 1000 ° C e 1100°C com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, e serão submetidos ao patamar de temperatura por 3 horas, o resfriamento ocorreu de forma gradual até a temperatura ambiente. O equipamento utilizado para a realização da sinterização foi o forno da Marca Junger, modelo SSC, pertencente ao laboratório de fornos do Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Amazônia (PRODERRNA/UFPA). A figura 22, observa-se os agregados após o processo de sinterização na temperatura de 1100° C no interior do forno após o resfriamento gradual. Ademais, a Figura 23 mostra os agregados sintéticos após o processo de sinterização em temperatura de 1100°C.

Figura 22- Agregados após o processo de sinterização na temperatura de 1100° C no interior do forno após o resfriamento gradual.



Fonte: Autoria própria (2025).

A figura 23 expõem os agregados após o processo de sinterização na temperatura de 1100°C.

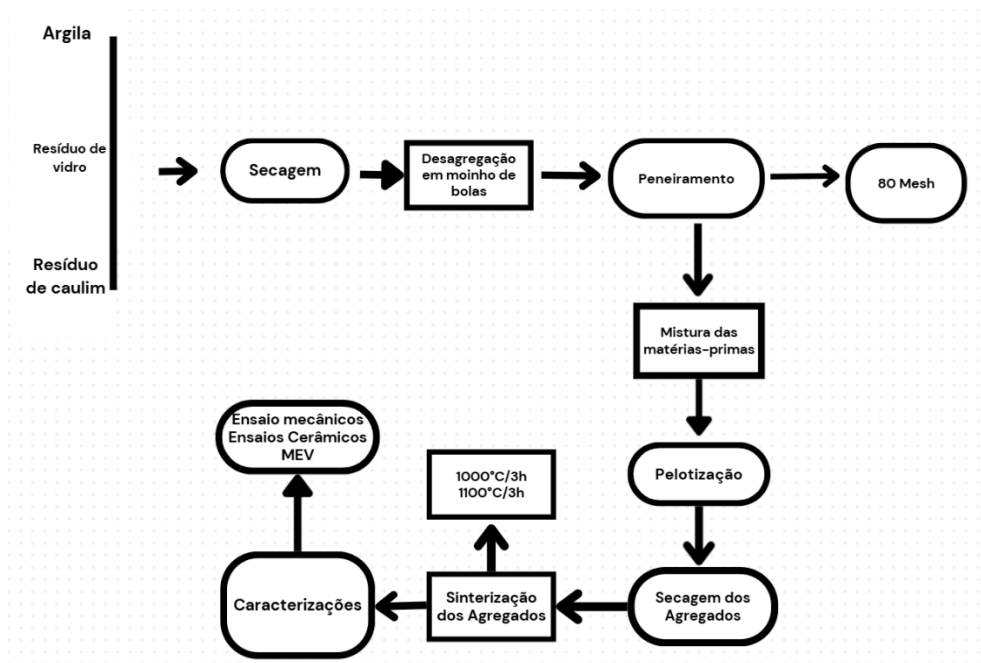
Figura 23- Agregados após o processo de sinterização em temperatura de 1100°C.



Fonte: A autoria própria (2025).

A Figura 24, exibe o fluxograma do processo produtivo dos agregados sinterizados, desde o beneficiamento das matérias-primas até a etapa de caracterização dos agregados.

Figura 24- Fluxograma do processo.



Fonte: A autoria própria (2025).

4- Resultados e Discussões

4.1- Caracterização das matérias-primas

4.1.2- Fluorescência de Raios-X

A tabela 7, apresenta a caracterização por fluorescência de raios-X das matérias primas utilizadas na produção deste trabalho.

Tabela 7- Resultado da fluorescência de raios-X.

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	ZrO ₂
Argila	62,34	26,00	1,36	7,75	0,19	-----	0,913	0,06	0,04
Vidro	72,88	1,61	0,07	0,38	12,14	11,60	0,58	-----	0,02
Resíduo de caulim	51	42	3,20	1,53	0,565	-----	0,913	0,100	0,405

Fonte: Autoria própria (2025).

Diante do resultado apresentado na caracterização realizado na argila, verifica-se que esta é constituída majoritariamente de sílica e alumina como óxidos predominantes, com 62,34% e 26% respectivamente, assim como a presença de óxidos de ferro (Fe₂O₃) com valor superior a 7% que auxilia para a coloração em tons avermelhados quando os agregados forem submetidos a elevação da temperatura. Ademais, também é observada a presença de óxidos fundentes em pequenas quantidades, como o Na₂O (0,19%) e MgO (0,913%), a baixa presença dos óxidos fundentes nas argilas estudadas dificulta a formação de fase vítrea, além disso a presença do oxido de titânio (TiO₂) irá conferir brilho as peças cerâmicas quando esta forem submetidas ao processo de sinterização. Segundo Racanelli et al (2021) e Brito et al (2022), que analisaram argilas obtidas das mesmas regiões do município de São Miguel do Guamá, para a produção de blocos de vedação e agregados sintéticos respectivamente, observou-se valores análogos aos resultados apresentados com a argila utilizada neste trabalho.

O vidro é composto por essencialmente por SiO₂ 72,88%, Al₂O₃ 1,61%, Fe₂O₃ 0,38%, e Na₂O 12,14% CaO 11,60 %, essa composição é característico de vidros soda-cal. A presença expressiva de oxido de silício dirimir significativamente a plasticidade do resíduo de vidro.

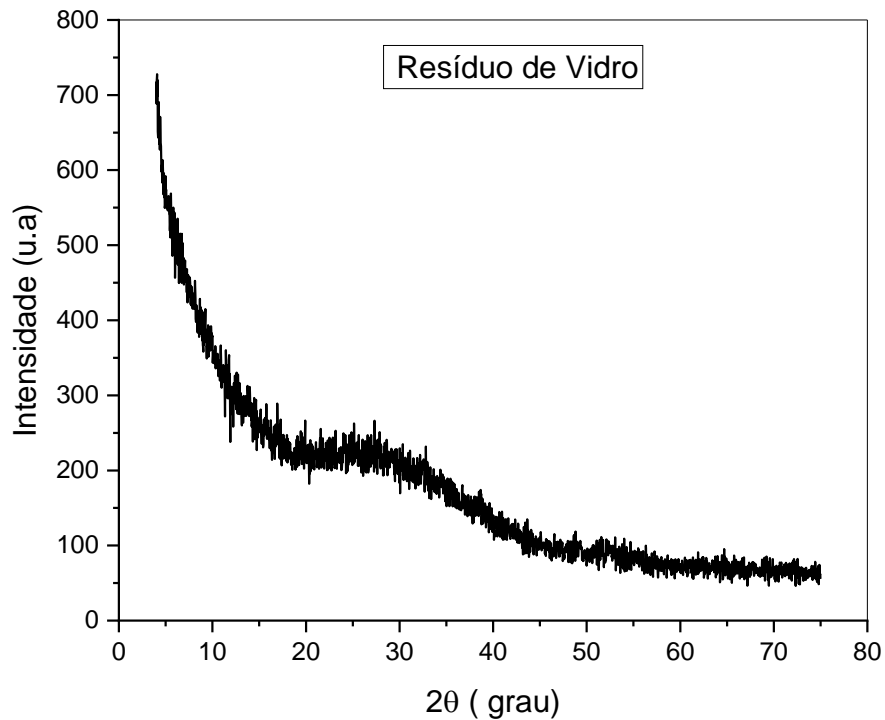
Além disso, a presença de óxidos alcalinos (CaO e Na_2O), facilitam a formação de fases vítreas durante o processo de sinterização e reduzindo a viscosidade do vidro, o óxido de alumínio é um modificador de rede que auxilia no ganho de resistência mecânica. Ademais, encontra-se a presença de óxidos em quantidades pequenas, como o óxido de titânio e óxido de ferro responsáveis por conferir cor (âmbar e verde) as garrafas. De acordo com Scheuermann Filho (2019) e Zaccaron et al (2019), que analisaram a incorporação de resíduos provenientes de garrafas de bebidas do tipo long neck em materiais cerâmicos, mostram que a composição encontrada em seus respectivos trabalhos são análogos ao encontrado na tabela 7, que indicam que a presença significativa de óxido de silício e óxidos alcalinos diminuem a plasticidade e favorecem a formação da fase vítrea, assim como a presença de óxidos de titânio e ferro em pequenas quantidades.

Os resultados apresentados na tabela 7, indicam que o resíduo de caulim é constituído majoritariamente por óxido de silício (SiO_2), com percentual de 51 %, assim como em sua composição uma quantidade expressiva de alumina (Al_2O_3) 42%. Além disso, encontra-se na análise química óxido de titânio e óxido de ferro, com respectivos percentuais de 3,20% e 1,53%, ademais os outros óxidos encontrados na fluorescência de raios-X, que somam aproximadamente 2 %, esses óxidos são considerados impurezas. Os resultados apresentados na tabela, indicam similaridades com a pesquisa desenvolvida Piavann (2021), que utilizou resíduos de caulim para a obtenção de mulita para a produção de cerâmica branca.

4.1.3- Caracterização Mineralógica

A figura 26, mostra o resultado da caracterização de difração de raios-X, realizada no resíduo de vidro proveniente das garrafas de bebidas.

Figura 26- Difração do resíduo de vidro.

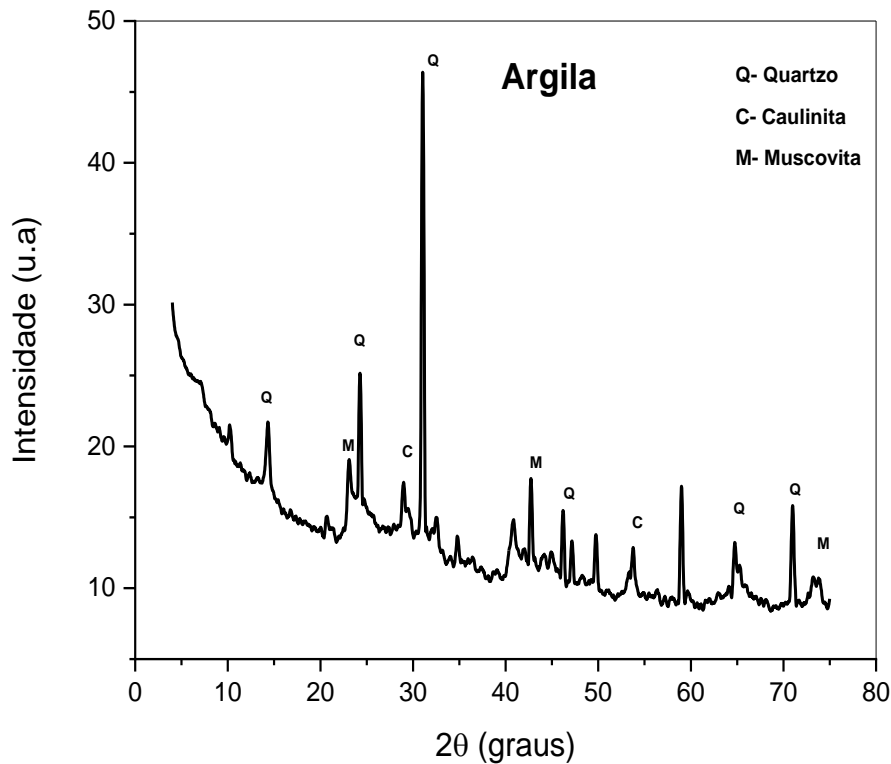


Fonte: Autoria própria (2025).

A figura 26 apresenta o difratograma do resíduo de vidro, onde se observa com clareza a ausência de fases cristalinas (picos bem definidos), apresentado somente bandas relacionadas a fase vítrea, característico de materiais amorfo. Segundo Paiva, 2009, Tretin *et al*, 2020 e Santos et al 2024, que utilizaram resíduos de vidro obtidos de garrafas de bebidas, tal comportamento está de acordo com materiais que apresentam esta particularidade sem uma estrutura cristalina sem organização (amorfo).

A Figura 27, apresenta o resultado da difratometria da argila utilizada no trabalho, onde observa-se picos bem característicos de quartzo- SiO_2 (Q), caulinita- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (C) e muscovita- $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ (M).

Figura 27- Difração de raio-X da argila.

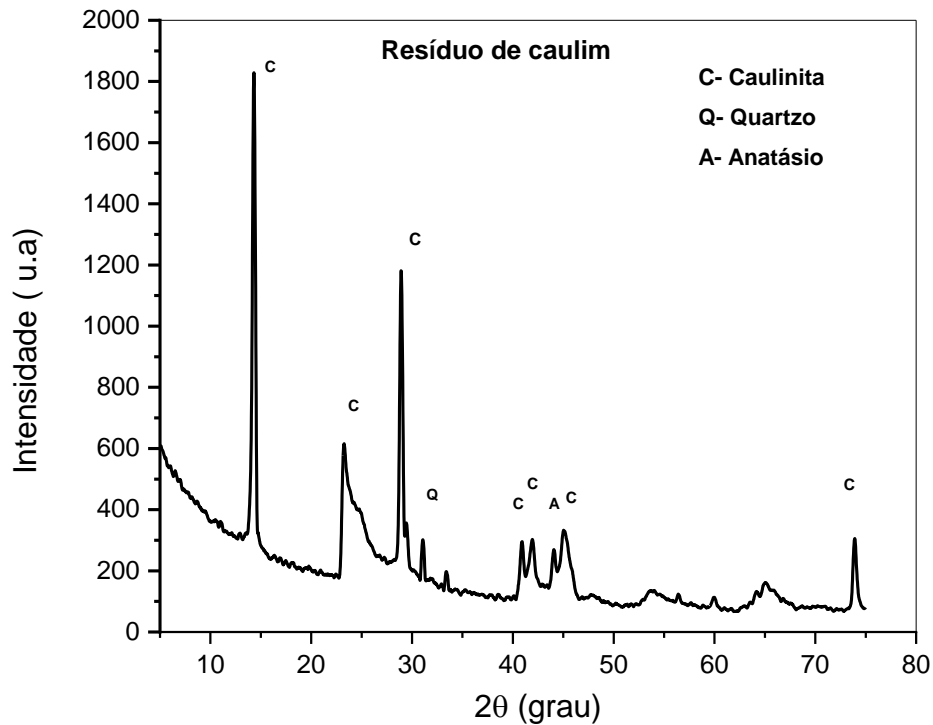


Fonte: Autoria própria (2025).

Os picos mais hegemônicos são alusivos à caulinita e ao quartzo. Os picos de quartzo, são exibidos por sua intensidade, isto é mediante ao elevado grau de cristalinidade em relação a caulinita e não a sua concentração em si. O quartzo presente na argila, é responsável pela perda da plasticidade, pois não é matéria-prima plástica e durante ao processo de sinterização é inerte. O argilomineral caulinita é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade na argila, quando se adiciona água. Ademais, a presença de mica muscovita pode atuar como óxido fundente, uma vez que em sua estrutura observa-se a presença de óxidos alcalinos. De acordo com Racanelli et al (2020) e Brito et al (2023), que desenvolveram pesquisas utilizando argilas provenientes do município de São Miguel do Guamá, mostram que os picos apresentam similaridade com as argilas utilizadas no presente estudo.

A Figura 28, mostra a difratometria do resíduo de caulim utilizado na realização deste trabalho.

Figura 28- Difração de raio-X do resíduo de caulim.



Fonte: Autoria própria (2025).

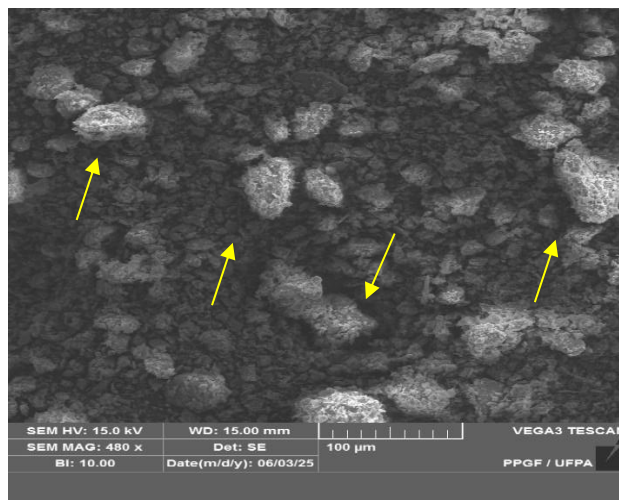
A análise do difratograma observa-se que o resíduo de caulim utilizado na produção dos agregados sintéticos sinterizados é constituído principalmente do argilomineral caulinita, uma vez que apresenta um elevado grau de ordem estrutural, como pode ser visualizado pela intensidade elevada dos picos. Segundo Maia et al (2019), que utilizou resíduo de caulim proveniente da região norte do Brasil na produção de zeólitas, observou difratogramas com picos similares. Mediante a observação do difratograma, visualiza-se a formação de tripletos com reflexões bem individualizados que compreendem aos picos referentes a caulinita. Dessa maneira, observa-se, que de fato elevados teores de SiO_2 encontrados na fluorescência de raios-X, deve-se precipuamente à sílica livre proveniente do quartzo e aos silicatos da mica e do argilomineral caulinita. Ademais, a quantidade expressiva do argilomineral caulinita, visualizada no resíduo de caulim sugere a facilitação na formação da fase mulita que teoricamente aumentará a resistência mecânica das peças cerâmicas mediante a utilização deste resíduo, quando houve o aumento da temperatura (Bonphayak *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021; Junior et al, 2022; Bing Rao *et al.*, 2023).

4.1.4- Caracterização morfológica das matérias-primas

A Figura 29, pode ser observada a micrografia eletrônica de varredura da argila utilizada na confecção dos agregados.

Pode ser observar que há a presença de partículas de caulinita no mais diversificados tamanhos e formatos. Observa-se também o formato de pseudos-hexagonais em formato de nuvens. De acordo com Zunino (2020) e Pires (2023) identificaram que folhas em formato de “nuvens”, sobrepostas, haja vista que estas explicam a elevada porcentagem de caulinita, uma vez que as lâminas destes tipos são identificadas na morfologia das argilas ricas nesse tipo de argilomineral.

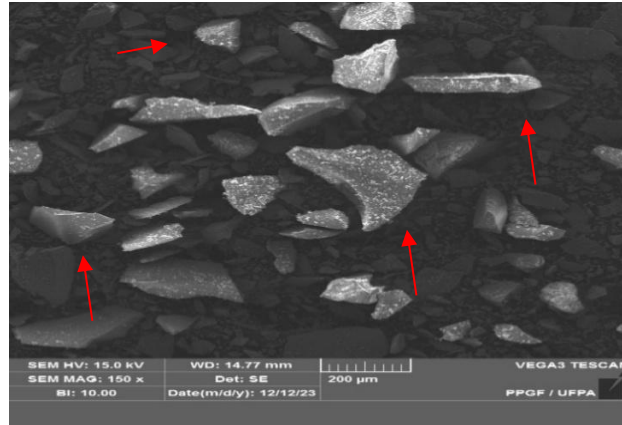
Figura 29- MEV da argila.



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 30, mostra a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra de resíduo de vidro proveniente de garrafas long neck.

Figura 30- Micrografia eletrônica do resíduo de vidro.



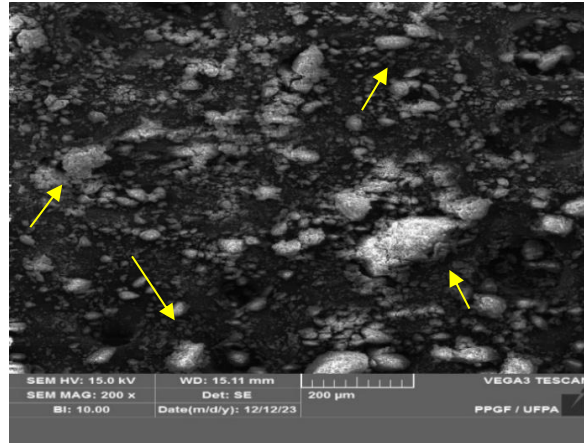
Fonte: Autoria própria (2025).

Pode-se inferir da micrografia eletrônica de varredura do resíduo de vidro obtidos das garrafas de bebidas, que a morfologia é sinalizada por bordas dispare, características de materiais fracionado maquinamente, além disso apresenta uma heterogênea distribuição de tamanhos de partículas, transvertendo desde pedaços maiores a pequenos fragmentos. Além disso, observa-se que algumas partículas exibem superfícies moderadamente mais lisa, presumivelmente devido ao desgaste abrasivo durante o processo prolongado de moagem.

Segundo Jian Lu (2017) e Heriyanto *et al* (2018), Ziejewsko et al (2023), as formas variadas da estrutura do vidro são em virtude deste material não apresentar uma estrutura cristalina (amorfo) definida, além disso o vidro apresenta um comprimento maior que a largura (oblongo) essa topografia do pó de vidro aumenta consideravelmente a coesão, ou seja, a capacidade de se unir. Ademais, essas particularidades podem interferir negativamente na trabalhabilidade, pois o pó de vidro se aglutina, em virtude da maior energia superficial presente conforme a diminuição do diâmetro das partículas do resíduo de vidro.

A Figura 31, mostra a micrografia eletrônica do resíduo de caulim que foi utilizado para a produção de agregados sintéticos calcinados.

Figura 31- Micrografia eletrônica do resíduo do resíduo de caulim.



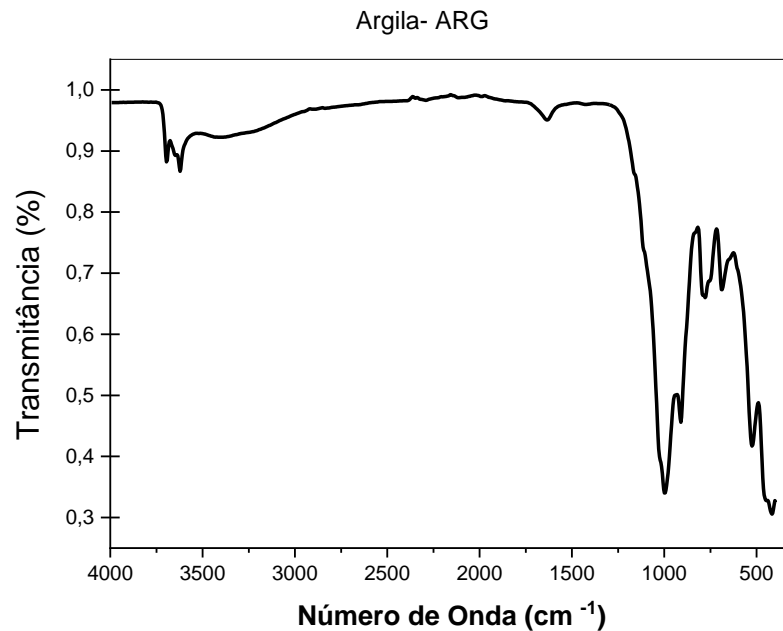
Fonte: Aatoria própria (2025).

Conforme pode ser observado na micrografia eletrônica de varredura do resíduo de caulim, que este é constituído majoritariamente por partículas aglomeradas com empilhamentos do tipo livreto, com a morfologia formada por cristais de pseudos-hexagonal característico do argilomineral caulinita, além de apresentar uma gama bastante heterogênea do tamanho de partículas. Segundo Silva et al (2021) e Souza et al (2020), que investigaram a incorporação do resíduo de caulim proveniente do norte do Brasil na produção de materiais cerâmicos, observam as particularidades morfológicas similares ao encontra na figura acima.

4.1.5- Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 32 mostra a análise da argila por espectroscopia vibracional na região de infravermelho (FTIR).

Figura 32- FTIR da argila.



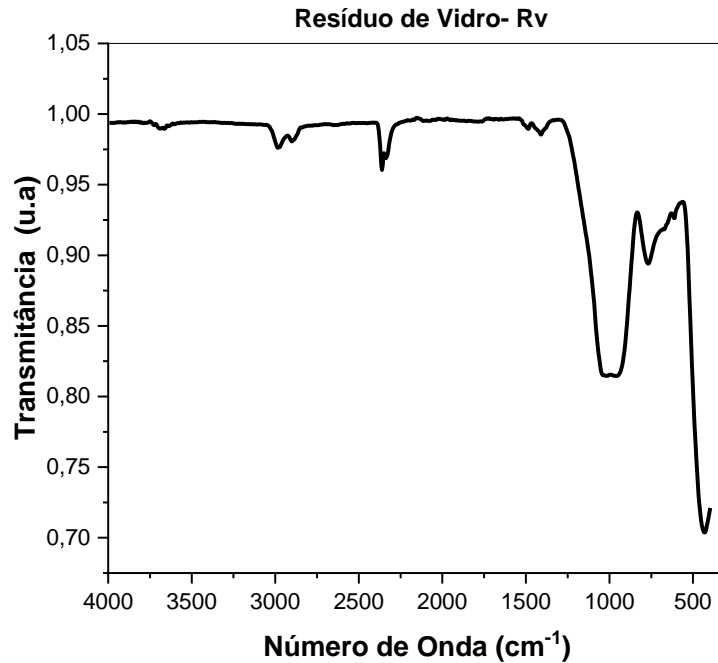
Fonte: Autoria própria (2025).

O gráfico mostra as vibrações próximo a 3600 cm^{-1} que está associada a hidroxila, ademais ocorrem vibrações nos pontos próximos a 1100 cm^{-1} e 900 cm^{-1} , que estão associadas as vibrações do Si-O e do alongamento AlOH, respectivamente.

De acordo com o trabalho de Santos *et al* (2013), que analisou argilas da região amazônica, mais precisamente do estado do Pará, observa-se uma banda larga próximo a $3650\text{--}3619\text{ cm}^{-1}$, que condiz a vibração perpendicular e a vibração paralela ao plano ab do OH, essas bandas são características dos caulins da região norte do país. Adicionalmente, as bandas entre $1116\text{--}1007\text{ cm}^{-1}$, correspondem a vibração da ligação Si-O, entre $913\text{--}911\text{ cm}^{-1}$, encontram-se banda características de deformação da ligação Al-OH.

A Figura 33, mostra o espectro de infravermelho realizado no resíduo de vidro provenientes das garrafas de bebidas.

Figura 33-FTIR do resíduo de vidro.



Fonte: Autoria própria (2025).

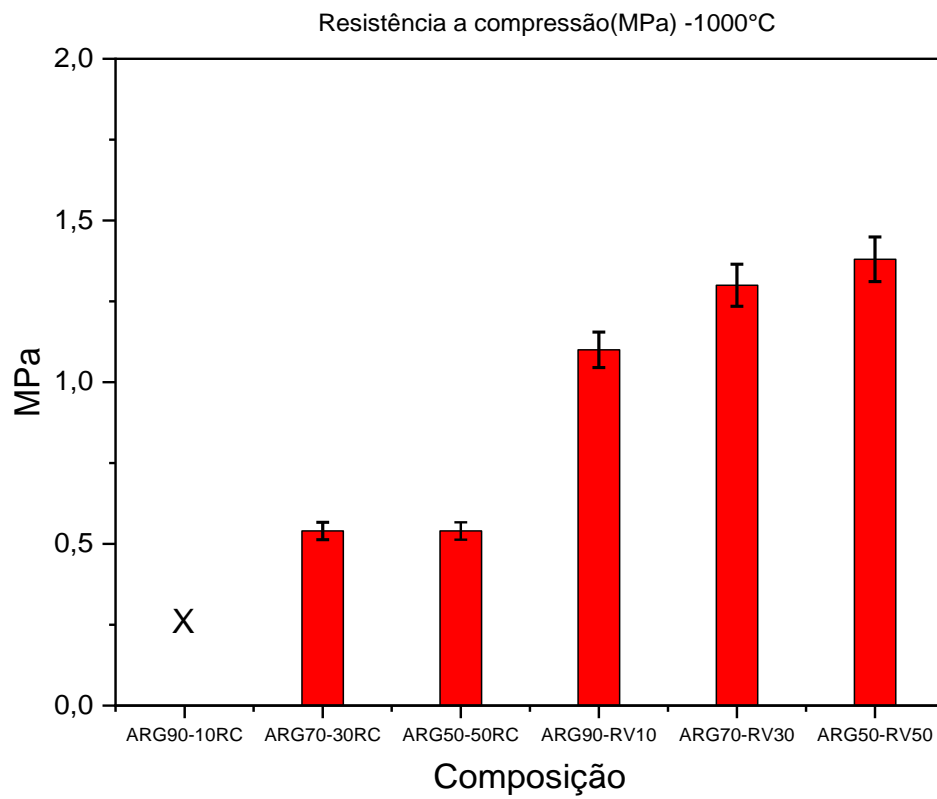
A figura, acima, apresenta o espectro de infravermelho detalhado para as faixas de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , relativo a amostra de vidro proveniente das garrafas de bebidas. Visualiza-se, que próximo a 1000 cm^{-1} , ocorrem vibrações que estão associadas ao esticamento dos siloxano, além disso, ocorre a total condensamento das unidades de tetraedros de sílica próximo a 615 cm^{-1} .

Os trabalhos de Song *et al* (2009) e Sina Dadsetan *et al* (2022) identificaram que há um estiramento próximo a 1070 cm^{-1} atribuída a vibração de estiramento das ligações Si-O-Si, correspondente aos grupos funcionais de siloxano. Além disso, observa-se também uma banda na região de 1027 cm^{-1} que estão associadas as vibrações de alongamento de Si-O em unidades de tetraedros de sílica, totalmente condensados, o que pode está relacionado a presença de estruturas hexagonais abertas de tridimita. Ademais, a figura 33 mostra o espectro, as bandas no próximo a 605 cm^{-1} condizentes as deformações da ligação do tetraedro de sílica (SiO_2).

4.2.2- Propriedades Mecânicas dos Agregados(pellets)

As figuras 35 e 36, expõem os gráficos das resistências a compressão dos agregados sintéticos nas temperaturas de 1000°C.

Figura 35-Resistência a compressão dos agregados produzidos com resíduos de caulim e vidro.



Fonte: Autoria própria (2025).

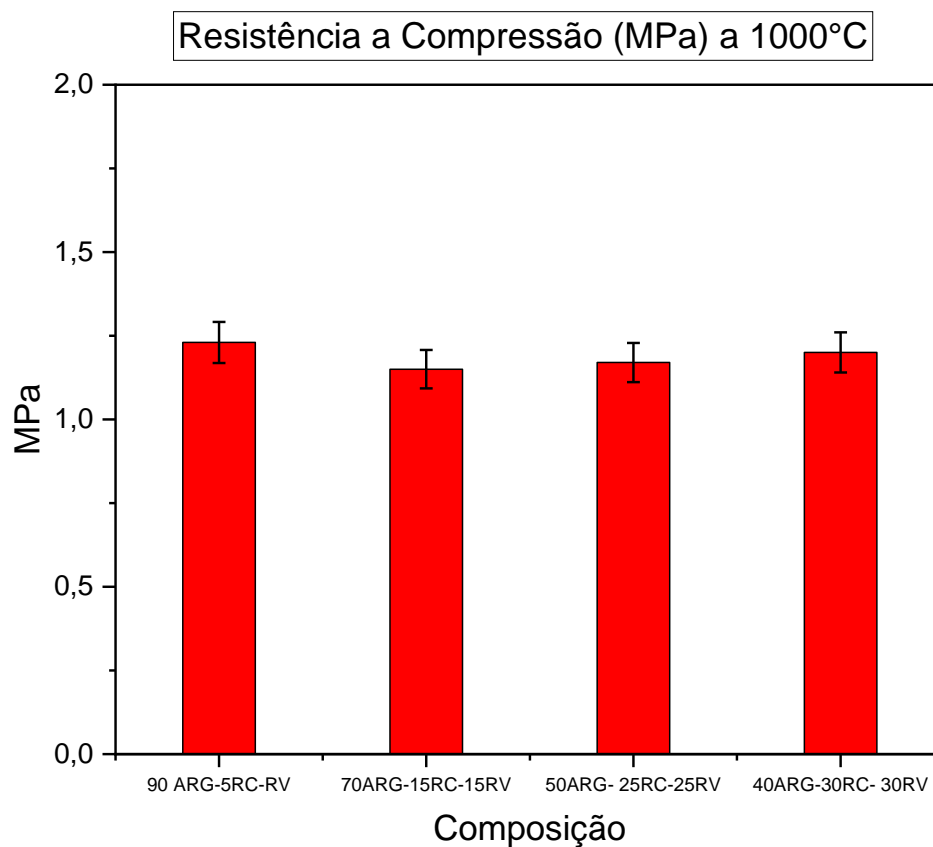
Pode ser observado na figura 35, que conforme ocorre a adição do resíduo de vidro na produção dos agregados sintéticos, há o incremento na resistência mecânica a compressão de 1,10 MPa \pm 0,055 (90% ARG-10% RV) para 1,38 MPa \pm 0,069 (50% ARG-50% RV), ou seja, um aumento de aproximadamente 20,29% na resistência mecânica. O ganho de resistência mecânica pode está fortemente ligado a presença dos óxidos alcalinos (Na₂O e CaO), uma vez que estes aumentam a fluidez da fase vítrea. Ademais, quando se observa os valores obtidos os agregados sintéticos são produzidos com resíduo de caulim, visualiza-se que não a mudanças significativas nos valores auferidos, sendo o valor máximo alcançado de 0,54 MPa \pm 0,027, para as composições contendo 30% e 50% de resíduo de caulim. Adicionalmente, vale frisar que as amostras contendo 10% de resíduo de caulim a máquina empregada para a realização do ensaio não conseguiu auferir valores.

Segundo Tuan et al (2013) que utilizou resíduo de vidro na produção de agregados sintéticos leves conforme observações em seu trabalho quando há o aumento da porcentagem

de resíduo de vidro de 30% - 50%, ocorre o incremento da resistência mecânica em virtude da presença de óxidos de silício (74,02%), óxido de sódio e óxido de cálcio respectivamente com 12,06 % e 11,60 %, que contribuem para melhorar a resistência mecânica dos agregados.

A figura 36, evidencia as médias das resistências mecânicas relacionadas aos agregados sintéticos contendo as três matérias-primas.

Figura 36- Propriedades mecânicas dos agregados sintéticos utilizando as três matérias-primas.

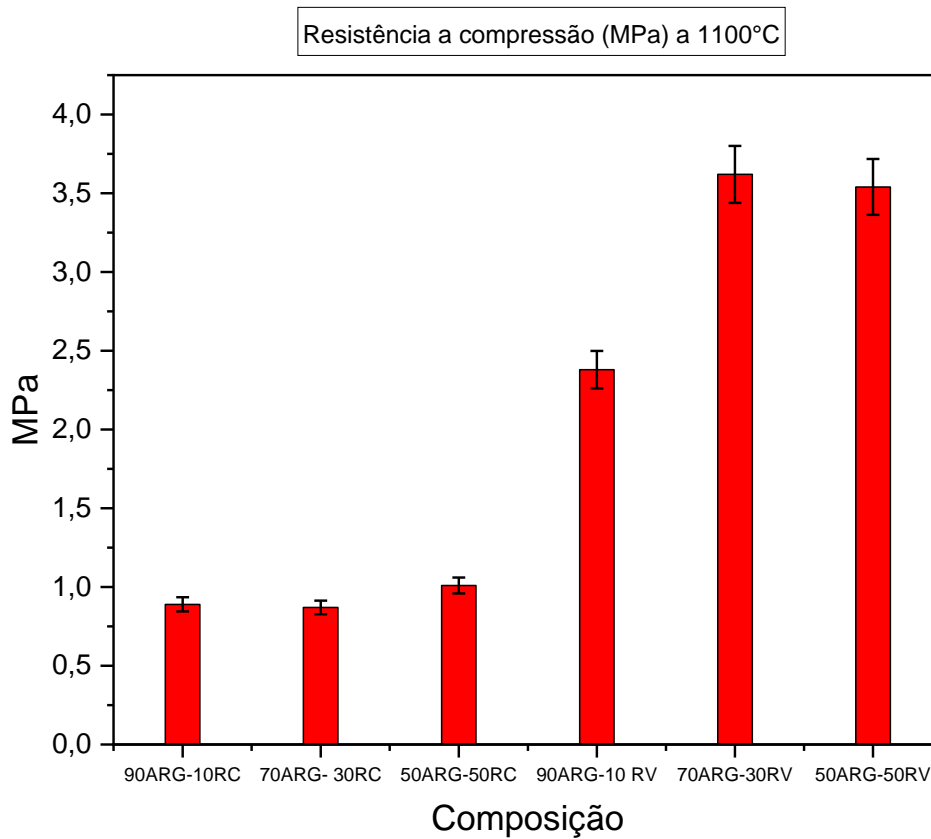


Fonte: Autoria Própria (2025).

Observa-se conforme a adição dos resíduos de caulim e vidro, houve a diminuição dos valores de resistência a compressão. Essa diminuição pode estar ligada a maior produção de gases como CO₂ no interior dos agregados o que ocasiona uma maior produção de poros, em detrimento da resistência mecânica. A composição que conseguiu alcançar o valor máximo foi 90%ARG-5%RV-5%RC, 1,23 Mpa \pm 0,061. De acordo com Lemougna et al (2020), que investigou a adição de resíduo proveniente do processamento do caulim na produção de peças cerâmicas, ocorre a diminuição da resistência mecânica em virtude da ausência de óxidos de fundentes.

As figuras 37 e 38, mostram os gráficos das composições das sinterizadas a 1100°C.

Figura 37- Resistência a compressão (MPa) a 1100°C, contendo resíduo de vidro e resíduo da produção de caulim.



Fonte: Autoria própria (2025).

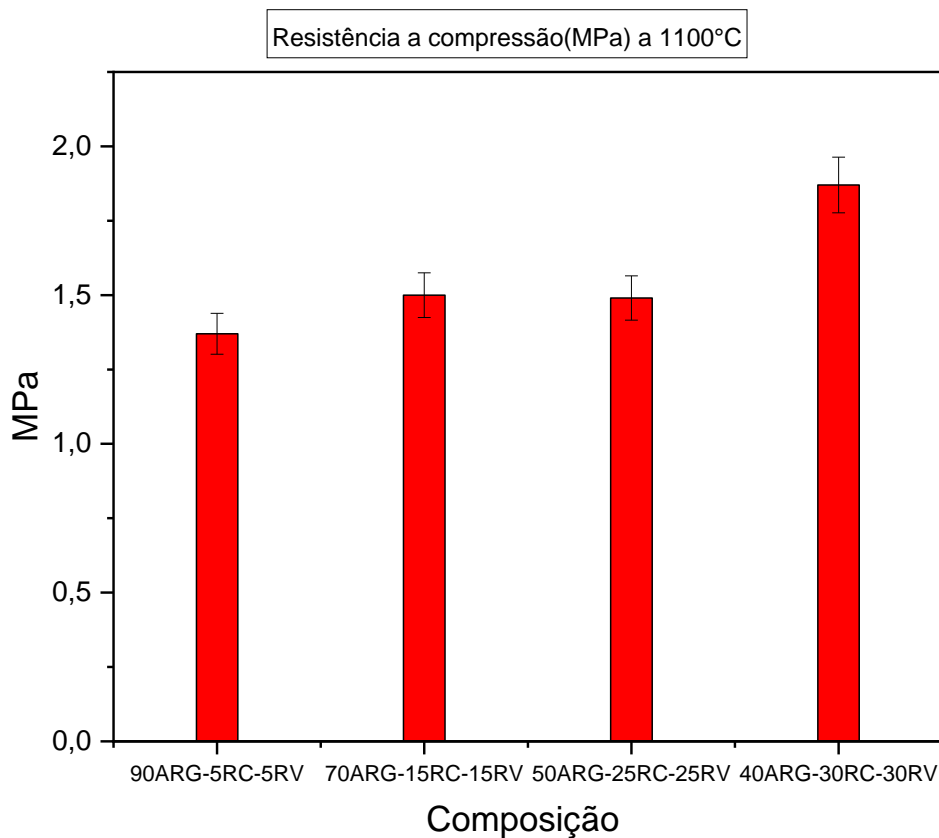
Os resultados do ensaio de compressão mostram que os agregados produzidos com resíduo de vidro e argila apresentam maiores valores a resistência a compressão, tendo o maior valor auferido 3,62 MPa \pm 0,181 com 30% de resíduo de vidro. As composições de agregados produzidos com resíduo de caulim o teste a compressão foi de 1,01MPa \pm 0,05 para a composição de 50% de resíduo.

Segundo Carneiro (2003), em sua pesquisa que analisou resíduo de caulim da região norte do Brasil, avalia que na temperatura aproximada de 1100°C, ocorre o início da formação da mulita. A presença da mulita está associada ao ganho de resistência mecânica dos agregados produzidos.

A figura 38 mostra o gráfico de resistência mecânica a compressão dos agregados produzidos com as três matérias-primas e sinterizados a 1100°C.

Pode se observado que conforme a adição das quantidades dos resíduos na produção dos agregados sintéticos, ocorre a elevação da resistência mecânica dos mesmos, sendo a composição de 40%ARG-30%RV-30%RC, auferiu 1,87 MPa \pm 0,093 como maior resistência. Esse ganho na resistência mecânica pode está relacionado com a presença de óxidos fundente (NaO₂ e CaO) que que facilitam o processo de sinterização contribuindo para um ponto de fusão mais baixo. Além disso, os óxidos fundentes podem diminuir a viscosidade da fase líquida em elevadas temperaturas, o que é oportuno para materiais sinterizados. Ademais também se visualiza um ganho de resistência mecânica significativo das demais amostras, esse ganho de resistência quando comparado as mesmas composições com a temperatura de 1000°C, pode está relacionado também a formação da fase vítrea com maior eficiência em virtude da elevação da temperatura, haja vista que esta preenche os espaços vazios(poros) formados durante o processo de sinterização.

Figura 38- Resistência a compressão (MPa) a 1100°C, contendo as três matérias-primas.



Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com Campelo (2023) e Oliveira (2017), que avaliaram a adição de vidro na produção de agregados sintéticos, desvelam que com o aumento do teor do resíduo de vidro a resistência a compressão dos agregados aumentam, uma vez que há uma maior eficiência no processo de sinterização em virtude da presença dos óxidos fundentes presentes na composição dos agregados. Segundo Caetano et al (2021), que investigaram a incorporação de resíduos de caulim na produção de produtos cerâmicos, com a elevação da temperatura a o ganho de resistência mecânica, em virtude da presença de feldspato sódico na composição, além disso a presença de óxidos fundentes e caulinita em elevadas temperaturas, conferem maior resistência mecânica por apresentar uma relação mais benéfica.

4.2.3. Propriedades Tecnológicas

A tabela 8 mostra as propriedades tecnológicas de porosidade aparente (P.A), absorção de água (A.A) e massa específica aparente (MEA g/cm^3) e as propriedades mecânicas de resistência a compressão (RMC) da argila calcinada (agregados sintéticos sinterizados com 100% de argila), nas temperaturas de 1000°C e 1100°C.

A tabela 8 mostra as propriedades tecnológicas da argila calcinada e submetida as temperaturas de 1000°C e 1100°C, observa-se que com a elevação da temperatura todas as propriedades tecnológicas diminuem, os valores de absorção de água são tidos como elevados, uma vez que os valores para argila expandida não ultrapassam 10%. Ademais outro fator preponderante são os óxidos presentes na composição da argila como o óxido de ferro, óxido de sódio, que auxiliam na formação da fase líquida. Segundo Rossignolo (2009) e Santis (2012) que investigaram a produção de agregados leves de argilas calcinadas, observaram que as propriedades tecnológicas tendem a diminuir com a elevação da temperatura, e essa particularidade pode esta associado a uma maior densificação dos corpos de provas, com consequência diminuição dos poros com a elevação da temperatura.

A resistência mecânica a compressão dos agregados também aumenta conforme a elevação da temperatura, passando de 2,34 MPa para 2,69 MPa, observa-se que conforme diminui a absorção de água ocorre o aumento da resistência mecânica. De acordo com Oliveira et al (2017), que investigou a produção de agregados leves utilizando argilas do nordeste do país esse ganho de resistência mecânica é atribuído a maior densificação dos agregados conforme há o aumento da temperatura.

Tabela 8- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com 100% de argila.

Temperatura	P.A(%)	A.A(%)	MEA(g/cm ³)	RMC (MPa)
1000°C	29,64 ±0,10	22,14 ±0,84	2,90±0,022	2,34±0,41
1100°C	27,72 ± 0,08	18,21± 0,06	2,24±0,012	2,69±0,32

Fonte: Autoria própria, 2025.

As Tabelas 9, 10 e 11 expõem respectivamente as propriedades físicas dos agregados sintéticos, produzidos argila e resíduo de vidro, argila e resíduo de caulim e argila, resíduo de caulim e resíduo de vidro sinterizados na temperatura de 1000°C.

A tabela 9, mostra as propriedades dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de vidro.

Tabela 9- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de vidro sinterizados a 1000°C.

Composição	P.A(%)	A.A (%)	MEA (g/cm ³)
90% ARG-10%RV	32,40 (±0,490)	20,03(±0,220)	2,42(±0,018)
70% ARG-30%RV	29,01(±0,386)	18,73(±0,170)	2,32(±0,027)
50% ARG-50%RV	28,78(±0,415)	18,62(±0,180)	2,28(±0,016)

Fonte: Autoria própria, (2025).

Como pode se observado na tabela conforme há adição do resíduo de vidro nas composições dos agregados, ocorre a diminuição de todas as três propriedades tecnológicas analisadas. Observa-se que as composições contendo 30% e 50% de resíduo de vidro apresentam menores índices de absorção de água e porosidade aparente, assim como também menores índices de massas específicas aparentes, quando comparado a composição que apresenta 10% de resíduo de vidro. Segundo Tuan et al (2013), que pesquisou a produção de agregados sintéticos utilizando resíduo de vidro e lodo de esgoto e conforme a o incremento do resíduo de vidro as propriedades físicas diminuem significativamente, sendo os percentuais de 30% e 50 % os que conseguiram maior redução dessas propriedades. De acordo com Liu et al (2018), que estudou a produção de agregados leves utilizando pó de vidro na confecção, observou que conforme a o adicionamento do pó de vidro as propriedades de absorção tendem a diminuir com percentuais próximos a 30%, uma vez que abaixo deste percentual a presença de SiO₂, não havia SiO⁴⁺ para formar tetraedros, e retornam a aumentam quando este percentual se eleva para 50 % de pó de vidro.

De acordo com B.S. Carneiro et al (2003) e Alves et al (2016) mostram em suas pesquisas que caracterizaram caulins duro da região amazônica e do nordeste brasileiro respectivamente, observaram que temperaturas próximas a 1000°C há a decomposição do metacaulim em sílica amorfa e espinélio ou mulita. Essa decomposição pode ser responsável pela diminuição da massa específica aparente, uma vez que pode haver a formação do microconstituente mulita.

A tabela 10 apresenta as propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de caulim.

Observa-se da tabela10 as propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos sinterizados a 1000°C. Visualiza-se que assim como ocorreu com os agregados produzidos com argila e resíduo de vidro, ocorreu também a diminuição de todas as características analisadas. Além disso, observa-se valores superiores aos encontrados com valores auferidos com os agregados produzidos com resíduos de vidro, essa particularidade esta relacionada com composições ricas em óxidos de alumínio como a argila e o resíduo de caulim. De acordo com Alves (2016), que investigou a utilização de resíduo de caulim na produção produtos cerâmicos há uma tendência significativa de aumento das propriedades física quando a presença de óxido de alumínio aumenta.

Tabela 10- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de caulim sinterizados 1000°C.

Composição	P.A(%)	A.A (%)	MEA (g/cm³)
90% ARG- 10% RC	40,27(±0,202)	28,47(±0,202)	2,47(±0,017)
70% ARG- 30% RC	35,58(±353)	22,39(±0,183)	2,47(±0,026)
50% ARG- 50% RC	32,36(±0,774)	19,34(±0329)	2,30(±0,016)

Fonte: Autoria própria, (2025).

A Tabela 11, mostra as propriedades tecnológicas dos agregados sinterizados com as três matérias-primas utilizadas na produção dos agregados sinterizados a 1000°C.

Tabela 11- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos utilizando as três matérias-primas sinterizados a 1000°C.

Composição	P.A (%)	A.A(%)	MEA(g/cm³)
-------------------	----------------	---------------	------------------------------

90% ARG- 5% RC- 5% RV	43,49($\pm 0,183$)	32,41($\pm 0,490$)	2,42($\pm 0,016$)
70% ARG- 15% RC- 15% RV	39,68($\pm 0,329$)	32,14($\pm 0,284$)	2,36($\pm 0,027$)
50% ARG- 25% RC- 25% RV	38,34($\pm 0,157$)	30,01($\pm 0,359$)	2,35($\pm 0,018$)
40% ARG- 30% RC- 30% RV	37,15($\pm 0,221$)	29,87($\pm 0,226$)	2,38($\pm 0,018$)

Fonte: Autoria própria, (2025).

Observa-se que as três propriedades analisadas apresentam a diminuição conforme a o adicionamento dos resíduos. Essa diminuição expressiva nos valores auferidos podem estar relacionados as transformações microestruturais que ocorrem com a elevação da temperatura. De acordo com Alves et al (2016), as amostras contendo resíduo de caulim são menos sensíveis a desidroxilação da caulinita, haja vista que seu teor de caulinita em menor. Adicionalmente, a diminuição das propriedades cerâmicas pode esta relacionadas com a formação de gases durante o processo de aquecimento, o que ocasiona a maior formação de poros.

A tabela 12 apresenta a composição contendo somente argila e resíduo de vidro na confecção dos agregados sintéticos sinterizados a 1100°C.

Tabela 12- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com argila e resíduo de vidro sinterizados a 1100°C.

Composição	P.A(%)	A.A (%)	MEA (g/cm ³)
90% ARG-10%RV	20,61($\pm 0,774$)	12,73($\pm 0,3329$)	2,03($\pm 0,016$)
70% ARG-30%RV	18,63($\pm 0,789$)	11,69($\pm 0,329$)	1,94($\pm 0,026$)
50% ARG-50%RV	16,15($\pm 0,782$)	9,92($\pm 0,330$)	1,85($\pm 0,027$)

Fonte: Autoria própria (2025).

Visualiza-se, que conforme a adição do resíduo de vidro as propriedades estudadas tendem a diminuir, tendo a composição 50% ARG-50% RV, destaque quando se observa exclusivamente a propriedade de absorção de água de 12,73% para 9,92%. Além disso, observa-se que a diminuição expressiva da massa específica aparente, conforme a o aumento do resíduo de vidro. Segundo Li et al (2020), que estudou a incorporação de resíduo de vidro na produção

de agregados sintéticos leves que mostra que essa diminuição pode estar atrelada ao aparecimento da formação da fase vítrea.

A tabela 13, expõe as propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos de argila e resíduo de caulim sinterizados a 1100°C.

Tabela 13- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduos de caulim sinterizados a 1100°C.

Composição	P.A(%)	A.A (%)	MEA (g/cm³)
90%ARG- 10%RC	16,83(±0,390)	8,49(±0,180)	2,38(±0,020)
70%ARG- 30%RC	22,62(±0,202)	12,26(±0,202)	2,38(±0,019)
50%ARG- 50%RC	33,29(±0,354)	20,02(±0,183)	2,18(±0,028)

Fonte: Autoria própria, (2025).

De acordo com Souza (2007), que investigou a produção de cerâmica branca, utilizando argila e resíduo de caulim. Avaliou que as propriedades cerâmicas estudadas diminuíram fortemente a medida que a quantidade de resíduo de caulim aumentava na composição, assim como as temperaturas.

A Tabela 14, mostra os agregados sintéticos produzidos com as três matérias-primas, sinterizados a 1100°C.

Tabela 14- Propriedades tecnológicas dos agregados sintéticos produzidos com as três matérias-primas sinterizados a 1100°C.

Composição	P.A (%)	A.A(%)	MEA(g/cm³)
90%ARG- 5%RC- 5% RV	38,47(±0,392)	29,21(±0,184)	2,38(±0,021)
70%ARG- 15%RC- 15% RV	37,56(±0,400)	29,21(±0,206)	2,34(±0,018)
50%ARG- 25%RC- 25% RV	36,56(±0,415)	28,39(±0,193)	2,32(±0,027)
40%ARG- 30%RC- 30% RV	34,15(±0,408)	27,14(±0,320)	2,27(±0,015)

Fonte: Autoria própria (2025).

Como observado na tabela as três médias das propriedades analisadas diminuem com o aumento dos teores de resíduo de caulim e vidro, empregados na produção dos agregados

sintéticos. Essa diminuição pode estar atrelada a uma melhor eficiência no processo de sinterização, haja vista que há um aumento na formação de gases no interior dos agregados sinterizados, na temperatura de 1100°C.

De acordo com Vilhena (2024), que investigou a produção de agregados sintéticos graúdos produzidos mediante a utilização de resíduo de bauxita, o autor relata em seu estudo que a taxa de absorção reflete o grau de sinterização, ou seja, quanto menor a taxa de absorção maior será o grau de sinterização.

Nascimento (2019), que analisou a influência do resíduo de vidro juntamente com o caulim na produção de cerâmicas. De acordo com o autor o aumento do teor de resíduo do vidro há uma diminuição dos valores de absorção de água, mediante a presença de sílica livre no estado de fusão o que é ocasionado pela elevação da temperatura, o que ocasiona um preenchimento dos espaços vazios entre o caulim e pó de vidro.

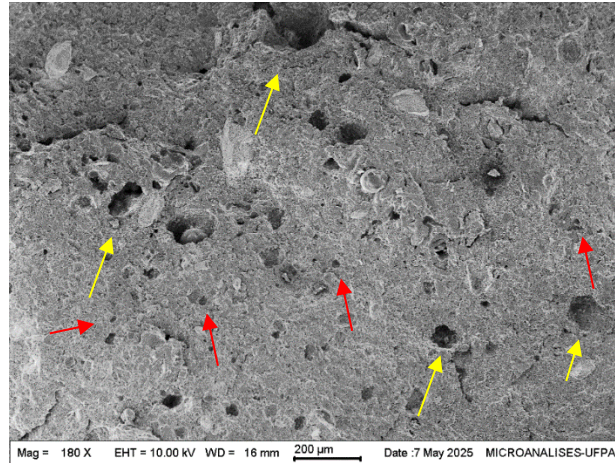
De acordo com Norton (1973), é relevante ter o entendimento desta propriedade, pois a mesma serve como excelsa medida para a medida do “grau de maturação ou desinterização” em função da temperatura de queima.

É relevante observar que à medida que o valor de resíduo de caulim se eleva na composição (RC) a porosidade aparente e absorção água aumentam na mesma faixa de temperatura. Além disso, observa-se que conforme aumenta a porcentagem do resíduo de caulim na massa cerâmica há uma diminuição na massa específica aparente (MEA), nas duas temperaturas estudadas. De acordo com Souza (2014) que estudou a produção de agregados sintéticos produzidos utilizando resíduos de bauxita (lama vermelha), a diminuição da massa específica, esta correlacionada com a produção de gases durante o processo de sinterização, o que resulta em uma maior fração de poros.

4.2.3. Caracterização Morfológica dos agregados

A figura 39 e 40, mostram as micrografias eletrônicas dos agregados sintetizados a 1100°C das composições de 70% de argila -30% resíduo de vidro e 70% de argila-30% de resíduo de caulim.

Figura 39- Agregados produzidos com argila e resíduo de vidro.

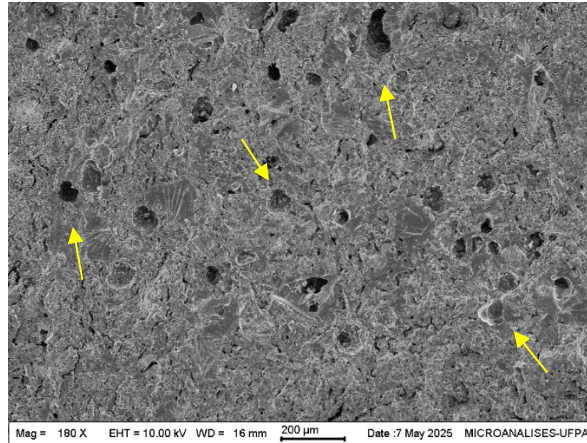


Fonte: Autoria própria, 2025.

De acordo com a figura 39, observa-se o aumento do tamanho dos poros dos agregados, que apresentam forma irregular (com formato não esférico), no entanto espalhados de forma homogênea ao longo da amostra. Além disso, pequenos poros (setas vermelhas) estão incrustados na matriz entre os poros maiores, o que evidencia a distribuição de tamanhos de poros não homogêneos. Ademais, a presença de poros é formada pela decomposição dos óxidos fundentes, que com elevação da temperatura ocorre a formação de CO_2 , a presença de poros na amostra diminui de forma significativa a massa específica aparente, haja vista que se encontra na amostra uma quantidade maior de espaços vazios. Segundo Campelo (2023) e Zaccaron et al (2019), que investigaram a influência do resíduo de vidro obtidos de garrafas de bebidas na produção de agregados sintéticos e peças cerâmicas, respectivamente, observaram que adição do resíduo de vidro(30%) aumenta de forma significativamente o tamanho e a quantidade de poros nos produtos, a presença dos poros é conseguida pela decomposição dos óxidos fundentes como o óxido de cálcio(CaO) e oxido de sódio (NaO_2), formando gases como o CO_2 .

A figura 40, mostra a micrografia dos agregados produzidos com argila e resíduo de caulim sinterizados a 1100°C .

Figura 40- Agregados produzidos com argila e resíduo de caulim.



Fonte: A autoria própria, 2025.

Visualiza-se, uma quantidade expressiva de poros formados distribuídos de forma homogênea pela amostra, a presença desses vazios contribui de forma negativa com a resistência mecânicas dos agregados, ademais a presença de poros pode estar ligada também ao colapso da estrutura cristalina (caulinita) para a metacaulinita (amorfa), assim como também a produção de gases que se formam durante o processo de sinterização. De acordo com Almeida et al (2021), que analisou a adição de resíduo do caulim na produção de peças cerâmicas, a formação de poros está fortemente ligada a decomposição dos óxidos fundentes (óxidos de sódio e magnésio), que contribuem de forma significativa para a produção de gases, como a liberação do CO_2 . A decomposição dos óxidos fundentes reage com a sílica e a alumina da fase vítrea, formando silicato e aluminossilicato de sódio.

5 CONCLUSÃO

Portanto, pode-se concluir que as matérias-primas utilizadas na produção dos agregados sintéticos, mediante as técnicas de caracterização: DRX, FTIR e MEV, estão de acordo com várias pesquisas e estudos já realizados.

As propriedades físicas dos agregados sintéticos sinterizados a 1100°C , demonstram que, conforme há elevação da porcentagem do resíduo de caulim, há o aumento da porosidade aparente e absorção de água, enquanto a massa específica tende a diminuir nas duas temperaturas analisadas.

Ademais, o ensaio de compressão realizados nos agregados sintéticos (pellets) demonstram que as amostras com 70%ARG-30%RV, apresentam maior resistência a

compressão, com média de 3,62 MPa, assim como também houve a diminuição da massa específica aparente abaixo de 2g/cm^3 dos agregados produzidos com resíduo de vidro com 30% e 70%, $1,94\text{g/cm}^3$ e $1,85\text{g/cm}^3$ respectivamente os classificando de acordo com a norma como agregados leves.

Ademais, mediante a microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos agregados sintéticos, observou-se a formação de poros nas duas amostras analisadas. Esta característica ocorre mediante a formação de CO_2 e outros gases formados durante o processo de sinterização.

6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados encontrados no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, se faz necessário as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Variação de temperaturas acima de 1100°C;
- Variação do tamanho das partículas e sua influência nas propriedades mecânicas;
- Analisar outras composições com os resíduos de caulim e resíduo de vidro;
- Analisar a incorporação dos agregados em corpos de provas de concretos.

REFERÊNCIAS

- Abdelli HE, Mokrani L, Kennouche S, de Aguiar JB. **Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review.** *Waste Management & Research.* 2020;38(11):1204-1213. doi:[10.1177/0734242X20941090](https://doi.org/10.1177/0734242X20941090)
- ABIVIDRO: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDUSTRIAIS DE VIDRO. *In: Resíduos de vidro.* [S. l.], 2023. Disponível em: <https://abividro.org.br/>. Acesso em: 27 dez. 2023.
- ADEKEYE, A. et al. Bioactivities, Biomedical and Pharmaceutical Applications of Raw and Functionalized Clay Minerals: A Review. *Biomedical Journal of Science & Technical Research*, n. 5, p. 23714–23722, 2020.
- AGUIAR, M.R.M.P; NOVAES, A.C; GUARINO, A.W.S. **Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos.** *Química Nova.* V. 25. nº. 25. p. 1145- 1154, 2002.
- ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. **Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal.** *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 2, p. 91–96, 2011.
- ANUPIYA, Salpadoru Tholkamudalige; SABERIAN, Mohammad; ZHU, Jiasheng; LI, Jae; ROYCHAND, Rajeev. Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade. *Case Studies in Construction Materials* , [s. l.], v. 17, 2022.
- ALMEIDA, E.P *et al.* A new eco-friendly mass formulation based on industrial mining residues for the manufacture of ceramic tiles. *Ceramics International*, [s. l.], v. 25, ed. 10, 2021.
- ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J. *Ciência e engenharia de materiais.* 3ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 648 p., 2014.
- ALVES, Hugo P.A *et al.* Preparation of mullite based ceramics from clay–kaolin waste mixtures. *Ceramics International*, [s. l.], ano 2016, v. 42, ed. 16, p. 19086-19090, 20.
- ALVES, Hugo Plínio de Andrade. *Utilização do delineamento de misturas de caulim, resíduo do caulim e alumina para obtenção de cerâmicas à base de mullita.* 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- AYATI, B., FERRÁNDIZ-MAS, V., NEWPORT, D., CHEESEMAN, C. **Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate.** *Construction and Building Materials* 162: 124–131, 2018.

ATYIA, M. M., MAHDY, M. G., ELRAHMAN, M. A. **Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks**. *Construction and Building Materials* 304: 124655, 2021.

AZERÊDO, Aline Figueirêdo Nóbrega de. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

BALDUINO, Ana Paula Zenóbia. **Estudo da Caracterização e composição de argilas de uso cosmético**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas À Saúde, Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016. Cap. 7.

BAUER, L.A., Falcão. *Materiais de Construção*. São Paulo: LTC, 2011. v.1, pp. 65-69;

BELIE, Nele De; SOUTSOS, Marios; GRUYAERT, Elke. **Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 25 Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-70606-1>

BEZERRA, Diego de Paiva. **PROPRIEDADES DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO RESÍDUO DE CAULIM**. 2023. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Engenharia Ambiental, [S. l.], 2023. Bing Rao, Huixin Dai, Likun Gao, Fei He, Ming Zhang, Fengrui Gan, Qingsong Zhang, Mei Liu, Zhaobo Yin, **A novel combined metallurgy-beneficiation method for the facile and low-cost comprehensive resource utilization of low-grade kaolin solid wastes**, *Journal of Environmental Management*, Volume 345, 2023, 118650, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118650>.

CAETANO, A.L.A *et al*. Obtenção de cerâmica de revestimento sustentável desenvolvida com resíduos industriais. **Revista Do Técnico Cerâmico Brasileiro**, [s. l.], v. 26, ed. 1, 2021.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. atual. [S. l.]: LTC, 2020. 880 p. v. 22. ISBN 9788521631033.

CAMPELO, Themistocles de Sousa. **EFEITO DA ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO E SiC PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE ARGILA NÃO EXPANSIVA**. Orientador: Prof. Dr: Saulo Rocha Bragança. 2023. 95 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Porto Alegre-Rs, 2023.

CHANDRA, S., BERNTSSON, L. **Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications**, p.2, 5, 25, 91-99. Noyes Publications, Norwich, Estados Unidos, 2002.

CHERATA, Iulian Dumitri. **Caracterização da caulinita da região do rio capim, Pará**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Rio Grande do Sul, 2016. f. 63.

Como São Feitas as Garrafas de Vidro-: e porque estão em falta no mercado. São Paulo: Portal g1, 17 maio 2024. Disponível em: bo.com/economia/noticia/2022/05/01/como-sao-feitas-as-garrafas-de-vidro-e-por-que-estao-em-falta-no-mercado-video.ghtml. Acesso em: 17 maio 2024.

DA SILVA, M.V *et al.* Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão. **REVISTA CERÂMICA**, Rio de Janeiro, ano 2014, v. 6, n. 1, ed. 12, p. 323-331, 2014
DHIBAR B.; SINGH S.V.; ANWAR S. *et al.* **Sugarcane Bagasse Reinforced Polyester Composites**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 05 Edição: 05 | Maio-2018.

DEL CASTILLO, JULIANA MANUELA NIEVA. **DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E PRODUÇÃO DE MATERIAIS A PARTIR DA RECICLAGEM**: Estudo de caso: Areia feita a partir de garrafas de vidro em Fernando de Noronha. Orientador: Profª Drª Louise Land Bittencourt Lomardo. 2021. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Arquitetura, Nitéroio- Rio de Janeiro, 2021.

DOYLE, A. M. *et al.* **Biodiesel production by esterification of oleic acid over zeolite Y prepared from kaolin**. Renewable Energy, v. 97, p. 19–23, 2016.

Eslam El-Seidy, Mehdi Chougan, Matteo Sambucci, Mazen J. Al-Kheetan, Ilario Biblioteca, Marco Valente, Seyed Hamidreza Ghaffar. **Lightweight alkali-activated materials and ordinary Portland cement composites using recycled polyvinyl chloride and waste glass aggregates to fully replace natural sand**, Construction and Building Materials, Volume 368,2023.

FERNANDEZ, B. Contamination of water resources by the bauxite/alumina operations in Jamaica. 2001.Água Bolívia. Disponível em: http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_verde/R111.htm. Acesso em: 20 de dezembro de 2023.

GOUGAZEH, M., BUHL, J.-Ch. Synthesis and characterization of zeolite A by hydrothermal transformation of natural Jordanian kaolin. Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Science, v. 15, pp. 35-42, 2014.

GOVERNO Federal institui o sistema de logística reversa para embalagens de vidro. [S. l.], 23 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/presidente-da-republica-institui-o-sistema-de-logistica-reversa-para-embalagens-de-vidro-1>. Acesso em: 23 dez. 2023

HILDEBRANDO, Edemarino Araujo. Aplicação do Rejeito do Processo Bayer (Lama Vermelha) como Matéria-Prima na Indústria Cerâmica Estrutural. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química.) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

Heriyanto, Farshid Pahlevani, Veena Sahajwalla, **From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass**, Journal of Cleaner Production, Volume 191, 2018, Pages 192-206, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>

Hong Lich Dinh, Jeung-Hwan Doh, Jiarui Liu, Limin Lu, Hwacheol Song, Dongcheon Park, **Comprehensive assessment of geopolymer concrete mechanical and environmental performance with glass cullet fine aggregates**, Journal of Building Engineering, Volume 76, pag 478- 494, 2023.

HONORATO, Fernanda Caroline Leite. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE CELULOSE EM COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Manaus, 2019.

JIAN ZHAO, WEI WANG, ZHAOLONG LUAN, MANCHAO HE, **First-principles analysis on phase transition, atomic, electronic, and mechanical properties of kaolinite under pressures**, Physica B: Condensed Matter, Volume 674, 415 554, ed. 5, pag 456- 473, 2023.

Jian-Xin Lu, Bao-Jian Zhan, Zhen-Hua Duan, Chi Sun Poon, **Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates**, Materials & Design, Volume 135, 2017, Pages 1021-111, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.016>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>

JUNIOR, Euler Santos Arruda; BARATA, Márcio Santos; CARVALHO, Elias Soares; SECCO, Pedro. **The use of red mud and kaolin waste in the production of a new building material: Pozzolanic pigment for colored concrete and mortar**. Revista Matéria, [s. l.], v. 27, ed. 3, 2022.

LEMOUGNA, Patrick N *et al.* Reuse of copper slag in high-strength building ceramics containing spodumene tailings as fluxing agent. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 42, ed. 155, 2020.

- LI, X., HE, C., LV, Y., JIAN, S., LIU, G., JIANG, W., JIANG, D. **Utilization of municipal sewage sludge and waste glass powder in production of lightweight aggregates.** *Construction and Building Materials* 256:119413, 2020.
- LI, X., HE, C., LV, Y., JIAN, S., JIANG, W., JIANG, D., WU, K., DAN, J. Effect of sintering temperature and dwelling time on the characteristics of lightweight aggregate produced from sewage sludge and waste glass powder. *Ceramics International* 47: 33435-33443, 2021a.
- LIU, Mingwei *et al.* Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. **Ceramics International**, [s. l.], v. 44, ed. 39, p. 4013-4019, 2018.
- LONGHI, Marlon A; RODRIGUEZ, Erich D; TORRES, Sandro M; BARATA, Marcio S; KALENDAVA, Alena *et al.* Applications of Clays in Nanocomposites and Ceramics. **Minerals**, [s. l.], v. 14, ed. 9, 2024.
- KIRCHHEIN, Ana P. Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, 2022.
- LORDELO, Rodrigo Seixas Dourado. Avaliação da utilização de resíduo de vidro de garrafas na produção de argamassa. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)- Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.
- LUZ, A. B. e DAMASCENO, E. C., 1993. **Caulim: Um mineral industrial importante.** *Tecnologia Mineral*, v. 65, Centro de Tecnologia Mineral.
- KHALID, M.Y.; RASHID A.A.; ARIF, Z.U. et al. **Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications**, *Results in Engineering*, Volume 11, 2021, 100263, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>.
- Kua Harn Wei, Wee Shing Teoh, Xiaozhen Xu, Beijia Huang, Yong Geng, **A review of glass recycling policies in Stockholm, Hong Kong SAR and Shanghai from a circular economy perspective**, *Journal of Cleaner Production*, 2023.
- Kuan-Wen Chen, Lung-Hao Hu, **The mechanical properties of ceramic matrix composite composed of polysilazane-derived silicon oxycarbonitride ceramic with nano alumina**, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 976, 2024, 173136, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173136>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838823044390>
- LUZ, A. B. e DAMASCENO, E. C., 1993. **Caulim: Um mineral industrial importante.** *Tecnologia Mineral*, v. 65, Centro de Tecnologia Mineral.

MINATTO, Flavia DAGOSTIM MINATTO. **COMPÓSITO CERÂMICO MULTICAMADA ALUMINA/LZSA: ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES DAS CAMADAS: ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES DAS CAMADAS.** Orientador: Prof. Dr: Oscar Rubem Klegues Montedo. 2015. 107 f. Dissertação (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Criciúma, 2015.

MIRANDA, Edgar Souza de. **Argila Caulinita do Norte do Brasil: caracterização e aplicação como adsorvente de compostos orgânicos (btx) e oxianions de cromo hexavalente.** 2014. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

MOHAMMED, T. U., RAHMAN, M. N., MAHMOOD, A. H., HASAN, T., APURBO, S. M. **Utilization of Steel Slag in Concrete as Coarse Aggregate. Sustainable Construction Materials and Technology,** Las Vegas, USA, August 7-11, 2016.

MOHAMMED, M. S., ELKADY, H., ABDEL- GAWWAD, H. A. **Utilization of construction and demolition waste and synthetic aggregates.** Journal of Building Engineering 43: 103207, 2021.

MORAES, Cristiane Gomes. **Desenvolvimento de processo de zeólita a utilizando o caulim da amazônia e aplicação na adsorção de Cu^{+2} .** 2014. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais- Proderna, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

NETO, Aziz Tebechrani. **Avaliação das propriedades mecânicas de uma mistura de material asfáltico fresado e vidro moído com a adição de cal de carbureto.** 2020. 209 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2020.

NEVILLE, A. M., Propriedades do concreto, São Paulo, Editora Pini Ltda, 1997. New York, n. 4, vol. 2, p. 252-267, 1992.

NIE, Q.; HU, W.; AI, A.; HUANG, B.; SHU, X.; HE, Q. Strength properties of geopolymers derived from original and desulfurized red mud cured at ambient temperature. Constr. Build. Mater. V. 125, p. 905–911, 2016.

NORTON, F. H. **Introdução a tecnologia cerâmica.** 1o ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1973.

OLIVEIRA, Alex de Nazaré de. **Síntese e caracterização de materiais catalíticos a partir de caulim flint e estudo comparativo do desempenho catalítico na esterificação do eugenol.** 2019. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

OLIVEIRA, Hebert Alves de. **Avaliação de argilas industriais formuladas com resíduo de vidro na produção de agregado sintético**. Orientador: Prof^ª Dr^ª Zélia Soares Macedo. 2017. 127 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Sergipe, 2017.

Oliveira et al. Avaliação do potencial de argilas de Sergipe e Alagoas na produção de agregados para uso em concreto. *Revista Materia*. V. 63. N .3, 2017.

SARDE, B.; PATIL, Y.; DHOLAKIYA, B.; PAWAR, V. Effect of calcined kaolin clay on mechanical and durability properties of pet waste-based polymer mortar composites. *Construction and Building Materials*, n. 318, 126027, 2022.

SALES, F.A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 161 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

Santis,B.C. Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade econômica da cerâmica vermelha do estado de São Paulo 2012. 132.Dissertação (Mestrado) da Instituto de Urbanismo e Arquitetura de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SCHACKOW, A. **Efeito das características pozolânicas de rejeitos de tijolos nas propriedades de argamassas**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

SIMINERAL. **Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará**. Disponível em: <https://www.simineral.org.br/mineracao>. Acesso em: 02 nov. 2023.

Sina Dadsetan, Hocine Siad, Mohamed Lachemi, Obaid Mahmoodi, Mustafa Sahmaran, **Optimization and characterization of geopolymers from ceramic waste, glass waste and sodium glass liquid**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 342,2022,130931,ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130931>.

SOEIRO, E. R. Caulim. Disponível em: WWW. anm.gov.br . Acesso em 02/02/2025.

SONG, Shufeng, WEN Zhaoyin, LIU, Yu, ZHANG, Qunxi, WU, Xiangwei, ZHANG, Jingchao, HAN, Jinduo. Influence of dopants on the crystallization of borosilicate glass. *Ceramics International* 35 p. 3037–3042, 2009.

SOUZA, José Antônio da Silva. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil.** Orientador: Prof. Dr João Nazareno Nonato Quaresma. 2010. 166 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Amazonia, Belém, 2010.

SOUZA, J. A. S.; MACÊDO E. N.; QUARESMA, J. N. N. Reciclagem de Lama Vermelha como Matéria-prima para a Indústria de Cerâmica Vermelha. In: RELATÓRIO TÉCNICO, CONVÊNIO UFPA/ALUNORTE. 2006.

SOUZA, Pedro Henrique Rodrigues de. et al. Utilização da lama vermelha para produção de agregado sintético. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. v. 06, n.3 p. 30-43, mar. 2019.

SCHEUERMANN FILHO, H.C. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto.** 2019. 197 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SIEBEN, PRISCILA GRITTEN S. **ARGILOMINERAIS NEUTROS NA ESTABILIZAÇÃO DE EMULSÕES DE PICKERING.** Orientador: Prof. Dr. Rilton Alves de Freitas. 2024. 122 p. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas) - Programa de Pós Graduação em Ciências Farmacêuticas, [S. l.], 2024.

PEIXOTO, Viviane Zório. **A UTILIZAÇÃO DO VIDRO MOÍDO COMO AGREGADO MIÚDO EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.** Orientador: Prof. Dr: Além-Mar Bernardes Gonçalves. 2023. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Campo Grosso/MS, 2023.

PINHEIRO, Darllan do Rosario. **Rejeito de caulim e caulim estéril amazônicos como fontes de si e al na obtenção de sopo-34: síntese, otimização, influência de impurezas e aplicação em adsorção de corante.** 2021. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais- Proderna, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

PIOVESAN, Jayne Carlos. **Influencia da mineralogia de fileres carbonaticos na hidratação de cimentos ternarios com argila calcinadas oriundos da regio amazonica.** Orientador: Professora Dra. Marlova Piva Kulakowski. 2022. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Cívil, Sao Leopoldo-Rs, 2022.

PINHEIRO, A.; COELHO, D.; SANTOS, J.; ROCHA JUNIOR, C.A.; SOUSA, J.A. **Síntese de material zeolítico a partir de caulim duro ou Flint: Adsorção de vapor d'água.** 56º congresso brasileiro de química. Belém-pa, novembro de 2016.

Piyanan Boonphayak, Sirikarn Khansumled, Chokchai Yatongchai, **Synthesis of CaO-SiO₂ catalyst from lime mud and kaolin residue for biodiesel production**, Materials Letters, Volume 283, 2021,128759, ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128759>.

PIRES, Maikon Moreira de. **Influência do Grau de Desidroxilação na Reatividade de Argilas Cauliniticas Calcinadas**. Orientador: Professora Dra. Marlova Piva Kulakowski. 2023. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação Em Engenharia Cívil, São Leopoldo-Rs, 2023.

PREZA, Carmen Raiza Aires Soares. **Síntese e caracterização de geopolímeros, a partir de argila, caulim ferruginoso e cinzas volantes - classe c**. 2021. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

RANIERI, Marcos Gonçalves de Almeida. **Caracterização tecnologica das argilas da cidade de cunha para fins de cerâmica artistica**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Guaretingueta, Universidade Estadual de São Paulo, Guaretingueta, 2007.

RASHAD, A. M. **A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate**. Journal of Building Engineering 25: 100802, 2019.

ROCHA JUNIOR, C. A. F. **Desenvolvimento de processo para obtenção de zeólita do tipo faujasita a partir de caulim de enchimento utilizado em papel, caulim duro e tube press: aplicação como adsorvente**. 2015. 142p. Tese de doutorado (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

ROCHA JUNIOR, C. A. F., ANGÉLICA, R. S., NEVES, R. F., **Síntese de zeólita do tipo faujasita: comparação entre caulim beneficiado e caulim flint**. Revista Cerâmica 61 (2015) 259-268.

Rossignolo, J.A . Concreto leve estrutural: Influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta-agregado. **Ambiente Construido**. V. 9, pp. 129-127, 2009.

Ruixue Wang, Zijing Zhang, Xinghua Chen, Lu Zhan, Zhenming Xu, **Research on compound pollution characteristics and health risk evaluation of particulatematter and heavy metals in waste glass recycling process**, Environmental Pollution, Volume337, 2023.

Sébastien Dhers, Arnaud Müller, Rebecca Guggenberger, Dominik Freimut, Kai Weldert, Bernhard Sachsenhauser, Vadzim Yermakou, Nikola Mikanovic, Peter Schwesig, **On the relationship between superplasticizer demand and specific surface area of calcined clays in LC3 systems**, Construction and Building Materials, Volume 411,pag 103-115. 2023.

- SPECHT, L.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; SOARES, J.B. **Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes**. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 648-658, 2017.
- ULLAH, I.; WASIF, M.; TUFAIL, M. et al. **Experimental Investigation of Cutting Parameters Effects on the Surface Roughness and Tools Wear during the Drilling of Fiber Reinforced Composite Materials**. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, [S.l.], v. 38, n. 3, p. 717-728, July 2019. ISSN 2413-7219.
- VAZZOLER, Fabrícia dos Santos D'Agostini. **Preparação e caracterização de argilas organofílicas e sua aplicação na adsorção de atrazina em água**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Pós-Graduação em Química do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- WASHINGTON Recycling Development Centre.2021. Disponível em: https://www.ezview.wa.gov/Portals/_1962/Documents/rdcab/GlassPaper-DraftOct2021.docx. Acesso em: 27 dez. 2023
- YAHYA JANI, WILLIAM HOGLAND, **Waste glass in the production of cement and concrete – A review**, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 2, ed 3, Pages1767-1775, 2014.
- YLINIEMI, J., NUGTEREN, H., ILLIKAINEN, M., TIAINEN, M., WESTSTRATE, R., NIINIMÄKI, J. **Lightweight aggregates produced by granulation of peat-wood fly ash with alkali activator**. *International Journal of Mineral Processing* 149: 42–49, 2016.
- YOUNUS ALI, M.M., NEWMAN, G., ARULRAJAH, A., DISFANI, M.M. **Application of recycled glass-crushed rock blends in road pavements**. *Geomechanics* v. 46(1), p. 113-122, 2011.
- ZACARRON, Alexandre *et al.* Efeito da adição do residuo de vidro em massa de cerâmica de alvenaria. **Revista Materia**, [s. l.], v. 24, ed. 04, 2019
- ZIEJEWSKA, C.; Grela, A.; Hebda, M. Influência do tamanho de partículas de vidro residual nas propriedades físico-mecânicas e na porosidade de compósitos de geopolímeros espumados baseados em cinzas volantes de carvão. *Materials* 2023, 16,2044. <https://doi.org/10.3390/ma16052044>.
- ZUNINO, Franco; SCRIVENER, Karen. Reactivity of kaolinitic clays calcined in the 650 °C–1050 °C temperature range: Towards a robust assessment of overcalcination. **Cement and Concrete Composites** , [s. l.], v. 146, 2024.

