

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

EMILY SAVIATTO

**MINERAIS SUBUTILIZADOS COMO ALTERNATIVAS
SUSTENTÁVEIS NO ABASTECIMENTO DO SETOR DE
CERÂMICA VERMELHA COMO ESTRATÉGIA A ECONOMIA
CIRCULAR**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais -
PPGCEM da Universidade do
Extremo Sul Catarinense - UNESC,
como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano
Raupp Pereira

Co-Orientador: Dr. Alexandre
Zaccaron

**CRICIÚMA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S267m Saviatto, Emily.

Minerais subutilizados como alternativas sustentáveis no abastecimento do setor de cerâmica vermelha como estratégia a economia circular / Emily Saviatto. - 2025.

117 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2025.

Orientação: Fabiano Raupp Pereira.

Coorientação: Alexandre Zaccaron.

1. Cerâmica vermelha. 2. Economia circular. 3. Minerais de argila. 4. Valorização do resíduo. 5. Argila. I. Título.

CDD 23. ed. 620.135

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Emily Saviatto

Minerais subutilizados como alternativas sustentáveis no abastecimento do setor de cerâmica vermelha como estratégia à economia circular.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 24 de fevereiro de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



ADRIANO MICHAEL BERNARDIN

Data: 23/05/2025 09:03:44-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



SERGIO LUCIANO GALATTO

Data: 31/05/2025 07:50:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sérgio Luciano Galatto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



MARCIO LUIZ GEREMIAS

Data: 28/05/2025 10:36:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Márcio Luiz Geremias

Centro Universitário SATC (UniSATC)

Aos que, com gestos simples ou grandes ações, me ajudaram a trilhar o caminho do conhecimento e superar cada desafio desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a DEUS, por me dar força, saúde e sabedoria durante toda esta trajetória. Sou grata por cada dia de aprendizado e por cada desafio superado. A Ele, toda a honra por esta conquista.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, meu eterno agradecimento. Ao meu pai, que me ensinou a importância do estudo e do trabalho árduo, e a todos os familiares que, com gestos de carinho e palavras de incentivo me ajudaram.

Ao meu namorado, agradeço por seu apoio constante, por estar ao meu lado em cada momento, oferecendo-me amor, paciência e encorajamento. Obrigada por acreditar em mim.

Ao meu orientador, minha sincera gratidão por sua orientação, dedicação e confiança. Sua sabedoria e disponibilidade foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho

Ao meu coorientador, meu agradecimento pela confiança, pelas sugestões pertinentes e pela disponibilidade em colaborar em todas as fases deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para o sucesso desta dissertação.

Aos professores Michele Dondi do *CNR-ISSMC Istituto di Scienza, Tecnologia e Sostenibilità per lo sviluppo dei Materiali Ceramici* e Manuel Ribeiro do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, por todo suporte durante a pesquisa. Também aos professores da banca, meu grandioso agradecimento pelo aceite e contribuições.

Agradeço ao CNPq pela oportunidade dada para que eu pudesse realizar este estudo (processo n. 380935/2023-6).

Estendo, ainda, meus agradecimentos ao APL de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, a todos os membros do SINDICER e da COOPEMI pela generosa disponibilização de matérias-primas e pelo suporte prestado ao longo desta jornada. Também às indústrias cerâmicas da região, cujo o apoio foi fundamental para a realização deste trabalho.

E por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, participaram dessa etapa da minha vida, deixo aqui meu muito obrigado. Esta conquista é, de alguma forma, reflexo de tudo o que aprendi e vivi ao lado de vocês.

“A grandeza não é onde estamos,
mas em que direção estamos indo.”

Oliver Wendell Holmes

RESUMO

O setor de cerâmica vermelha é estratégico para a economia e a construção civil do Brasil, mas enfrenta desafios ambientais devido à mineração de argila e à geração de resíduos minerais. Na região sul de Santa Catarina, onde a mineração é intensa, o setor cerâmico do APL-CVMF tem grande potencial para valorizar fontes alternativas, como argilas subutilizadas e resíduos da mineração de carvão e saibro granítico (rochas quartzo-feldspáticas), promovendo a circularidade mineral e reduzindo impactos ambientais. Para avaliar essa viabilidade, foi realizado um diagnóstico mineral, analisando 15 massas de indústrias cerâmicas. Em paralelo, buscou-se possíveis materiais alternativos do setor mineral para compor o estudo de valorização sendo 10 argilas não utilizadas pelo setor, além de 5 resíduos provenientes da mineração de carvão e de saibro na região. Os resultados mostraram que os minerais subutilizados apresentam características intrínsecas, como elevados teores de minerais não argilosos (silte e areia), baixa plasticidade, presença em demasia de óxidos que dificultam o processo cerâmico, entretanto, uma avaliação mais aprofundada aponta que quando introduzidos em teores moderados, podendo ser benéficos ao processamento. O diagnóstico permitiu desenvolver um perfil qualitativo da indústria cerâmica. A pesquisa focou na caracterização das massas utilizadas na fabricação de blocos, telhas e tijolos, analisando parâmetros como teor de resíduo bruto, distribuição granulométrica, plasticidade e composição química. Observou-se que o ensaio de resíduo bruto pode-se traçar um limite (~9% a ~23%) aceitável da região, para utilizar como base. O teor de ferro que é determinante na coloração das peças ficou <3% nas massas de telhas e tijolos brancos e >3% para as massas de blocos e telhas vermelhas. Por fim a plasticidade que influenciam diretamente na qualidade do produto obteve-se as massas dentro dos limites da zona de extrusão (LP=15-35 e IP=10-35). Os minerais subutilizados apresentaram potencial de aproveitamento, desde que devidamente balanceados nas formulações, considerando suas propriedades físico-químicas, fomentando práticas de economia circular na mineração. O resíduo bruto variou de 1,3 a 75,82 % e apresentou majoritariamente baixa e média plasticidade (LL<50%). Quanto aos óxidos, destaca-se teores de Fe_2O_3 (<2% e >10%) e óxidos fundentes (K_2O , Na_2O , CaO e MgO) em teores de 6 a 10% nos resíduos de saibro.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha, economia circular, valorização de resíduos, argilas.

ABSTRACT

The clay ceramics sector plays a strategic role in the economy and civil construction of Brazil but faces environmental challenges due to clay mining and the generation of mineral waste. In the southern region of Santa Catarina, where mining activities are intense, the ceramic sector of the *Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça* (APL-CVMF) has great potential to valorize alternative sources, such as underutilized clays and waste from coal and granitic marl mining (quartz-feldspathic rocks), promoting mineral circularity and reducing environmental impacts. To assess this feasibility, a mineral diagnosis was conducted, analyzing 15 ceramic industry mixtures. In parallel, potential alternative materials from the mineral sector were sought to be included in the valorization study, involving 10 clays not used by the ceramic industries, along with 5 residues from coal and granitic marl mining in the region. The results showed that the underutilized minerals exhibit intrinsic characteristics, such as high levels of non-clay minerals (silt and sand), low plasticity, and excessive oxides that hinder the ceramic process. However, a more in-depth evaluation indicates that when introduced in moderate amounts, they can be beneficial to processing. The diagnosis allowed the development of a qualitative profile of the ceramic industry. The research focused on the characterization of the mixtures used in the production of red blocks and tiles, as well as white/mixed ceramic products, analyzing parameters such as coarse particle content, particle size distribution, plasticity, and chemical composition. It was observed that the coarse particle test can outline an acceptable limit (~9% to ~23%) in the region to use as a basis. The iron oxide content, which is a determining factor in the color of the pieces, was <3% in white brick and roof tile pastes and >3% in red block and roof tile pastes. Finally, plasticity, which directly influences product quality, showed mixtures within the extrusion zone limits (PL=15-35 and PI=10-35). The underutilized minerals demonstrated potential for use, as long as they are properly balanced in formulations, considering their physical-chemical properties, fostering circular economy practices in mining. The coarse particle ranged from 1.3% to 75.82% and predominantly showed low to medium plasticity (LL<50%). As for the oxides, notable levels of Fe₂O₃ (<2% and >10%) and flux oxides (K₂O, Na₂O, CaO, and MgO) were found in levels of 6 to 10% in the granitic marl mining wastes.

Keywords: Clay ceramic, circular economy, waste recovery, clay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da localização do APL de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça, na região sul de Santa Catarina, Brasil.	31
Figura 2 - Representação do triângulo de textura de solo usado pelo <i>USDA</i> (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) e estabelecido com base nos teores de areia, silte e argila.	34
Figura 3 - Tipos básicos de estrutura dos solos: (A) granular, (B) em bloco, (C) prismático e (D) lamelar.	35
Figura 4 - Diagrama triaxial de <i>Winkler</i> para classificação tecnológica de diferentes tipologias de cerâmicas estruturais de argila.	36
Figura 5 - Fluxograma de beneficiamento do carvão.	40
Figura 6 - Fluxograma de segregação e beneficiamento do saibro.	41
Figura 7 - Fluxograma do processo de beneficiamento do saibro para obtenção do feldspato.	42
Figura 8 - Ilustração da Economia Circular com as suas diferentes componentes numa perspectiva de substituição/uso de materiais.	44
Figura 9 - Representação da sistemática CPQvA para a valorização de resíduos.	47
Figura 10 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no presente estudo.	49
Figura 11 - Localização das indústrias do polo cerâmico de Morro da Fumaça dentro do APL-CVMF.	51
Figura 12 - Localização das indústrias escolhidas dentro do APL-CVMF, para realização diagnóstico de referência mineral.	52
Figura 13 - Mapa geológico do polo cerâmico de Morro da Fumaça inserido no APL-CVMF.	53
Figura 14 - Localização das fontes primárias e secundárias existentes no polo cerâmico de Morro da Fumaça dentro do APL-CVMF.	54
Figura 15 - Gráfico com a indicação do teor de umidade das massas cerâmicas utilizadas pelo APL-CVMF.	61
Figura 16 - Gráfico das propriedades plásticas das massas cerâmicas de referência mineral.	64
Figura 17 - Gráfico com a distribuição de partículas dos resíduos brutos das massas cerâmicas de referência mineral.	66
Figura 18 - Diagrama de <i>Winkler</i> das massas cerâmicas de referência mineral.	67
Figura 19 - Ternário da composição química das massas cerâmicas de referência mineral.	70

Figura 20 - Difractogramas de raios-X das massas de blocos vermelhos.	71
Figura 21 - Difractogramas de raios-X das massas de telhas vermelhas.	72
Figura 22 - Difractogramas de raios-X das massas de produtos branco/mesclado.	72
Figura 23 - Correlação entre índice de plasticidade e limite líquido dos minerais subutilizado estudados.	75
Figura 24 - Distribuição do resíduo bruto (R.B.) dos minerais subutilizado estudados.	77
Figura 25 - Distribuição das fontes minerais subutilizadas primárias e secundárias no diagrama ternário das proporções de argila-silte-areia.	78
Figura 26 - Gráfico com a representação do resíduo bruto para os minerais subutilizados.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores obtidos para limite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidade (IP), para as massas estudadas.....	63
Tabela 2 - Valores obtidos de resíduo bruto (R.B.), e a distribuição do tamanho de partículas das frações >44µm das massas estudadas.....	65
Tabela 3 - Frações cumulativas (10%, 20%, 50%, 90%) das massas cerâmicas de referência mineral.....	68
Tabela 4 - FRX das massas cerâmicas de referência mineral.....	70
Tabela 5 - Teor de umidade <i>in natura</i> (U%) das fontes minerais subutilizadas (A) primárias e (R) secundárias	73
Tabela 6 - Valores obtidos para limite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidade (IP), para os minerais subutilizados estudados.....	75
Tabela 7 - Valores obtidos de resíduo bruto (R.B.), e a distribuição do tamanho de partículas das frações >44µm das fontes primárias e secundárias estudadas.....	77
Tabela 8 - Frações cumulativas (10%, 20%, 50%, 90%) das fontes minerais subutilizadas primárias e secundárias.....	79
Tabela 9 - FRX das amostras de fontes primárias (A) e fontes secundárias (R).	80
Tabela 10 - Análise de sais solúveis das amostras de fontes primárias (A) e fontes secundárias (R).	82
Tabela 11 - Mineralogia das fontes primárias (A) e fontes secundárias (R).	84
Tabela 12 - Análise de corrosividade dos minerais subutilizados secundários (resíduos).....	85
Tabela 13 - Análise de reatividade dos minerais subutilizados secundários (resíduos).	86
Tabela 14 - Resultados da lixiviação dos minerais subutilizados secundários (resíduos).....	86
Tabela 15 - Resultados da solubilização dos minerais subutilizados secundários (resíduos).....	87
Tabela 16 - Características de plasticidade, resíduo bruto, mineralógica e teor de ferro dos minerais subutilizados.....	88
Tabela 17 - Distribuição dos minerais subutilizados por produtos.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida;
aC	antes de Cristo;
ACerS	<i>American Ceramic Society</i> ;
AMREC	Associação dos Municípios da Região Carbonífera;
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica;
ANM	Agência Nacional de Mineração;
APL	Arranjos Produtivos Locais;
APL-CVMF	Arranjo Produtivo Local Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça;
art.	artigo;
CE	Carvão energético;
CECAM	Centro de Caracterização de Materiais;
CerTec	Laboratório de Cerâmica Técnica;
CNI	Confederação Nacional da Indústria;
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;
CNR	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i> ;
COOPEMI	Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga;
CPQvA	Classificação, potencialidade, quantidade, viabilidade e aplicabilidade;
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;
CRC	Centro de Revestimentos Cerâmicos;
DRX	Difratômetro de raios X;
DTP	Distribuição do tamanho de partículas;
FIESC	Federação das Indústrias de Santa Catarina;
FRX	Fluorescência de raios X;
ha	hectare;
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração;
Idt	Instituto de Engenharia e Tecnologia;
IEL	Instituto Euvaldo Lodi;
IFPI	Instituto Federal do Piauí;
IGEO	Instituto de Geociências;

ILO	<i>International Labour Organization;</i>
IoT	<i>Internet of Things;</i>
IP	Índice de Plasticidade;
iParque	Parque Científico e Tecnológico;
IPVC	Instituto Politécnico de Viana do Castelo;
ISSMC	<i>Istituto di Scienza, Tecnologia e Sostenibilità per lo sviluppo dei Materiali Ceramici;</i>
LabCer	Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha;
LDMC	Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais;
LL	Limite líquido;
LP	Limite plástico;
L.Q.	Limite de Quantificação;
MF	Morro da Fumaça;
NBR	Norma técnica brasileira;
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável;
P.F.	Perda ao Fogo;
PIB	Produto Interno Bruto;
R.B.	Resíduo Bruto;
ROM	<i>Run-of-Mine;</i>
SC	Santa Catarina;
SEBRAE	Serviço de Apoio à Micro e Pequenas Empresas;
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial;
SESI	Serviço Social da Indústria;
SINDICER	Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça;
Ton.	Tonelada;
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense;
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency;</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture.</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA.....	26
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral.....	27
1.2.2	Objetivos específicos	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
2.1	CERÂMICA VERMELHA NO BRASIL.....	29
2.1.1	Cerâmica vermelha em Santa Catarina	29
2.1.2	Arranjo Produtivo Local (APL) Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça	30
2.2	MATÉRIAS PRIMAS ARGILOSAS	32
2.2.1	Caracterização dos materiais argilosos	33
2.2.2	Caracterização granulométrica	35
2.2.3	Propriedade plástica das argilas	36
2.3	SETOR DA MINERAÇÃO	37
2.3.1	Mineração de carvão.....	39
2.3.2	Mineração de saibro.....	40
2.4	ECONOMIA CIRCULAR	43
2.4.1	Mineração circular.....	45
2.4.2	Simbiose industrial.....	45
2.4.3	Crítérios de valorização	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	DIAGNÓSTICO DE REFERÊNCIA MINERAL	50
3.1.1	Levantamento de indústrias do APL-CVMF.....	50
3.2	FONTES MINERAIS SUBUTILIZADAS	52
3.3	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	55
3.3.1	Umidade	55
3.3.2	Plasticidade	56
3.3.3	Resíduo bruto	57
3.3.4	Distribuição do tamanho de partículas	58
3.3.5	Análise química	58
3.3.6	Análise mineralógica.....	59
3.3.7	Obtenção dos sais solúveis.....	59
3.3.8	Classificação das fontes minerais secundárias.....	59
4	RESULTADOS.....	61
4.1	DIAGNÓSTICO DE REFERÊNCIA MINERAL	61
4.1.1	Umidade	61
4.1.2	Plasticidade	62
4.1.3	Resíduo bruto	64

4.1.4	Distribuição do tamanho de partículas	66
4.1.5	Análise química	69
4.1.6	Análise mineralógica.....	71
4.2	FONTES MINERAIS SUBUTILIZADAS.....	73
4.2.1	Umidade.....	73
4.2.2	Plasticidade.....	74
4.2.3	Resíduo bruto	76
4.2.4	Distribuição do tamanho de partículas	78
4.2.5	Análise química	80
4.2.6	Sais solúveis	81
4.2.7	Análise mineralógica.....	84
4.2.8	Classificação	85
4.3	APLICABILIDADE DOS MINERAIS SUBUTILIZADOS	87
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	91
6	CONCLUSÃO.....	95
	TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

O setor de cerâmica vermelha do Brasil possui uma posição de significativa importância na economia nacional, desempenhando um papel estratégico na construção civil e na infraestrutura, onde aproximadamente 90% das construções do país são construídas com cerâmica vermelha. Com base em dados da Associação Nacional de Cerâmica Vermelha (ANICER, 2020), o Brasil possui 5.437 unidades produtivas pulverizadas por todo território nacional, sendo as regiões sul e sudeste as mais representativas, e com um faturamento anual de 18 bilhões de reais, representando 4,8% da indústria da construção civil e gerando em torno de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos, o setor se apresenta com grande importância a economia nacional.

Ainda de acordo com a entidade (ANICER, 2020), a produção média de elementos cerâmicos (blocos e telhas) é de aproximadamente 5,3 bilhões de peças/mês, e o consumo de argila gira em torno de 10,3 milhões de ton./mês, sendo a sua geolocalização um fator predominante à concentração de unidades produtivas cerâmicas (Marciano Motta *et al.*, 2004, Cabral Junior *et al.*, 2006).

A crescente demanda da construção civil e, conseqüentemente, de elementos cerâmicos estão associados a necessidade de matérias-primas brutas de fonte mineral, com isso, segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2020a), posicionando as argilas entre os minerais com maior número de requerimentos para pesquisa e extração nos últimos anos. Com isso, ressalta-se a importância do abastecimento do setor cerâmico e da construção civil por meio de estudos relacionados a investigação de novas áreas para mineração de argila, tanto no Brasil (Almeida, Soares e Matos, 2020; Assunção *et al.*, 2021; Pinto *et al.*, 2021; Racanelli *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2019; Silva, De e Perera, 2018; Silva e Pereira, 2021; Zaccaron *et al.*, 2020), quanto em outros países ao redor do mundo (Arianpour e Arianpour, 2022; Baghdad *et al.*, 2019; Bomeni *et al.*, 2018; Boukili *et al.*, 2021; Diko-Makia e Ligege, 2020; Dill, 2020; Milošević, Logar e Djordjević, 2020; Monatshebe, Mulaba-Bafubandi e Kasongo Nyembwe, 2019; Nkalih Mefire *et al.*, 2018; Nzeukou Nzeugang *et al.*, 2021; Onana *et al.*, 2019; Salah, Ben *et al.*, 2018; Semiz e Çelik, 2020).

A indústria cerâmica tem capacidade de absorver uma série de materiais alternativos no seu processo, devido ao grande volume envolvido e a possibilidade de interação técnica (Menezes, Neves e Ferreira, 2002). A utilização de resíduos como parte integradora da massa de cerâmica vermelha, faz com que o setor auxilie no desenvolvimento

sustentável, minimizando o consumo de matéria prima bruta e promovendo a circularidade mineral (Ncube *et al.*, 2021).

Portanto, em paralelo à pesquisas de novas jazidas de argilas para abastecimento do setor cerâmico, estudos de valorização de diferentes resíduos em massa cerâmica vêm sendo realizados ao redor do mundo, como do vidro (Andreola *et al.*, 2016; Bohn *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2021; Zaccaron *et al.*, 2019, 2022), resíduos industriais (Fiala *et al.*, 2020; Hafez, Tayeh e Abd- Al Ftah, 2022; Hao *et al.*, 2022; Medeiros *et al.*, 2019; Mymrin *et al.*, 2014; Wiemes, Pawlowsky e Mymrin, 2017), da agroindústria (Andreola *et al.*, 2018; Benedet *et al.*, 2023; Eliche-Quesada *et al.*, 2017; Kazmi, Syed Minhaj Saleem *et al.*, 2016; Kazmi, Syed M.S. *et al.*, 2016; Maza-Ignacio *et al.*, 2020; Salleh *et al.*, 2021; Silva, De e Perera, 2018) e aqueles originários da mineração (Khudyakova, Voiloshnikov e Kotova, 2018; Mendes *et al.*, 2019; Nweke e Omeokachie, 2023; Sartor *et al.*, 2018).

O setor minerário brasileiro desempenha um papel de protagonismo na economia nacional, contribuindo expressivamente na geração de empregos e para a balança comercial. Em 2020, segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2020), o setor mineral representou cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e gerou mais de 2,2 milhões de empregos diretos e indiretos. Em contrapartida, o setor minerário está associado a grandes impactos ambientais, que as mineradoras procuram mitigar nos dias atuais (Dong *et al.*, 2019; Howe, Johnston e Côte, 2023).

O setor mineral cerâmico brasileiro evoluiu de forma lenta, fato este que pode ser atribuído, principalmente, ao tamanho das empresas, sendo em sua maioria micro e pequenas, e também à gestão de natureza familiar (Prado e Bressiani, 2013). Embora a mineração de argila não figure entre as atividades de maior impacto (Farjana *et al.*, 2019), torna-se essencial reconhecer que, se processada de maneira inadequada, pode acarretar em passivos ambientais significativos. Isso se fundamenta, sobretudo, na implementação de medidas restritivas de revegetação, com ênfase na mitigação dos impactos visuais e outros associados à potencial poluição do solo, bem como à contaminação das águas superficiais e subterrâneas, resultantes da exposição dessas áreas (Mechi e Sanches, 2010).

A mineração de argila para abastecimento da indústria de cerâmica vermelha está associada ao baixo conhecimento técnico das matérias-primas argilosas, fazendo com que o industrial ceramista elabore uma exploração caracterizada pela avaliação empírica, frequentemente guiada pela textura dos minerais (Aguiar, de *et al.*, 2022). Este procedimento

frequentemente resulta no abandono de bolsões de minerais considerados menos nobres, constituídos por materiais argilosos com propriedades menos atraentes, mesmo quando localizados na mesma área. O emprego deste método para a exploração de recursos minerais induz a uma problemática adicional, conhecida como "lavra ambiciosa" (Rebello e Zaccaron, 2020), a qual acarreta impactos ambientais adversos.

O art. 48, do Código de Mineração - Decreto nº 227/67 (Brasil, 1967) define lavra ambiciosa como aquela realizada sem observar o plano preestabelecido ou a que possa impossibilitar o aproveitamento posterior da jazida. Na atividade de mineração de argila, a prática de lavra ambiciosa pode resultar na disposição de significativos volumes de material argiloso, levando ao abandono das áreas mineradas e à interrupção do progresso nas ações de recuperação ambiental. Subsequentemente, para suprir as demandas do setor cerâmico, torna-se imperativo o processo de prospecção de novas áreas. Portanto, o melhor aproveitamento das matérias-primas propicia uma extensão da vida útil da jazida, retardando a necessidade de identificação e exploração de novas áreas de argila (Saviatto *et al.*, 2023).

A região do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-CVMF), no sul de Santa Catarina, é um importante polo de cerâmica vermelha, respondendo por 2,5% da produção nacional (Zaccaron *et al.*, 2020); entretanto, o abandono de áreas após a mineração de argila é uma preocupação na região (Rebello e Zaccaron, 2020). Segundo dados da Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga (COOPEMI), aproximadamente 120 ha de áreas licenciadas estão atualmente subutilizadas devido a dois fatores: i) suas características intrínsecas, como baixa trabalhabilidade e alta concentração de sílica, e ii) falta de conhecimento sobre as propriedades dessas matérias-primas, o que exige um investimento significativo em pesquisa (Saviatto *et al.*, 2023).

Nessa mesma região, o setor carbonífero tem um papel socioeconômico preponderante, porém está relacionado a uma série de impactos ambientais (Oliveira, Heidemann e Lima, 2011). Os rejeitos de mineração de carvão, principalmente a fração rica em sulfetos, quando submetidos à ação ambiental, acidificam a drenagem e contaminam o solo e a água com metais pesados. Esses rejeitos podem ser divididos em três frações residuais: pirítica, argilosa e carbonácea. A valorização das diferentes frações tende a reduzir os impactos ambientais causados por esta atividade industrial (Acordi *et al.*, 2023; Oliveira, *et al.*, 2019).

Estima-se que na região carbonífera 309 mil ton/mês de resíduos são geradas resultante de cada etapa de processamento das minas, sendo

que somente em uma mineradora próxima as jazidas de argila que abastece a região do APL Cerâmica Vermelha da Morro da Fumaça, gera 6 mil ton/mês (Faraco, 2022). As frações residuais ricas em argilominerais oriundos da mineração de carvão podem ser fontes alternativas minerais para valorização em massa cerâmica, e proporcionar ganhos ambientais e tecnológicos (Vasić *et al.*, 2021). Com isso, esse material subutilizado, principalmente que se encontra próximo ao polo industrial, apresenta potencial para abastecimento do setor cerâmico (Acordi *et al.*, 2023).

A mineração de saibro (alteração incipiente do granito) também é muito representativa nessa região, e essa rocha quartzo-feldspática está associado a teores de potássio e sódio, elementos presentes nos feldspatos, cujo beneficiamento visa a concentração desse mineral (Sartor *et al.*, 2018). Esse processo de beneficiamento gera um resíduo, que devido sua origem mineral, pode ser fonte de aplicação na indústria cerâmica. Estima-se que 6 mil ton/mês desse resíduo seja gerado apenas no município de Morro da Fumaça, SC, e ainda há um passivo de 80 mil ton, e que pode ser uma fonte mineral alternativa na indústria cerâmica.

A Legislação Mineral através da Resolução ANM N° 85/2021 (ANM, 2021), dispõe sobre o aproveitamento de rejeitos e estéreis, os tratando como minério. Com base nisso, essa pesquisa visa criar uma rota de circularidade mineral, dentro do polo cerâmico do APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, caracterizando fontes alternativas minerais subutilizados, seja de áreas abandonadas da mineração de argila, ou de resíduos de origem mineral gerados na região que possam atender a demanda do setor cerâmico.

1.1 JUSTIFICATIVA

A atividade mineral exerce um papel fundamental na economia global, abastecendo uma variedade de setores industriais com matérias-primas essenciais, incluindo argilas para a indústria cerâmica. No entanto, a exploração de recursos naturais, muitas vezes, tem impactos significativos no meio ambiente, resultando em degradação do solo, poluição da água e em alguns casos nas emissões de gases de efeito estufa. Salienta-se também, que a extração de minerais virgens é um processo intensivo em termos de energia, contribuindo para a redução de recursos naturais finitos.

Nesse contexto, a economia circular na mineração emerge como uma abordagem crítica para atender às crescentes demandas por recursos naturais, ao mesmo tempo em que reduz os impactos ambientais e

promove a sustentabilidade. A reutilização, reciclagem e valorização de resíduos da mineração podem criar oportunidades significativas por meio de uma gestão mais eficiente dos recursos de uma determinada região.

E no abrigo do desenvolvimento de atividades sustentáveis de mineração a região do APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça enfrenta desafios específicos relacionados à gestão de recursos minerais na busca por fontes alternativas estratégicas para o abastecimento do setor produtivo cerâmico por meio de ações de circularidade mineral.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Identificar fontes minerais alternativas na região do APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, como matérias-primas para a fabricação de produtos cerâmicos com base em ações de circularidade mineral.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Diagnosticar as diferentes formulações cerâmicas da região do APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça para estabelecer indicadores minerais qualitativos utilizados pelo setor industrial local;
- b) Realizar caracterizações de fontes minerais subutilizadas de base primária (jazidas abandonadas) e de base secundária (resíduos), para avaliar a potencialidade de uso como matérias-primas do setor cerâmico local;
- c) Identificar os potenciais produtos cerâmicos do APL de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça nos quais essas fontes alternativas minerais podem ser utilizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Há mais de 10.000 anos a cerâmica evoluiu a partir da fabricação de objetos utilitários para materiais de construção como *adoquins*, tijolos e telhas (Bergaya, Lagaly e Beneke, 2006). As antigas civilizações indianas, babilônica, egípcia, mesopotâmica e romana utilizavam tijolos cozidos para construção (More, Tarade e Anant, 2014), onde sua resistência à compressão e às intempéries o popularizaram como um material amplamente utilizado em construções por milhares de anos (Al-Fakih *et al.*, 2019). Até hoje, os tijolos de barro queimados são largamente utilizados (Mohan, Satyanarayana e Rao, 2012), e a sua produção continua evoluindo significativamente (Wolf, Rosendahl e Knaack, 2022).

Na arquitetura contemporânea, tijolos e telhas cerâmicas são valorizados por sua versatilidade estética, sustentabilidade e eficiência térmica, sendo frequentemente utilizados para criar fachadas marcantes de forte apelo visual (Momcilovic-Petronijevic, Toplicic-Curcic e Curcic, 2018).

2.1 CERÂMICA VERMELHA NO BRASIL

A utilização de elementos cerâmicos para a construção de edifícios foi introduzida no Brasil durante o período colonial, especialmente com a chegada dos colonizadores portugueses. Os tijolos eram fabricados de forma artesanal, utilizando técnicas rudimentares. Com o crescimento das cidades e o aumento da urbanização, a produção de tijolos cerâmicos foi se tornando mais industrializada (Corrêa, 2012).

Com o passar dos anos, a produção de cerâmica vermelha no Brasil passou por mudanças significativas, especialmente com a industrialização. A produção em larga escala de tijolos, telhas e blocos se tornou uma parte fundamental da construção civil e da urbanização do país. No entanto, a produção artesanal de cerâmica vermelha também continua a ser praticada por ceramistas em todo o país, muitas vezes incorporando técnicas tradicionais e contemporâneas para criar peças únicas e expressivas (ANICER, 2019)

2.1.1 Cerâmica vermelha em Santa Catarina

A cerâmica vermelha em Santa Catarina, assim como em outras regiões do Brasil, desempenha um papel importante no setor da construção civil e no desenvolvimento do estado e do país (Zaccaron,

2018). Estima-se que Santa Catarina seja o estado brasileiro com a maior concentração de indústrias per capita, apontando a importância do setor (Camara *et al.*, 2015). No estado três regiões se destacam, a do Alto Vale do Itajaí e Planalto Catarinense, da Foz do Rio Itajaí e a região Sul Catarinense, sendo esse o principal polo produtivo, que está localizada nas intermediações de Morro da Fumaça.

Torna-se importante referir que devido a qualidade e diversidade do produto cerâmico catarinense que abastece o próprio estado, o mesmo é exportado para todo o Brasil, e também para países da América Latina e Europa. Esse fator está atrelado a qualidade da matéria prima disponibilizada às cerâmicas.

Com isso, outro setor de extrema importância para o estado de Santa Catarina, é o de mineração cerâmica, que tem elevada significância socioeconômica e cultural principalmente para a região sul do estado, onde o valor da produção representa grande parte da principal atividade de alguns municípios como Morro da Fumaça, Sangão e Içara.

2.1.2 Arranjo Produtivo Local (APL) Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça

A grande relevância socioeconômica do setor mineral voltado para ao setor ceramista da região sul catarinense, fez surgir o Arranjo Produtivo Local de Base Mineral - APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, o qual consiste em um agrupamento de empresas e indivíduos que operam dentro da região geográfica específica do sul de Santa Catarina, inseridos na cadeia produtiva com base na atividade extrativa e de transformação mineral (Gonçalves e Cândido, 2013).

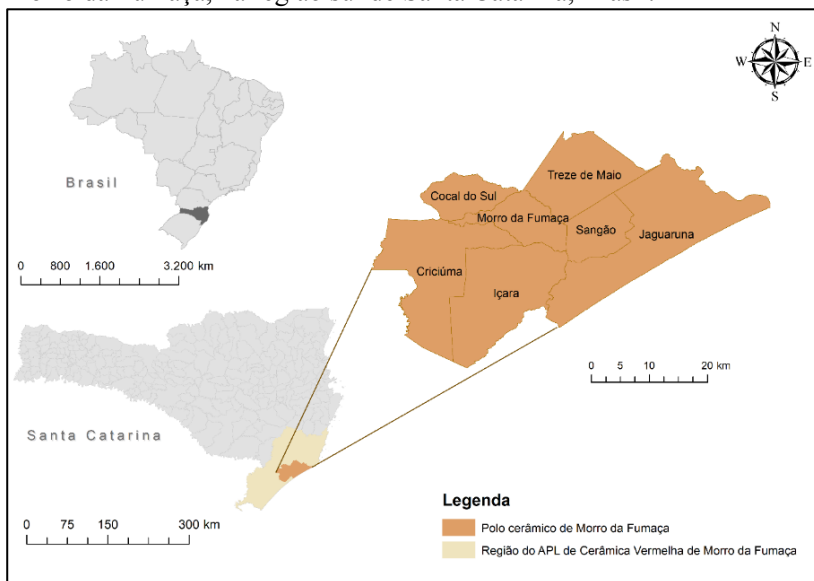
Os APLs de diferentes setores desempenham um papel importantíssimo para o crescimento econômico de determinadas regiões por meio da geração de empregos e renda, bem como do fortalecimento da economia. Os Arranjos Produtivos também incentivam a inovação, o compartilhamento de conhecimento e o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos de produção. Além disso os APLs de base mineral podem promover boas práticas ambientais, e a adoção de tecnologias mais limpas na exploração e no processamento mineral, contribuindo para a sustentabilidade do setor (Santana, Ítavo e Silva, 2013).

O polo cerâmico de Morro da Fumaça (Figura 1) vem sendo reconhecido nacionalmente devido as ações de melhores práticas na mineração de argila, obtidas pelo gerenciamento técnico e ambiental realizado nas jazidas, do qual se atingiu um aproveitamento significativo nas frentes de lavra que estavam sendo subutilizadas (Pagnan *et al.*,

2023). Esse reconhecimento é associado ao trabalho da Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga (COOPEMI), que abastece o setor, havendo um maior aproveitamento do bem mineral.

Nessa região, aproximadamente 120 empresas desempenham um papel fundamental, proporcionando a geração de aproximadamente sete mil postos de trabalho e uma produção mensal que gira entorno dos 100 milhões de peças de cerâmica vermelha, sendo 25% telhas e 75% tijolos.

Figura 1 - Representação da localização do APL de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça, na região sul de Santa Catarina, Brasil.



Fonte: Autora (2023).

A promoção e organização de Arranjos Produtivos Locais de base mineral seguem um processo metodológico que se baseia no respaldo de projetos colaborativos. Estes projetos envolvem a cooperação entre entidades governamentais e não governamentais, que atuam em todos os segmentos da cadeia produtiva. No APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, destacam-se algumas entidades que desempenham papéis determinantes. O Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (SINDICER) atua como instituição coordenadora, tendo respaldo e apoio da COOPEMI e das indústrias cerâmicas sindicalizadas. Com papel social importante, a Associação de Artesãos Olaria das Artes

também é parte integradora. Outros atores regionais fazem parte indiretamente, mas representam importância para o desenvolvimento do setor minero-cerâmico, como cooperativas de crédito, instituições de ensino, e também contando com apoio da Confederação Nacional da Indústria (CNI), do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), da Federação das Indústrias de Santa Catarina (FIESC), do Serviço Social da Indústria (SESI), do Instituto Euvaldo Lodi (IEL) e do Serviço de Apoio à Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE).

2.2 MATÉRIAS PRIMAS ARGILOSAS

Argila é um mineral sedimentar composto principalmente de silicatos hidratados de alumínio e pode ser encontrada em depósitos em todo o mundo (Christidis, 2013).

As argilas tem uma importância significativa na indústria com grande destaque de aplicação na produção de produtos cerâmicos para a construção civil.

Devido a sua rica diversidade geológica, torna-se possível encontrar, além de argilominerais, areias de quartzo e/ou minerais de feldspato, com diversificadas aplicações, como na fabricação de vidros, de tijolos/telhas, de azulejos e de cimentos. Essa diversidade de aplicações demonstra a versatilidade das argilas e a importância em diversos setores industriais (Moussi *et al.*, 2020).

As matérias-primas argilosas para a produção de cerâmica têm sido amplamente estudadas, particularmente nas áreas de aplicações industriais de cerâmica em todo o mundo (Baccour *et al.*, 2008; Celik, 2010; Dondi, Raimondo e Zanelli, 2014).

A versatilidade da argila como matéria-prima para a indústria cerâmica, principalmente obtidos pelo processo de extrusão, está associado as suas características intrínsecas e que oferecem a possibilidade de moldagem, do qual lhe ofertam alto desempenho técnico-mecânico. A propriedade plasticidade é caracterizada pela fina granulometria e aspectos físico-químicos específicos que podem ser determinantes na qualidade dos produtos (Boukili, El *et al.*, 2023; Boukili *et al.*, 2021).

A seleção e o processamento das matérias-primas são essenciais para garantir a qualidade e consistência dos produtos cerâmicos. A caracterização física e mineralógica das matérias-primas é crucial para compreender os seus potenciais benefícios, auxiliando no controle processual da massa e garantindo a qualidade e confiabilidade do produto

final (Manjate, Issufo e Magenge, 2020; Nandi *et al.*, 2023; Zaccaron, Souza Nandi e Bernardin, 2021)

2.2.1 Caracterização dos materiais argilosos

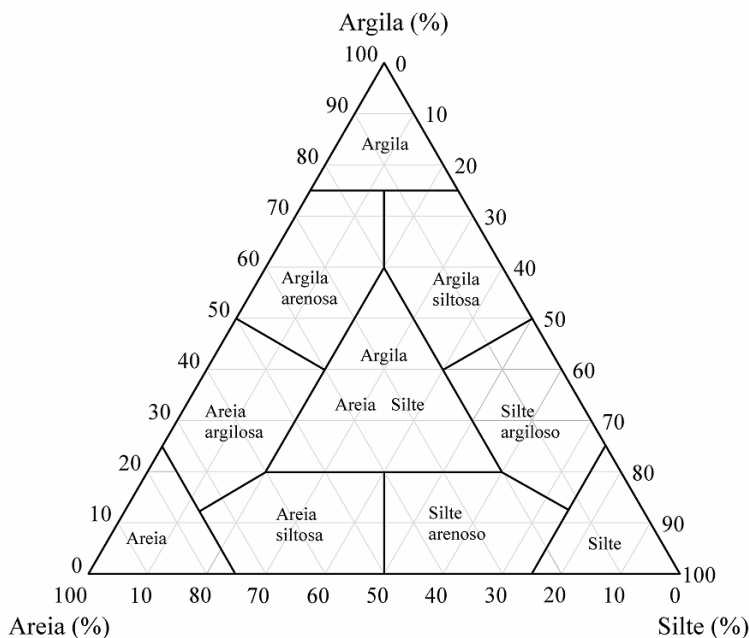
As características das argilas exercem impactos significativos nas propriedades físicas, químicas e/ou hidráulicas, influenciando diretamente fatores como a retenção de água, a aeração, a permeabilidade e a capacidade de deformação. Um atributo físico fundamental das argilas é a textura, que se refere à proporção relativa das partículas minerais primárias, nomeadamente areia, silte e argila (Hillel, 1980).

A caracterização deste aspecto físico pode ter um impacto significativo na fabricação de cerâmica vermelha, uma vez que pode revelar indiretamente propriedades das matérias-primas determinantes para o processo de fabricação de cerâmica, como a plasticidade (Queiroz e Morais, 2021; Taypondou Darman *et al.*, 2022). A plasticidade, está associada particularmente às características mineralógicas das argilas, as quais apresentam naturalmente uma distribuição de tamanho de partículas extremamente fina e de grande influência nessa propriedade, pois altera as frações dos minerais presentes nos solos (Andrade, Al-Qureshi e Hotza, 2010)

A composição química, mineralogia e outras características físico-químicas, impactam o comportamento das matérias-primas em todo o processo cerâmico, desde a preparação até a queima. Portanto, o conhecimento da textura é essencial para a seleção e caracterização adequada das matérias-primas, visando a otimização do desempenho funcional no processo cerâmico (Silva *et al.*, 2023; Zaccaron, 2018). Assim foi estabelecido o Triângulo de Textura do Solo (Figura 2) ferramenta desenvolvida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*U.S. Department of Agriculture - USDA*), para auxiliar a classificação da textura do solo com base nas proporções relativas de areia ($2 \sim 0,05$ mm), silte ($0,002 \sim 0,05$ mm) e argila ($<0,002$ mm) presentes (Davis e Bennett, 1927). Cada vértice de um triângulo representa uma das três classes principais de tamanho de partículas destes minerais, e os pontos dentro do triângulo indicam combinações específicas dessas classes. O triaxial contém novas regiões de classe de textura definidas por polígonos com limites destacados e identificados por nomes, e a resolução de trabalho de grade é igual a um intervalo de 10 % para todas as coordenadas, o que permite interseções de linhas de coordenadas de 0-100 % (García-Gaines e Frankenstein, 2015).

Portanto, conhecer as características das matérias-primas empregadas no processo fabricação de cerâmicos é uma ação importante para o controle processual, que inicia no desenvolvimento de misturas, passando pela etapa de conformação e tratamento térmico, e se refletindo na qualidade do produto final (Monatshebe, Mulaba-Bafubandi e Kasongo Nyembwe, 2019).

Figura 2 - Representação do triângulo de textura de solo usado pelo *USDA* (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) e estabelecido com base nos teores de areia, silte e argila.



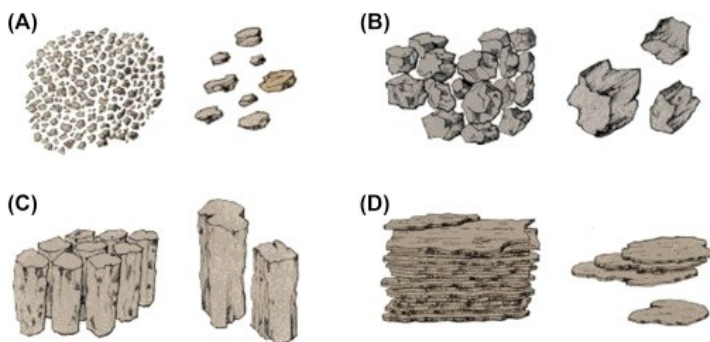
Fonte: Adaptado de Shepard, (1954).

De acordo com Santos, (1989), a textura do solo representa um conceito macroscópico abrangente que resulta da interação de diversos fatores, incluindo a distribuição do tamanho das partículas, a morfologia das partículas constituintes, a orientação relativa das partículas e as forças que mantêm essas partículas unidas. A Figura 3 ilustra as categorias de estruturas que podem ser identificadas.

Os argilominerais apresentam estrutura lamelar (filossilicatos), sendo uma característica distintiva que se manifesta pela organização das

partículas em finas camadas ou folhas. Essas estruturas planares, com espessura muito pequena, conferem aos argilominerais uma área de superfície excepcionalmente ampla em relação à sua massa, proporcionando propriedades únicas, como alta capacidade de retenção de água e a capacidade de expandir e contrair em resposta à variação de umidade (Dai e Zhao, 2018).

Figura 3 - Tipos básicos de estrutura dos solos: (A) granular, (B) em bloco, (C) prismático e (D) lamelar.



Fonte: Rai, Singh e Upadhyay, (2017).

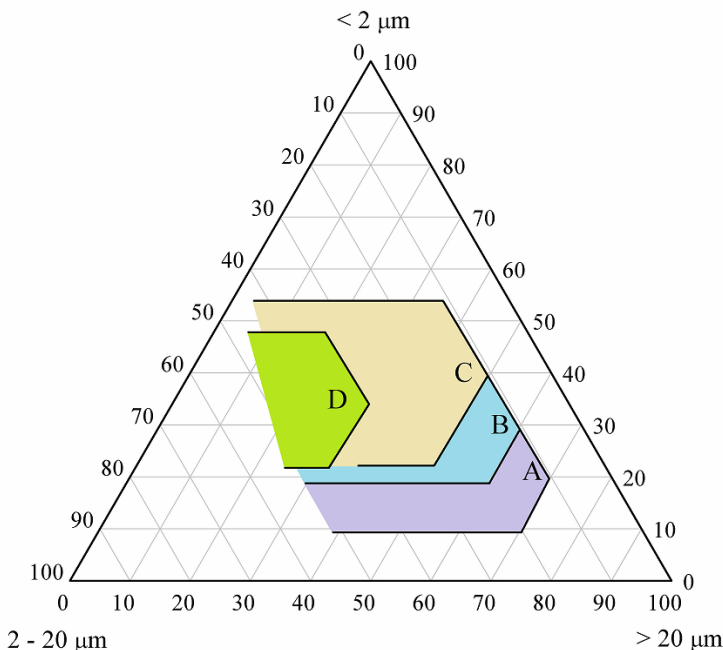
2.2.2 Caracterização granulométrica

A granulometria é a técnica pela qual as partículas de um material sólido são classificadas de acordo com seus tamanhos específicos. Devido ao seu impacto significativo nas propriedades das argilas, a determinação da distribuição de tamanho das partículas desempenha um papel fundamental na caracterização de produtos cerâmicos, sendo um aspecto de extrema importância para garantir a qualidade e o desempenho desejado desses materiais (Crozetta *et al.*, 2016).

O diagrama de *Winkler* (Figura 4) é uma ferramenta importante para o processamento da cerâmica vermelha, pois permite estabelecer o potencial que cada matéria-prima possui para a fabricação de produtos específicos ou a necessidade de mistura entre elas (Vieira, Monteiro e Duailibi Fh, 2005). Neste diagrama, a distribuição de tamanhos de partículas é analisada dentro do sistema triaxial para assegurar que uma determinada argila seja adequada ao processo. Esse controle garante que as matérias-primas atendam aos requisitos necessários para a fabricação de produtos cerâmicos de alta qualidade (Winkler, 1954). Assim, as zonas

identificadas correspondem a de cerâmica estrutural, sendo: (A) tijolos maciços, (B) tijolos perfurados verticalmente, (C) telhas e blocos leves, e (D) tijolos ocos para paredes finas (Dondi, Fabbri e Guarini, 1998).

Figura 4 - Diagrama triaxial de *Winkler* para classificação tecnológica de diferentes tipologias de cerâmicas estruturais de argila.



Fonte: Adaptado de Winkler, (1954).

2.2.3 Propriedade plástica das argilas

A plasticidade é uma propriedade fundamental dos sistemas argila-água, permitindo que a argila mude de forma sem se romper quando uma força é aplicada e ao mesmo tempo mantendo a forma do objeto utilizado nesta aplicação de força mesmo após a sua retirada. Essa característica única é o que distingue a argila de outros minerais e a torna adequada para diversos processos de conformação na produção cerâmica. As partículas finas da argila, combinado com a presença de água e aspectos químicos da interação sólido-água, controlam as propriedades plásticas de um determinado corpo argiloso (Andrade, Al-Qureshi e Hotza, 2010). A

plasticidade da argila é resultado do caráter eletrolítico de suas partículas planas, que possuem cargas opostas em suas faces e bordas. Essa propriedade confere à argila afinidade pela água, que atua com forças de atração, mantendo as partículas unidas, quanto com forças de repulsão, conferindo plasticidade por meio da química da superfície das partículas de argila (Andrade, Al-qureshi e Hotza, 2011; Moreno-Maroto e Alonso-Azcárate, 2018).

Na indústria cerâmica, a plasticidade é uma propriedade crucial da argila que permite que ela seja facilmente moldada e transformada em diversos produtos (Andrade, Al-Qureshi e Hotza, 2010). Certos tipos de argila, são conhecidos por sua alta plasticidade e são frequentemente adicionados a massas argilosas mais sedimentares, para melhorar suas propriedades plásticas e trabalhabilidade durante os processos de produção (Lahcen *et al.*, 2014). Portanto, a plasticidade é um parâmetro fundamental na extrusão de composições cerâmicas, necessária para a produção de diversos materiais, incluindo telhas e tijolos.

2.3 SETOR DA MINERAÇÃO

A Agência Nacional de Mineração (ANM) do Brasil é responsável por regular e fiscalizar a atividade de mineração no país. Segundo a ANM, a mineração é definida como uma atividade econômica e industrial que envolve a pesquisa, prospecção, extração e beneficiamento de minérios encontrados no subsolo terrestre (ANM, 2020b).

A mineração e o processamento mineral contribuíram significativamente para o avanço da civilização humana, e nos dias atuais essa atividade sustenta a maioria dos produtos que utilizamos, como eletrônicos, rodovias, estruturas metálicas entre outros (Mallett *et al.*, 2021).

Atualmente a mineração de argila desempenha um papel importante na economia do Brasil representando aproximadamente 4% do Produto Interno Bruto (PIB) da indústria nacional (Santos, 2021). O Brasil é rico em uma ampla variedade de recursos minerais metálicos e não-metálicos, sendo a argila um dos destaques, o que faz do país um dos principais produtores e consumidores mundiais de argila para cerâmica vermelha (Prado e Lima, 2021).

De uma forma ampla, o processo de mineração está atrelado a uma série de etapas ou atividades comuns, cada uma das quais tem impactos potencialmente adversos no meio ambiente, na sociedade, na saúde e segurança dos mineiros (Kitula, 2006). Na maioria das vezes no

desenvolvimento desta atividade implica na supressão de vegetação, exposição do solo a processos erosivos, além da perda de biodiversidade. As operações, sejam elas de pequena ou grande escala, são inerentemente prejudiciais ao meio ambiente, produzindo grandes quantidades de resíduos que podem ter impactos que se estendem a longo prazo (Bian *et al.*, 2012).

A deterioração ambiental causada pela mineração ocorre principalmente como resultado de práticas inadequadas sem a legislação e regulamentação adequada (Salvador *et al.*, 2020). Contudo, a busca de boas práticas na mineração e a aumento da fiscalização têm ajudado a minimizar os danos ambientais no processo de mineração. Ao utilizar técnicas de menor impacto, realizar avaliações de impacto ambiental, mitigar os impactos, adotar práticas de mineração sustentáveis e promover práticas éticas, a indústria mineira pode reduzir a sua pegada ambiental e tornar-se mais sustentável (Alves, Ferreira e Araújo, 2021; King, 2011).

Em paralelo aos problemas ocasionados pela atividade de mineração, também se destaca a geração de resíduos na extração, beneficiamento e processamento mineral (Shahba *et al.*, 2017). Esses resíduos de mineração incluem materiais como cobertura de solo superficial, estéréis e rejeitos (Segui *et al.*, 2023).

Os resíduos provenientes da atividade de mineração representam um sério problema devido às grandes quantidades geradas, até 65 bilhões de toneladas por ano em todo mundo, e muitas vezes estão associados ao risco representado pelo seu armazenamento e gestão ambiental (Kalisz *et al.*, 2022).

A utilização do conhecimento científico e o uso de tecnologias apropriadas são fatos indispensáveis para buscar a resolução de problemas associados à valorização de resíduos. Para tal, o desenvolvimento de uma abordagem integrada embasada na economia circular pode definitivamente ajudar a impulsionar a mineração sustentável, bem como proporcionar uma mudança transformacional necessária para a obtenção de melhorias sociais, ambientais e econômicas (Singh, Sukla e Goyal, 2020).

Com isso, a mineração pode agregar à sustentabilidade ao adotar práticas como reaproveitamento de resíduos, uso de energias renováveis e recuperação ambiental das áreas exploradas. Essas ações reduzem impactos, promovem a economia circular e beneficiam comunidades locais.

2.3.1 Mineração de carvão

O setor carbonífero gera uma série de resíduo que são proveniente do beneficiamento de carvão mineral, que em especial no Sul Catarinense, o minério de interesse está associado ao desenvolvimento econômico de vários municípios, é também uma importante fonte de energia elétrica, obtido após o beneficiamento do ROM (*Run of Mine* /carvão bruto) e utilizado nas usinas térmicas como combustível (fonte de calor) (Feil e Kliemann Neto, 2008).

O processo de beneficiamento do carvão (Figura 5) envolve uma série de etapas técnicas complexas, que tem como objetivo remover as impurezas para obter um teor adequado de carbono. A mineração inicia-se a perfuração e, quando necessário, são utilizados explosivos, para criar galerias e túneis para a obtenção de acesso às camadas de carvão. Neste processo de extração são utilizados equipamento mineradores de caráter contínuo, bem como máquinas de corte para liberar o carvão das rochas circundantes (ANM, 2020b).

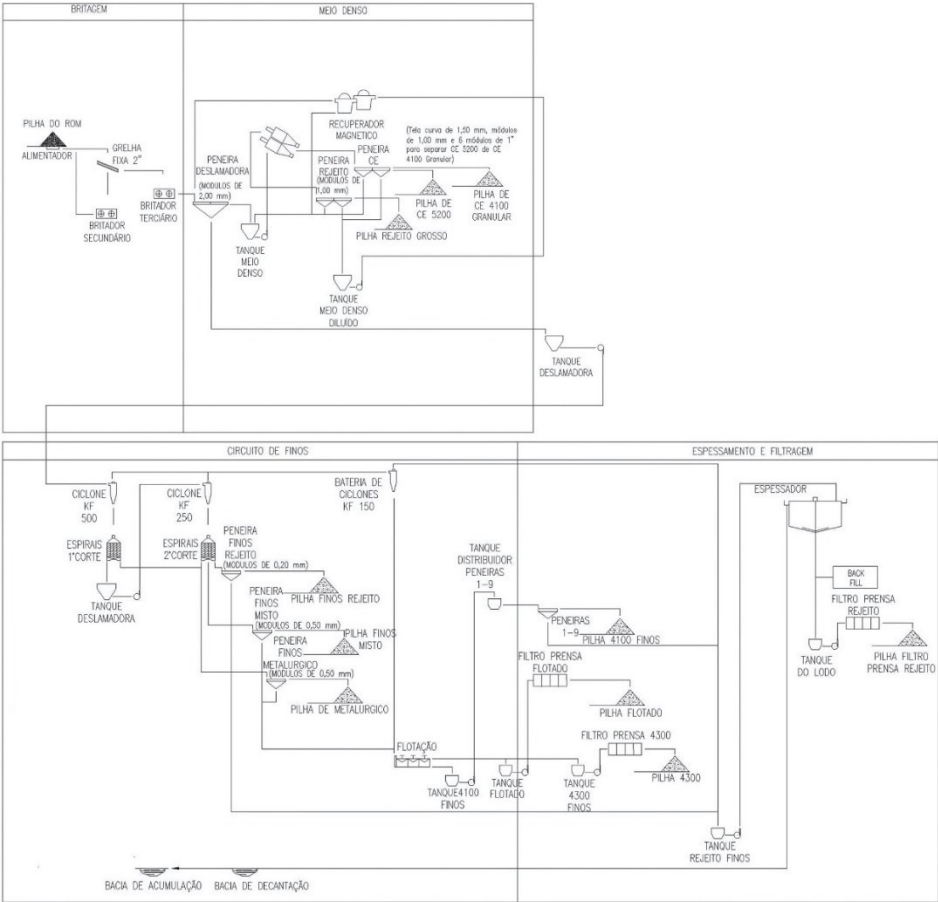
Após a extração vem o processo de beneficiamento, onde o ROM é triturado para reduzir seu tamanho, facilitando as etapas subsequentes de separação e limpeza. Em seguida, o carvão passa por um processo de classificação. Após a extração, o ROM é transportado para a planta de beneficiamento através de correias transportadoras. Onde encaminha-se para britagem onde é classificado por tamanho o carvão ($<1,5''$) vai para a etapa de meio denso.

A separação por meio denso é um dos métodos mais eficientes para a remoção de impurezas do carvão mineral de alta qualidade. Esse processo utiliza um fluido com densidade intermediária entre os constituintes a serem separados, permitindo que a separação ocorra com base na densidade das partículas, onde as mais leves flutuam, enquanto as mais densas afundam no meio empregado (Sampaio, França e Braga, 2007). É nessa etapa que se é separado carvão energético (CE), o que representa 85% da produção da região carbonífera de Santa Catarina, além de 44 ton/mês dos rejeitos grossos (granulados), que são descartados.

Todo material passante em 2mm entra no circuito dos finos, dos quais, por meio de ciclones e espirais, realizam a separação do carvão metalúrgico e os rejeitos finos. Por fim, o material que passa pelo processo do circuito dos finos, entra na etapa de flotação, espessamento e filtragem. Ao final, todo rejeito gerado após o processamento do carvão, consiste principalmente em partículas finas, minerais indesejados e impurezas que foram removidas do carvão bruto, podendo conter uma

mistura de argilas, sílica, alumina, pirita (sulfeto de ferro) e outras impurezas minerais. Eles também podem conter traços de metais pesados e elementos potencialmente tóxicos (Ruiz e Chaves, 2009).

Figura 5 - Fluxograma de beneficiamento do carvão.



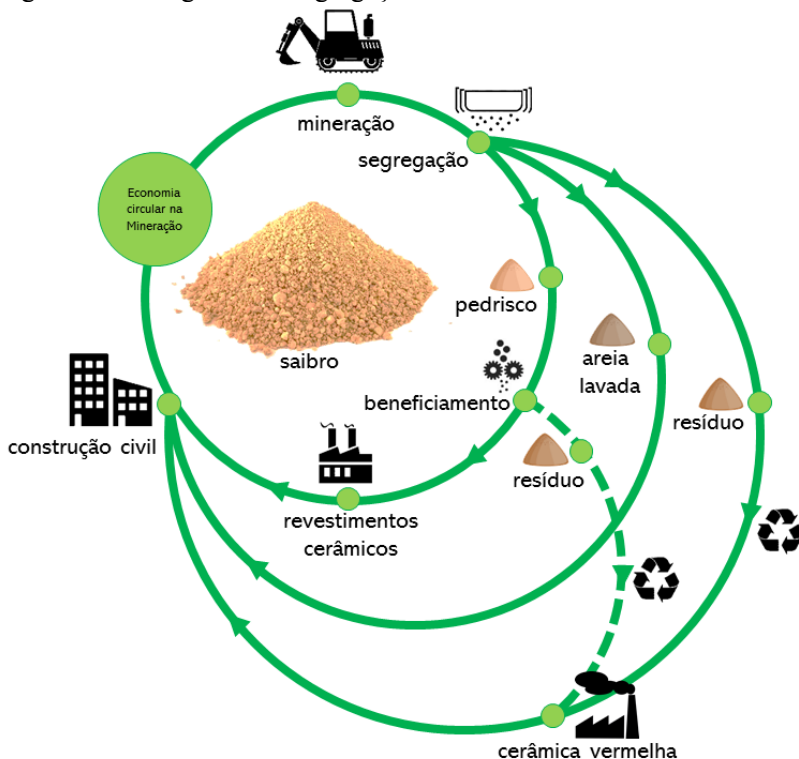
Fonte: Empresas Rio Deserto (2024).

2.3.2 Mineração de saibro

O processo de mineração do saibro (Figura 6), que é o produto de alteração de rochas quartzo-feldspáticas, como granitos e gnaisses geram

alguns resíduos minerais de interesse ao setor cerâmico. Esses materiais são constituídos por material sem coesão, formados principalmente por argilominerais e quartzo, e micas em menor proporção. Geralmente possui coloração rósea, avermelhada a esbranquiçada (Sotero *et al.*, 2020). Salienta-se que durante algum tempo, esse minério foi utilizado como aterro ou assolamento de estradas. Posteriormente, o setor minerário se reinventou e buscou-se novas tecnologias para agregação de valores.

Figura 6 - Fluxograma de segregação e beneficiamento do saibro.



Fonte: Autora (2024)

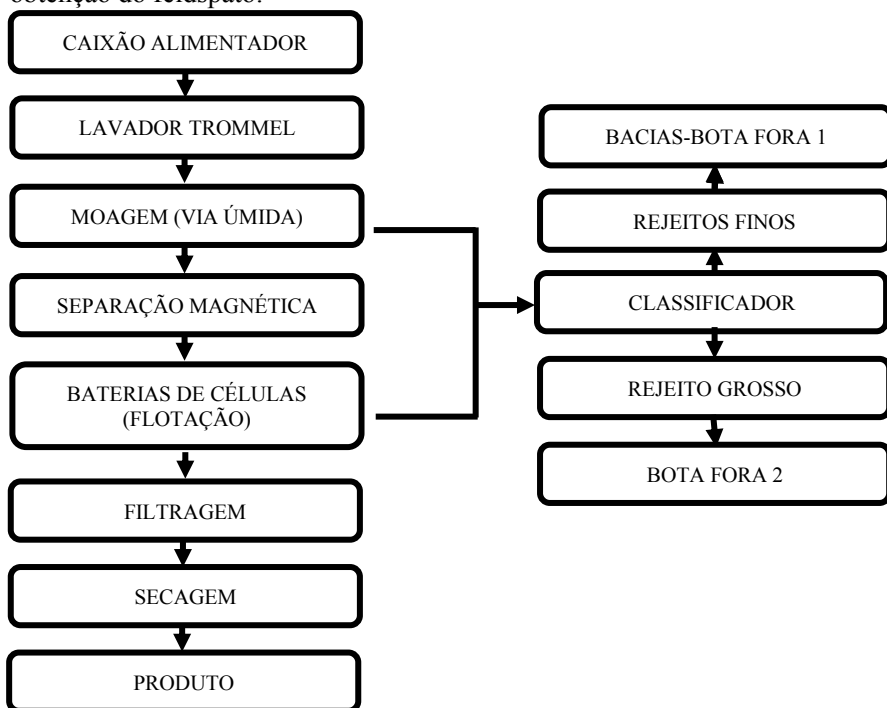
A primeira etapa do processo de tratamento do saibro, é quando o minério bruto, passa por lavagem e peneiramento, com malhas distintas, obtendo o pedrisco (material feldspático), seguido da areia lavada (material quartzítico) e todo material passante, é o resíduo argiloso que dá origem ao mineral subutilizado estudado (Sartor e Geremias, 2022),

como observado no fluxograma da Figura 6, que ilustra esquematicamente essa etapa.

A areia lavada é usada como agregado na construção civil, e o pedrisco necessita um processo para purificação do material. Com isso, o resíduo R5, é originário do beneficiamento do pedrisco (material feldpático), para obtenção de feldspato potássico a partir das rochas, por meio de um processo, que pode ser mais simples, envolvendo britagem, moagem e separação magnética ou mais complexos que se inclui a flotação.

Salienta-se que o feldspato potássico extraído do beneficiamento é encaminhado para coloríficos e revestimentos cerâmicos, bem como para fertilizantes da agroindústria (Barreto e Santos, 2020). O tratamento para obtenção de um feldspato rico em potássio (Figura 7) gera um resíduo que pode ser muito atraente a outros setores.

Figura 7 - Fluxograma do processo de beneficiamento do saibro para obtenção do feldspato.



Fonte: Adaptado de Sartor e Geremias, (2022)

É possível observar no fluxograma da Figura 7, o processo de beneficiamento para obtenção do feldspato. Primeiro, o saibro é lavado em um lavador trommel, que remove partículas maiores e impurezas. Em seguida, o material é moído via úmida para desagregar as partículas e liberar os minerais desejados. A separação magnética remove minerais ferromagnéticos indesejados, enquanto a flotação utiliza reagentes químicos para separar o feldspato das impurezas com base em suas propriedades superficiais. Por fim, a filtragem concentra o feldspato purificado e remove a água residual (Sartor e Geremias, 2022).

O resíduo (denominado como rejeito fino) é oriundo de duas diferentes etapas do processo de beneficiamento. O mineral segregado (pedrisco) após a moagem via úmida tem uma parte descartada ao classificador, e a porção aproveitável segue no processo, que após a flotação, também tem uma fração descartada ao classificado.

2.4 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é uma abordagem promissora para ajudar a reduzir as pressões globais de sustentabilidade (Bocken *et al.*, 2016), da qual exige que as empresas repensem as suas cadeias de abastecimento e modelos de negócio (Lüdeke-Freund, Gold e Bocken, 2019).

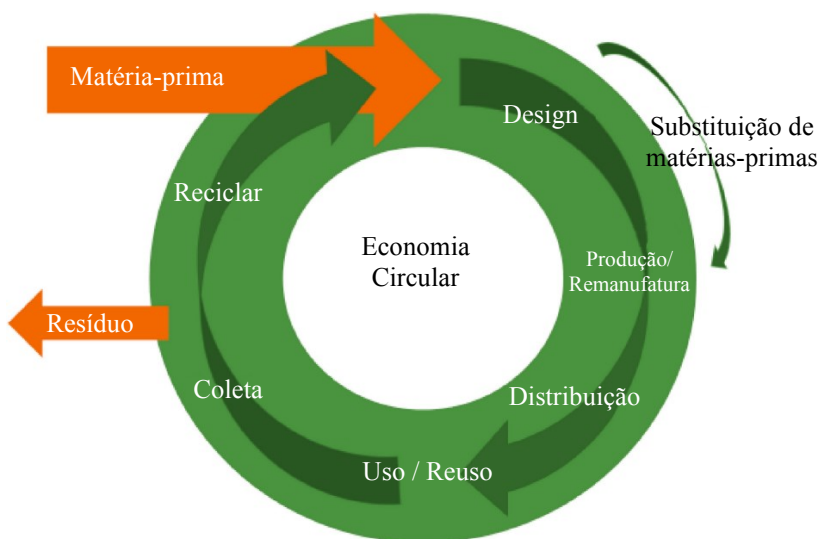
Este conceito econômico tem duas diferentes vertentes, sendo a primeira relacionada com o fluxo de materiais através de uma economia, e a segunda relacionada com a reflexão sobre as condições econômicas que podem provocar tal fluxo (Ekins *et al.*, 2019). Esses conceitos começaram de forma embrionária na década de 60, pelo economista ambiental e professor Kenneth E. Boulding (Boulding, 1966), e evoluindo com base nas ideias de ecologia industrial e metabolismo industrial formuladas durante as décadas de 1970 e 1980 através de um repensar dos processos industriais (Frosch e Gallopoulos, 1989) e, posteriormente, popularizado durante a década de 90. Assim, à medida que o tempo foi passando, o conceito de economia circular foi se moldando, tanto que atualmente, é interpretado e implementado de diversas maneiras (Kirchherr *et al.*, 2023).

Essa vasta gama de interpretações indicadas para a terminologia de economia circular, pode tornar sua compreensão confusa (Corvellec, Stowell e Johansson, 2022), porém, o conhecimento de sua estrutura básica, é fundamental para que se haja sucesso na sua aplicação (George, Lin e Chen, 2015).

A economia circular vem sendo intimamente relacionada à “Indústria 4.0”, uma vez que as tecnologias digitais avançadas da Indústria 4.0 permitem e apoiam a transição para uma abordagem economia promissora. A relação entre os dois conceitos pode ser vista através de iniciativas de sustentabilidade, gestão da cadeia de abastecimento, produção digital avançada, tecnologias digitais (*IoT - Internet of Things*) e gestão sustentável da cadeia de abastecimento (Awan *et al.*, 2022; Hettiarachchi, Seuring e Brandenburg, 2022; Lu, Zhao e Liu, 2022; Rajput e Singh, 2019).

De uma forma simplificada, a Figura 8 ilustra esquematicamente como a economia circular pode ser direcionada para muitas indústrias.

Figura 8 - Ilustração da Economia Circular com as suas diferentes componentes numa perspectiva de substituição/uso de materiais.



Fonte: Adaptado de Grafström e Aasma, (2021).

Dentro da indústria cerâmica a economia circular pode ser integrada através de diversas estratégias e práticas que priorizem a sustentabilidade, a eficiência de recursos e a redução de resíduos. Ferramentas de avaliação de impacto (como a Avaliação do Ciclo de Vida por exemplo) podem fornecer indicadores de desempenho de sustentabilidade apropriados dentro do setor cerâmico (Garcia-Muiña *et al.*, 2018).

Pode-se compreender que uma implementação bem sucedida de economia circular requer ações amplas de circularidade, com medidas de otimização de recursos energéticos e de materiais, como a utilização de resíduos de uma fonte geradora como matéria-prima de outro (Grafström e Aasma, 2021).

2.4.1 Mineração circular

O setor minerário é atrelado a uma opinião pública bastante desfavorável, muito devido a interferência significativa do setor mineiro no ambiente natural, bem como a escala das atividades realizadas (Woźniak e Pactwa, 2018). Porém, nas últimas décadas, surgiram várias abordagens que visam incluir aspectos de sustentabilidade em todo o ciclo de vida da mineração (Corder, 2015). Com isso, dentro dos conceitos de economia circular, existe as prerrogativas de adaptação dos termos para avaliação desses princípios para a mineração (Sun e Tang, 2010).

A economia circular na mineração refere-se a um sistema econômico que segue as características e regras ecológicas naturais dos recursos minerais e produtos minerais e tem como núcleo a exploração altamente eficiente e a utilização abrangente dos recursos minerais (Zhao *et al.*, 2012). A circularidade mineral é um conceito que ainda está em estágio inicial e pode apresentar resultados promissores dentro de vários setores abastecidos pela mineração (Upadhyay *et al.*, 2021).

A valorização de resíduos está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, estando alinhado a recuperação de minerais residuais e aproveitamento da matriz mineral, podendo ser transformados em valiosas fontes minerais secundárias (Kinnunen e Kaksonen, 2019). Essas valorizações, podem estar associadas tanto ao aproveitamento de um resíduo de mineração (Comin *et al.*, 2023; Villachica *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2023), quanto ao aproveitamento mineral de uma outra fonte (Benedet *et al.*, 2023).

2.4.2 Simbiose industrial

Em paralelo aos conceitos de economia circular, também se faz de grande importância no âmbito da sustentabilidade, compreender aquele que se associa à simbiose industrial, dos quais estão intimamente relacionados. A simbiose industrial é uma ação de circularidade onde resíduos, subprodutos ou outros recursos são compartilhados entre diferentes empresas gerando vantagens competitivas a todos (ILO, 2022).

O termo “simbiose industrial” vem sendo desenvolvido ao longo do último século, e está fortemente relacionado com aquele estabelecido à “ecologia industrial” desde as décadas de 1930 (Lezius, 1937) e 1940 (Renner, 1947). Sendo que este conceito ganhou força, principalmente a partir da década de 1970, quando as causas ambientais começaram a ficar mais recorrentes em pautas de Conferências Internacionais, com grande notoriedade a partir do final da década de 1980 (Frosch e Gallopoulos, 1989).

Redes de simbiose industrial são colaborações comerciais onde as empresas trocam produtos residuais e excedentes, como água, energia ou materiais. Normalmente, as empresas estão localizadas muito próximas umas das outras, pois as longas distâncias podem impedir a troca de recursos ou eliminar a justificativa empresarial e ambiental para fazê-lo (Boons, Spekkink e Mouzakitis, 2011; Neves *et al.*, 2020).

Esse modelo pode ser considerado uma megatendência global e uma estratégia às ações ambientalmente corretas, uma vez que significam menos extração de materiais brutos, maior reciclagem de água e energia e menos emissões de CO₂. Para as empresas, as simbioses industriais têm sido propostas como um método que podem adotar para ajudar na preservação de recursos escassos, tornar a sua utilização de recursos mais eficiente e sustentável e até como forma de aumentar a sua competitividade (Chertow, 2007).

O setor mineral também pode se beneficiar com a simbiose industrial, promovendo a redução de resíduos e emissões, a melhoria da eficiência dos recursos e a criação de novas oportunidades de negócios (Beers *et al.*, 2008; Boom-Cárcao e Peñabaena-Niebles, 2022).

2.4.3 Critérios de valorização

A valorização de resíduos é um processo que envolve a identificação de fontes alternativas de materiais, prolongando assim seu ciclo de vida, reduzindo a quantidade de resíduos/materiais enviados para aterros e diminuindo, consequentemente, a extração de matéria-prima bruta do ambiente (Bain *et al.*, 2010; Raupp-Pereira, 2006; Zurbrugg *et al.*, 2012).

Para que esse processo tenha sucesso na implementação, alguns critérios devem ser utilizados, e com base nisso, foi desenvolvida a sistemática CPQvA por (Raupp-Pereira, 2006) Segundo o autor, esses critérios podem ser considerados para avaliar a potencialidade de reutilização de um resíduo/subproduto.

Esses critérios passaram por processos evolutivos, sendo amplamente aplicados no meio científico (Acordi *et al.*, 2023; Machado *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023; Prates *et al.*, 2022; Simão *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2019; Vilaça *et al.*, 2022; Zocche *et al.*, 2023).

Esses critérios ajudam a identificar se um resíduo pode ser transformado em uma matéria-prima útil, promovendo a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos. A aplicação da sistemática CPQvA é fundamental na tomada de decisões estratégicas sobre a valorização de materiais descartados.

A qualificação de resíduos utilizando a estrutura CPQvA (Figura 9), segue o seguinte critério sistemático de avaliação:

- i. Classificação do resíduo perigoso ou não perigoso;
- ii. Potencialidade e características físicas e químicas do material;
- iii. Quantidade disponível e viabilidade dos resíduos;
- iv. Aplicabilidade do resíduo como subproduto.

Figura 9 - Representação da sistemática CPQvA para a valorização de resíduos.



Fonte: Adaptado de Acordi *et al.*, (2023).

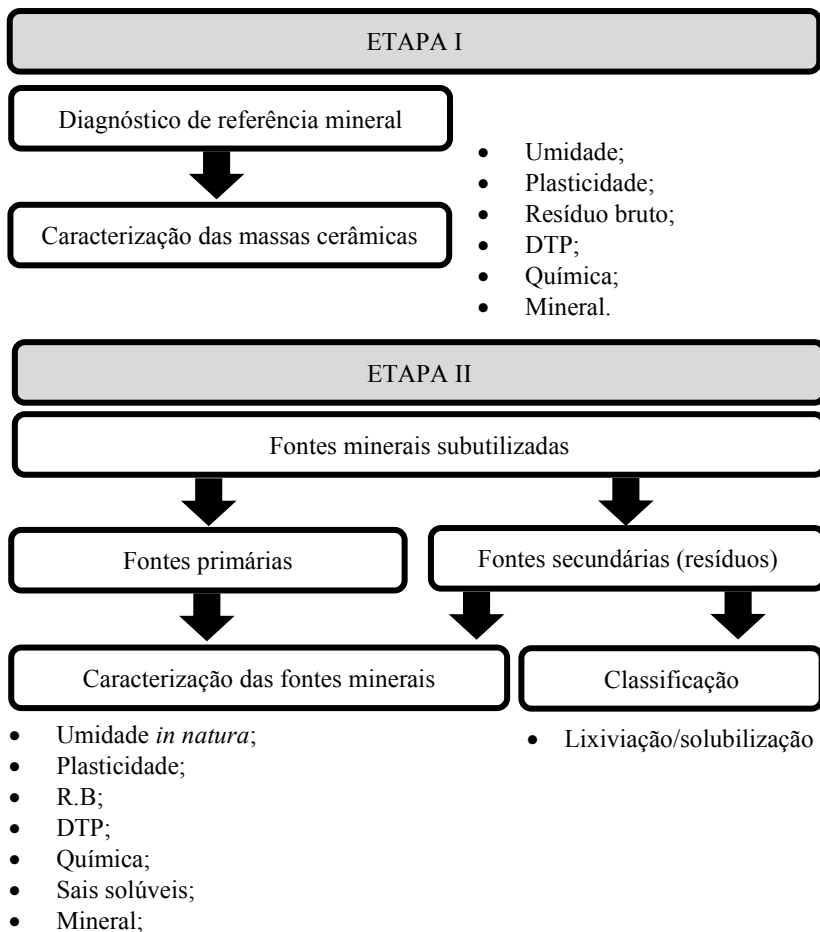
Os resíduos podem ser oriundos das mais diversas origens, desde as atividades mais comuns do dia a dia, das sobras processuais da indústria e até mesmo das etapas primárias como a mineração. A formação geológica de uma determinada área pode exercer influência direta nas características e pureza de um mineral (Hawkins e McConnell, 1991). E dentro da mineração, salientam-se as etapas de separação e beneficiamento dos materiais, que geram toneladas de resíduos em todo o mundo (Rampacek, 1982). Os materiais resultantes desses

processamentos contêm predominantemente resíduos inorgânicos (minerais), e essas frações minerais estão intimamente ligadas às características mineralógicas bem como aos processamentos que pelos quais o minério passa para beneficiamento (Jamieson, Walker e Parsons, 2015; Mishra, Panigrahi e Shrivastava, 2023). O desafio atual é saber como dar destinação que agregue valor a algo que até então era descarte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa deu-se pela obtenção de fontes minerais subutilizadas na região do APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, executada em duas etapas investigativas conforme descritas no fluxograma da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no presente estudo.



Fonte: Autora (2023)

3.1 DIAGNÓSTICO DE REFERÊNCIA MINERAL

A partir do diagnóstico das massas cerâmicas do setor industrial da região do APL, objetivou-se conhecer as características das formulações comumente utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha. Foi realizado um levantamento para identificação das indústrias cerâmicas dentro da região do APL-CVMF. Esse diagnóstico também criou parâmetros a serem utilizados como base para prospecção mineral com diferentes fontes primárias e secundárias.

Torna-se importante ainda destacar a produção de peças de cerâmica estrutural de coloração branca na região, o que é uma particularidade com base no efeito sinérgico da matéria-prima e do processo fabril, que também foi introduzida na investigação.

Considerando-se que a representação ilustrativa dos resultados pode facilitar a sua interpretação e a posteriormente tomada de decisão numa perspectiva de prospecção mineral, o diagnóstico foi desenvolvido a partir dos resultados dos ensaios realizados apresentados em uma série de diagramas e gráficos dispostos na literatura (Bain, 1987; Bain e Highley, 1979; Casagrande, 1948; Dondi, 1999; Fabbri e Dondi, 1995; Fabbri e Fiori, 1985; Fiori *et al.*, 1989; Gippini, 1969; Holtz e Kovacs, 1981; Marsigli e Dondi, 1997; Shepard, 1954; Strazzera, Dondi e Marsigli, 1997; Winkler, 1954).

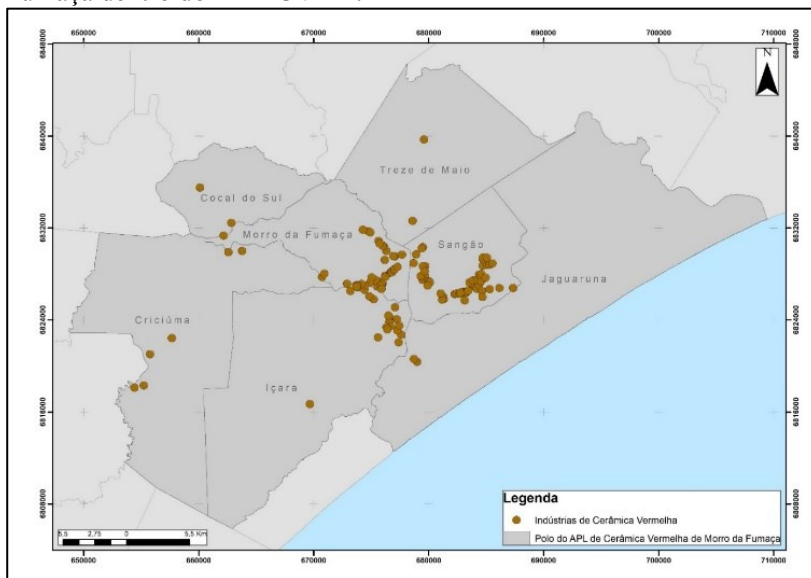
3.1.1 Levantamento de indústrias do APL-CVMF

Realizou-se uma análise inicial com informações geográficas das indústrias de cerâmica vermelha pertencentes à região do APL-CVMF. Ao todo, 120 indústrias foram identificadas, com auxílio de base de dados do Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça – SINDICER, que fabricam blocos de vedação e estruturais, tijolos, telhas, lajes e peças especiais de argila.

De acordo com a Figura 11 é possível verificar que as indústrias cerâmicas estão concentradas principalmente nos municípios de Morro da Fumaça, Sangão e no interior de Içara, estendendo-se a um número menor em Treze de Maio, Jaguaruna, Criciúma e Cocal do Sul, onde se obtém assim maior densidade na região central do polo cerâmico.

Após a realização do levantamento das indústrias cerâmicas na região do APL-CVMF, efetuou-se a seleção daquelas que constituíram com o diagnóstico mineral. Ao todo foram escolhidas 15 indústrias de cerâmica vermelha produtoras de blocos e telhas.

Figura 11 - Localização das indústrias do polo cerâmico de Morro da Fumaça dentro do APL-CVMF.



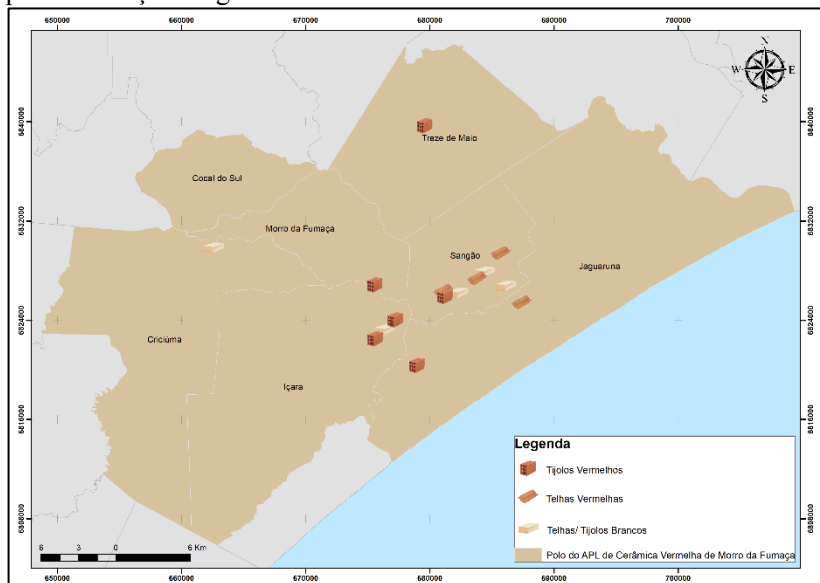
Fonte: Autora (2024).

Alguns critérios foram determinantes para a escolha destas cerâmicas de referência. Inicialmente foram divididas em três grupos blocos de vedação, telhas vermelhas, tijolos e telhas brancas/mescladas, sendo esses os produtos mais comercializados pelo polo produtivo de CVMF. Ressalta-se que foram dadas prioridades às empresas com maior representatividade em termos de tamanho e produtividade. A classificação foi feita entre produtos vermelhos e brancos/mesclados. A proximidade das indústrias com o APL-CVMF também foi considerada, dando preferência às empresas associadas ao SINDICER por conta do acesso a coleta das massas e possíveis interações associadas.

Dessa forma, foram escolhidas: 6 indústrias cerâmicas produtoras de blocos de vedação vermelho (M1 a M6), 4 de telhas vermelhas (M7 a M10), e 5 de tijolos e telhas brancas/mescladas (M11 a M15). A distribuição dessas empresas no polo cerâmico pode ser observada na Figura 12.

Ressalta-se que a coleta das massas se fez após o processo de laminação, que antecede a extrusão, para se buscar o máximo de características utilizadas pela indústria. Em média, foram coletados aproximadamente 50 kg de massa por empresa, para o estudo.

Figura 12 - Localização das indústrias escolhidas dentro do APL-CVME, para realização diagnóstico de referência mineral.



Fonte: Autora (2024).

3.2 FONTES MINERAIS SUBUTILIZADAS

Nessa etapa foram identificados minerais argilosos subutilizados, seja de áreas de mineração de argila matérias-primas pouco exploradas pelas cerâmicas do polo cerâmico, que ocasiona o desperdício desses materiais, ou seja de resíduos oriundos de outros setores minerais. Estima-se que esses materiais, possam integrar massas cerâmicas, dadas suas características minerais peculiares.

Inicialmente, sob orientação dos técnicos da Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga (COOPEMI), foram identificadas 10 áreas de mineração de argila, que estão dentro dos seus requerimentos minerários e sem utilização pelo setor ceramista regional, devidas algumas particularidades. Essas argilas são denominadas como minerais subutilizados de fonte primária e o setor demonstra um forte interesse na exploração destas matérias-primas para, assim garantir o abastecimento local, aumentar a vida útil das jazidas e minimizar os problemas relacionados a escassez mineral na região.

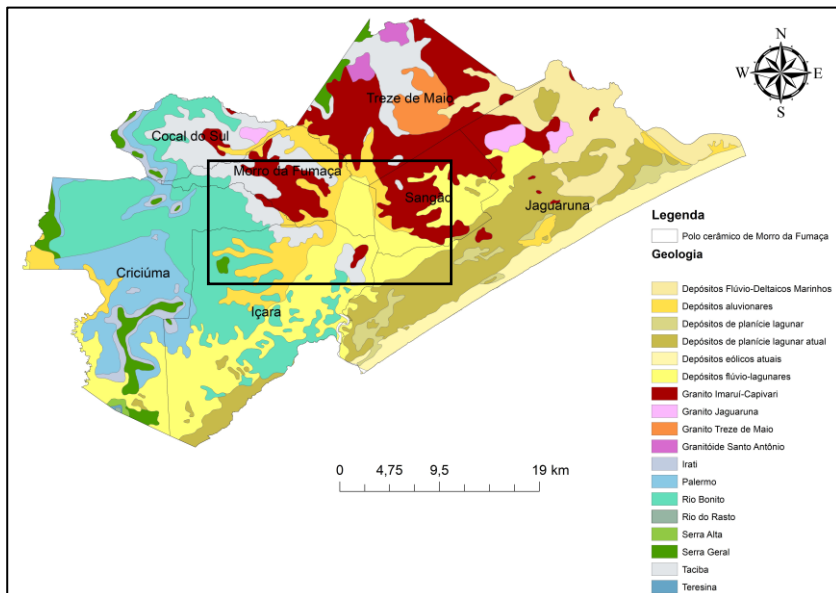
Em paralelo, foram investigados resíduos de outras fontes minerais dentro do APL, que possam abastecer o setor como fonte alternativa

mineral (resíduos/subprodutos). Foram identificados 5 materiais alternativos oriundos de outras atividades de mineração (carvão e saibro). Desses, um (1) é referente ao fino do carvão (fração argilosa), e os outros quatro (4) oriundos do beneficiamento do saibro para remoção do feldspato.

O mapeamento geológico da área de estudo (Figura 13) apresenta uma grande variação estabelecida na Bacia geológica do Paraná. Na porção litorânea se encontram os depósitos sedimentares, que geram a presença de lamias, areias, cascalhos, além de sedimentos siltico-argilosos, entre outros. Também é possível observar a presença de granitos e granitóides, que são majoritariamente sieno e monzogranitos leucocráticos. E por fim, a presença de outras formações, algumas delas apresentam em comum o siltitos, argilitos e folhelhos, se destacando a Formação Rio Bonito com a presença de rochas carbonosas e carvão (CPRM, 2014)

Para desenvolvimento do mapa utilizou-se a base de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2014), e o software usado foi o ArcGis Desktop (ArcMap).

Figura 13 - Mapa geológico do polo cerâmico de Morro da Fumaça inserido no APL-CVMF.

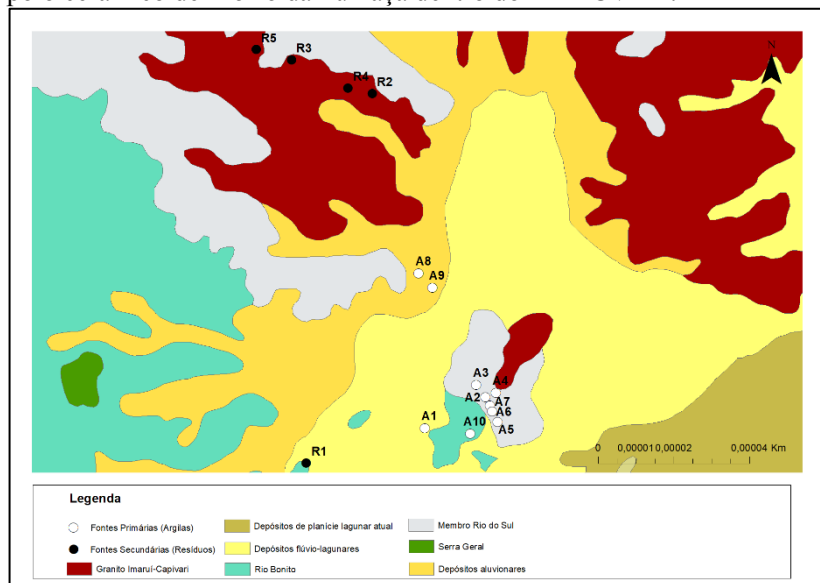


Fonte: Autora (2023).

A localização das fontes primárias e secundárias existentes no polo cerâmico de Morro da Fumaça, são detalhadas na Figura 14. A coleta aconteceu diretamente no local, onde ao todo 100 kg de cada material foi coletado, e por meio de quartejamento, reduzidos a 50 kg para o estudo.

As fontes primárias argilosas estão majoritariamente localizados no membro Rio do Sul, incluída no Grupo Itararé. As formações sedimentares do Grupo Itararé são resultantes de ambientes fluviais e lacustres que existiam durante o período Permiano, sendo conhecido por suas extensas formações de arenitos, siltitos, argilitos e carvão. Os demais pontos estão em áreas de coberturas sedimentares da Era Cenozoica. Os depósitos aluvionares são areias grossas a finas, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos, em calhas de rios e planícies de inundação, já os depósitos flúvio-lagunares, são areias e lamas lagunares, com restos orgânicos vegetais, interdigitados com cascalhos e areias grossas a finas da sedimentação fluvial (CPRM, 2014).

Figura 14 - Localização das fontes primárias e secundárias existentes no polo cerâmico de Morro da Fumaça dentro do APL-CVMF.



Fonte: Autora (2024).

As fontes secundárias, por sua vez, estarão intrinsecamente caracterizadas por sua origem geológica e processo de beneficiamento. A fração fina, resíduo R1, é proveniente da mineração do carvão, que está

geologicamente inserida na Formação Rio Bonito, onde é extraído carvão da camada Barro Branco. O xisto carbonáceo e o diamictito são comumente encontrados em matrizes carbonáceas e arcóseos, siltitos, arenitos de quartzo, tonstein e margas, que existem em ambientes marinhos fluviodeltaicos, costeiros e de plataforma (CPRM, 2014). Toda essa variação geológica, aliada ao processo de beneficiamento, pode gerar materiais rejeitados com características distintas, mesmo quando provenientes de um mesmo afloramento.

Os resíduos R2 a R5 por sua vez, são oriundos do processo de beneficiamento de feldspato, retirados de rochas quartzo-feldspáticas (saibro). São materiais arenosos compostos principalmente de fragmentos de rocha e minerais, conhecidos como finos ou rejeitos de saibro. Esses resíduos são compostos predominantemente de partículas finas de argila e outros materiais menores que não são aproveitados no processo de beneficiamento.

3.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

O processo de caracterização das massas cerâmicas foi uma etapa determinante para o desenvolvimento do diagnóstico de referência mineral. Pois conhecer as propriedades das formulações utilizadas pelas indústrias da região foi de extrema importância para a discussão do desenvolvimento tecnológico do setor. Essas propriedades físicas, químicas e morfológicas auxiliam na qualidade e durabilidade dos produtos finais.

As massas das indústrias cerâmicas da região são comumente compostas por meio de blendagem de diferentes argilas e argilitos, e em alguns casos também de resíduos, como por exemplo a utilização da quebra de produtos cerâmicos (chamote) e da cinza da casca do arroz (subproduto da agro-indústria presente na região do CVMF).

3.3.1 Umidade

O teor de umidade é extremamente importante no processo de produção cerâmico, influenciando a qualidade, a durabilidade e as propriedades físico-químicas dos produtos. Essa propriedade foi estudada tanto das massas cerâmicas, para avaliação do teor de umidade de trabalho empregada nas indústrias da região, quanto dos minerais subutilizados, para obtenção do teor de umidade *in natura* presente originalmente nesses materiais. Foi obtida por meio da desidratação dos materiais aplicando a Equação 1 (Estufa DeLeo Nº 8, 100 °C $\pm$ 5 °C). Este procedimento está

de acordo com a norma técnica NBR 16097:2012 (ABNT, 2012) e os ensaios foram realizados no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha de MF - Labcer.

$$U = \frac{(m_u - m_s)}{m_u} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U = teor de umidade das amostras (%).

m_u = massa úmida das amostras (g).

m_s = massa seca das amostras (g).

3.3.2 Plasticidade

A plasticidade é uma das principais características para materiais argilosos que são conformados por extrusão. As massas estudadas e os minerais subutilizados tiveram a plasticidade investigada pelo método de Atterberg (Atterberg, 1911), que consistiu na obtenção do limite líquido (LL) conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016a), e o limite plástico (PL), conforme a NBR 7180 (ABNT, 2016b). A preparação das amostras foi realizada conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016c). De acordo com esses limites obtidos, foi possível encontrar o Índice de Plasticidade, por meio da Equação 2. Tal ensaio foi realizado nas instalações do SENAI-Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Onde:

IP = Índice de Plasticidade.

LL = Limite Líquido.

LP = Limite Plástico.

Uma vez descoberto, o índice de plasticidade dos minerais subutilizados foi avaliado de acordo com a classificação de Burmister, (1949). Com base nessa classificação, os materiais foram categorizados em faixas de baixa, média e alta plasticidade, o que permitiu identificar suas características de trabalhabilidade e adequação ao processamento cerâmico. Os minerais com baixo índice de plasticidade apresentaram limitações em termos de coesão e moldabilidade, sugerindo a necessidade de ajustes na formulação das massas cerâmicas para otimizar o desempenho durante a extrusão. Já os materiais com alta plasticidade,

embora mais desafiadores no controle de retração e secagem, mostraram potencial para serem utilizados como aditivos em misturas que demandam maior flexibilidade durante a conformação.

Quadro 1 - Classificação das argilas conforme Índice de Plasticidade (IP).

IP	Classificação
0	Não plástico
1-5	Pouco plástico
5-10	Baixa plasticidade
10-20	Média plasticidade
20-40	Alta plasticidade
>40	Muito plástico

Fonte: Burmister, (1949).

3.3.3 Resíduo bruto

O resíduo bruto é uma fração não argilosa encontrada na massa, do qual é necessária alguma desagregação (Zaccaron *et al.*, 2014). O ensaio para obtenção do resíduo bruto é adotado como critério por algumas empresas da região, e foi realizado para estabelecer a qualidade do produto por meio da fração do material retido em peneira #325 MESH (44 μm) e aplicado na Equação 3. Posteriormente essa fração retida foi segregada pelo método de peneiramento conforme Oliveira, (2011), em peneiras #100 MESH (149 μm), #150 MESH (105 μm), #200 MESH (74 μm) e #325 (44 μm) e agitadas em um agitador eletromagnético (Bertel) por 10 min, para analisar as frações residuais. Este ensaio foi realizado no Laboratório de cerâmica do Instituto de Engenharia e Tecnologia IDT/UNESC.

$$Rb = \frac{m_r}{m_{am}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Rb = resíduo bruto (%).

m_r = massa retida (g).

m_{am} = massa amostra inicial (g).

Importante ressaltar que a presença do resíduo bruto se faz de forma natural nas argilas, podendo variar em quantidade e granulometria, estando associada a geologia (ou formação geológica) da região. O processo produtivo tende a cominuir essa fração (como por exemplo no

laminador). Entender o teor de material $>44\ \mu\text{m}$, pode ser um fator determinante na hora de realizar o blende. Salientando, que muitas das empresas da região do APL utilizam o R.B. como controle granulométrico das massas cerâmicas, por ser uma análise tecnicamente fácil e rápida de se realizar.

3.3.4 Distribuição do tamanho de partículas

A distribuição do tamanho de partículas (DTP) foi investigada pelo método de sedimentação (analisador SediGraph III Plus V1.00) por gravidade monitorada por raios-X; cálculos com base na lei de Stokes e Beer (Beer, 1852; Stokes, 1844), onde inicialmente foi peneirado o material para separação das partículas mais grosseiras (#230 MESH), para posterior análise. Ao final, todas as frações foram consideradas.

Este ensaio foi realizado para as fontes primárias e secundárias e para as massas cerâmicas. O conhecimento do tamanho de partícula auxilia na otimização do processamento cerâmico, bem como para evitar o surgimento de defeitos, pois o tamanho das partículas influencia diretamente nas propriedades da massa cerâmica e consequentemente, no desempenho e qualidade do produto final, em alguns casos pode afetar a resistência mecânica, a permeabilidade e a densidade do material. Conhecer a DTP das matérias-primas estudadas se faz necessário para realizar uma distribuição bem balanceada dos tamanhos de partículas em uma massa cerâmica pois, assim se pode minimizar a retração desigual durante a secagem e queima do produto. O presente ensaio foi realizado no Centro de serviços em materiais cerâmicos CRC.

3.3.5 Análise química

A determinação da análise química quantitativa das amostras estudadas foi realizada pelo método de espectrometria de fluorescência de raio-X (Espectrômetro Epsilon 3^{XLE} Panalytical, com pastilha fundida). Esse ensaio é o método mais comum na obtenção dos óxidos presentes em amostras argilosas (Comin *et al.*, 2021). A caracterização química foi de grande importância para conhecer os óxidos presentes nas massas cerâmicas da região e nas fontes primárias e secundárias, pois fornece informações essenciais sobre quais os óxidos presentes nas argilas estudadas. Este ensaio foi realizado no laboratório da Safira Soluções Minerais.

3.3.6 Análise mineralógica

As fases cristalinas presentes nas amostras foram determinadas por difratometria de raios-X (Siemens, D-5000), radiação incidente Cu K α (λ = 1,54 Å), aceleração de 40 kV e 30 mA, intervalo 2 θ de 3 a 73°, velocidade de 2°/min e a quantificação das fases cristalinas foram identificadas pelo método de Rietveld (Rietveld, 1969), usando o software PANalytical X'Pert HighScore Plus® versão 2.0. A determinação de fases cristalinas dos materiais que abastecem o setor cerâmico (Albers *et al.*, 2002) permitiu a identificação dos minerais presentes (Varela *et al.*, 2005) essa identificação é de extrema importância pois é possível verificar quais argilominerais estão presentes nas matérias-primas e nas massas cerâmicas, como caulinita, illita, montmorilonita, etc, bem como outros minerais contido nas matérias-primas estudadas, como quartzo e feldspatos. Isso é fundamental, pois os diferentes minerais possuem propriedades específicas que afetam o comportamento da argila durante o processamento cerâmico. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Difratometria de Raio X, no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS.

3.3.7 Obtenção dos sais solúveis

Foi realizado a determinação do Teor de Sais Solúveis (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) dos minerais subutilizados pela medição de cátions e ânions no extrato aquoso (Menezes *et al.*, 2006). As argilas tendem a apresentar conteúdos variáveis de sais solúveis ricos em elementos alcalinos e alcalinos terrosos, do tipo sulfatos de cálcio e magnésio, que podem causar eflorescências em produtos cerâmicos, prejudicando sua qualidade (Cáceres, Molina e García, 2015).

3.3.8 Classificação das fontes minerais secundárias

Os minerais argilosos de fonte secundárias (resíduos) foram classificados com base na NBR 10004 – classificação de resíduos sólidos (ABNT, 2004a); NBR 10005 – procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004b), NBR 10006 – procedimento para obtenção de extração solubilizada de resíduos sólidos (ABNT, 2004c); NBR 10007 – amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004d), e a metodologia baseada em SW 846-3050B (USEPA, 1986). Esse ensaio se faz de suma importância, para avaliação das características ambientais, visando a aplicação desses materiais no processo industrial.

4 RESULTADOS

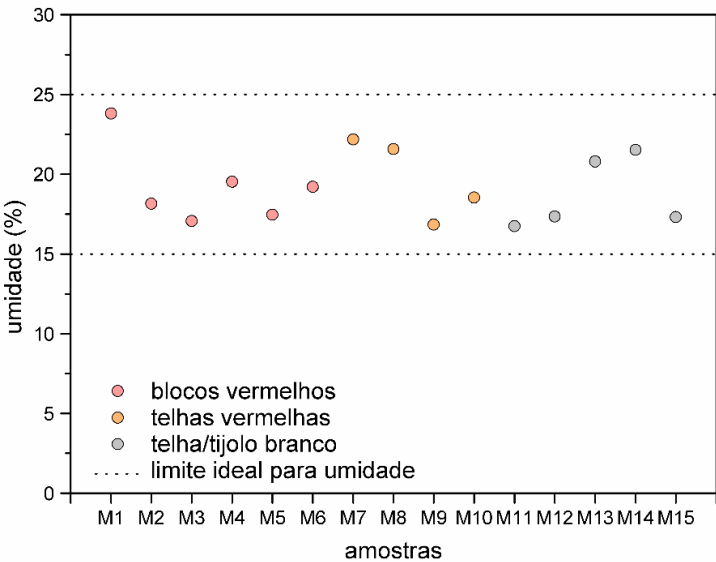
4.1 DIAGNÓSTICO DE REFERÊNCIA MINERAL

Nesta etapa foram apresentados os resultados dos testes que caracterizam as massas cerâmicas estudadas, que determinaram diretrizes para o uso dos minerais subutilizados.

4.1.1 Umidade

Os teores de umidade das massas cerâmicas são apresentados na Figura 15. Observa-se que os valores de umidade das massas variam de acordo com o posicionamento indicado pelos limites propostos por Dondi, (2003), com teores de umidade entre 15% a 25%.

Figura 15 - Gráfico com a indicação do teor de umidade das massas cerâmicas utilizadas pelo APL-CVMF.



Fonte: Autora (2024).

Considerando-se que a água contida nas matérias-primas desenvolve propriedades reológicas importantes, como a plasticidade e, permite que ela seja formada e mantenha a geometria (Vignes *et al.*, 2013), e para que se possa extrudar uma massa cerâmica é imprescindível

que a argila tenha um teor adequado de umidade para garantir que a massa seja maleável o suficiente para ser extrudada, mas firme o suficiente para manter sua forma. Nota-se que nesse quesito, as massas não apresentaram uma singularidade baseado no tipo de produto que está sendo produzido, e que está diretamente ligado a indústria, e suas particularidades, como descanso da argila e mistura. Salienta-se que quando há umidade em excesso ou quantidade insuficiente, afeta a eficiência da extrusão e a qualidade final das peças, ocasionando problemas durante as etapas de fabricação, desde a moldagem até a secagem e queima (Moraes e Spoto, 2006). Com base nisso, é possível observar que as empresas estão trabalhando majoritariamente <20%, prevalecendo um menor teor de umidade. Destaca-se que a umidade não é um fator que irá influenciar as demais características das massas cerâmicas, e sim, diretamente ao processo fabril, como a dureza de extrusão e etapa de secagem, como supracitado.

4.1.2 Plasticidade

O índice de plasticidade (IP) das massas cerâmicas é apresentado na Tabela 1. O IP pode variar dependendo do modo de preparação de cada cerâmica, bem como das características das matérias-primas usadas na mistura. Destaca-se que as massas de blocos de vedação apresentaram menor IP ($17,66 \pm 4,61$), seguido dos produtos brancos ($23,54 \pm 8,05$) e por fim, o maior IP nas telhas vermelhas ($25,97 \pm 6,53$). Maiores IP estão ligados diretamente a menor tamanho de partícula, e associado a maiores teores de argilominerais. No caso dos blocos de vedação (M1 a M6) o uso de grãos maiores é normalmente utilizado, pois auxiliam no processo de escoamento na secagem, minimizando os problemas de trincas. A conformação de telhas, está associada ao fator de empacotamento e com isso, a necessidade de minimizar os grãos maiores na massa, o que reflete no aumento do IP, como pode-se observar nas massas de telhas vermelhas (M7 a M10) (Vieira, Soares e Monteiro, 2003). Já as massas para produtos brancos e mesclados (M11 a M15) apresentaram um IP numa zona intermediária, entretanto nesse caso, salienta-se que há massas para fabricação de telhas, tabelas e tijolos.

Um estudo conduzido por Marsigli e Dondi, (1997), com materiais italianos, classificou o IP de misturas dentro de um range de 11 a 35, estando as massas do diagnóstico dentro desse range ($11,89 - 34,63$).

Com base nos resultados obtidos, desenvolveu-se um diagrama com o índice de trabalhabilidade de argilas (Figura 16) conforme estabelecido por Bain, (1987). Nesse diagrama pode-se observar que

majoritariamente as massas estão dentro de uma zona estabelecida apropriada para o processo de extrusão, com exceção de uma das amostras, que apresentou um limite plástico superior ao proposto.

Uma possível explicação para que M7 tenha ficado fora da zona de extrusão está na deficiência de desplastificantes (como areias, por exemplo). Muito embora isso seja verdade, deve-se levar em consideração alguns pontos, como a empresa pode ter se adequado a massa com essas características, ou devido a grande variação das argilas na região, não há um controle técnico no processo de blendas, havendo a possibilidade de uma leve flutuação das propriedades da massa, ocasionando essa não-inserção dessa massa na zona de extrusão.

Para as amostras estudadas por Marsigli e Dondi, (1997), em torno de 88% das amostras ficaram conditas na zona de extrusão, e aquelas que ficaram as margens, estão num enquadramento denominado de corretiva. Portanto, sendo um comportamento descrito como normal, levando em consideração que a maioria das amostras estão na zona de extrusão.

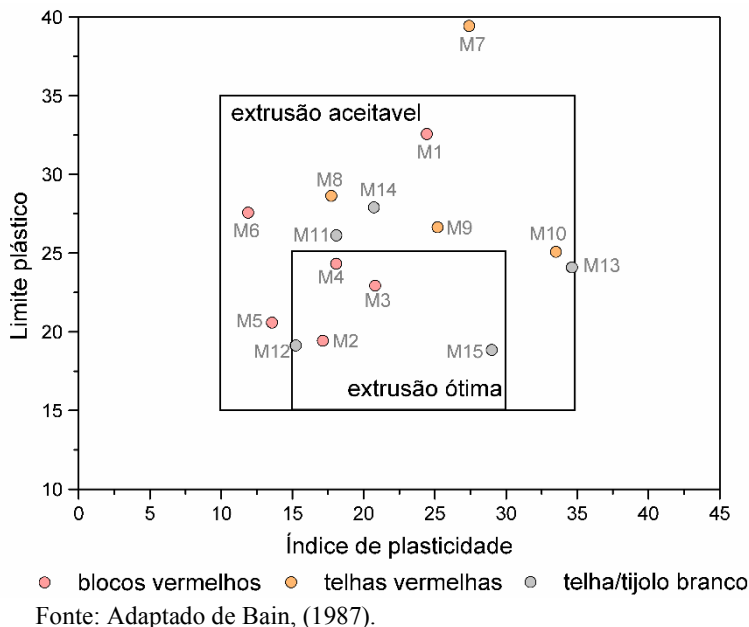
De acordo com isso, fica evidenciado, após >90% das amostras estarem dentro das zonas de extrusão, que as massas da região do APL apresentam características plásticas aptas ao processo de conformação.

Tabela 1 - Valores obtidos para limite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidade (IP), para as massas estudadas.

Materiais	LL	LP	IP
M1	57,02	32,57	24,45
M2	36,58	19,43	17,15
M3	43,75	22,93	20,82
M4	42,4	24,32	18,08
M5	34,16	20,58	13,58
M6	39,45	27,56	11,89
M7	66,84	39,43	27,41
M8	46,36	28,63	17,73
M9	51,84	26,64	25,2
M10	58,6	25,08	33,52
M11	44,21	26,12	18,09
M12	34,36	19,13	15,23
M13	58,72	24,09	34,63
M14	48,64	27,9	20,74
M15	47,85	18,85	29

Fonte: Autora (2024).

Figura 16 - Gráfico das propriedades plásticas das massas cerâmicas de referência mineral.



4.1.3 Resíduo bruto

O ensaio de resíduo bruto (R.B.) consiste em analisar por peneiramento a fração $>44 \mu\text{m}$ (#325 MESH), que é formado majoritariamente por sílica livre (Zaccaron *et al.*, 2024). Os resultados obtidos nas massas cerâmicas de referência mineral (Tabela 2) apontam uma variação de 7,77 a 25,06 %. Ressalta-se que a presença de resíduo bruto na massa de forma controlada é importante para o processamento cerâmico (Crozetta *et al.*, 2016). Os resíduos grossos facilitam a extrusão e a secagem, mas em contra partida a resistência mecânica fica comprometida. Os resíduos mais finos são piores, pois, além de prejudicarem a extrusão alteram a regulação da boquilha, prejudicando a secagem e dificultando drasticamente a retirada de ar da massa (Oliveira, 2011). Com base nisso, algumas das cerâmicas participantes do diagnóstico de referência, utilizam o resíduo bruto como um critério na hora de desenvolvimento das formulações.

Observa-se uma variação entre ~14 e 25 % (blocos vermelhos), ~7,7 e 18 % (telhas vermelhas) e ~14 e 22 % (produtos brancos). Nota-se

que os blocos apresentam maior teor de R.B., onde M5 ilustra 25,06%, o maior teor. Ainda com teores >20%, enquadram-se M2 (21,18%), M12 (22,52%) e M13 (22,69%), estando o primeiro nos blocos vermelhos e os dois próximos em telhas vermelhas.

É possível observar que M7 apresentou R.B. de 7,77% o menor teor entre as massas estudadas, o que pode estar diretamente ligado ao alto LP (ver Figura 16).

Outro fator de relevância está na distribuição das frações do R.B., do qual a peneira #100 MESH, apresenta uma variação de ~2 a 14% de grãos retidos, cuja maioria está <10%. Já para #150 MESH essa distribuição ficou <1%, apresentando na maioria valores insignificantes. A malha #200 MESH por sua vez, apresentou uma variação de grãos retidos de 1 a 7%, onde os maiores teores estão nos blocos vermelhos e nos produtos brancos. Por fim, a malha #325 MESH apresentou a menor variabilidade expressiva (~3,5 e 5,8 %).

Tabela 2 - Valores obtidos de resíduo bruto (R.B.), e a distribuição do tamanho de partículas das frações >44µm das massas estudadas.

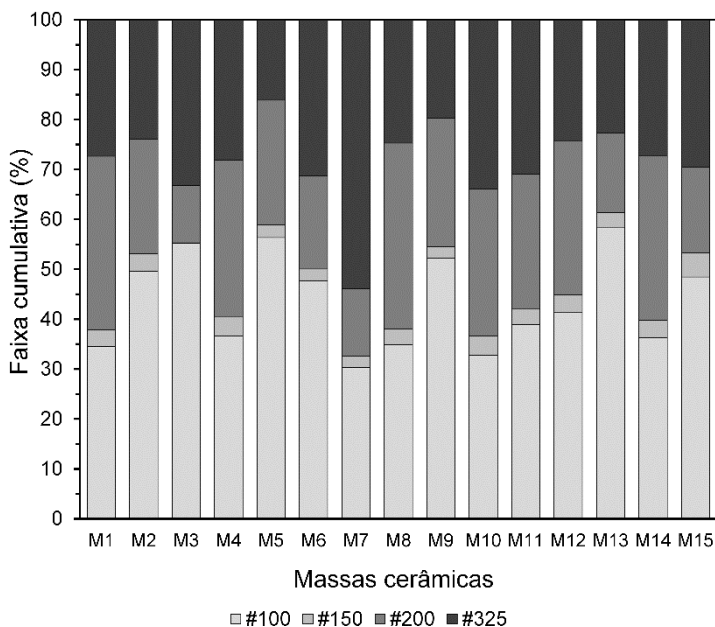
Materiais	R.B. % (>44µm)	Teor retido (%)			
		#100	#150	#200	#325
M1	14,44	4,98	0,48	5,03	3,95
M2	21,18	10,5	0,76	4,84	5,08
M3	15,18	8,37	0,05	1,72	5,04
M4	19,45	7,12	0,74	6,12	5,47
M5	25,06	14,12	0,64	6,26	4,04
M6	15,29	7,3	0,35	2,85	4,79
M7	7,77	2,35	0,18	1,05	4,19
M8	15,17	5,29	0,48	5,65	3,75
M9	18,55	9,7	0,4	4,8	3,65
M10	13,04	4,28	0,5	3,83	4,43
M11	14,45	5,62	0,45	3,91	4,47
M12	22,52	9,3	0,8	6,97	5,45
M13	22,69	13,23	0,68	3,64	5,14
M14	16,01	5,8	0,56	5,3	4,35
M15	19,67	9,53	0,96	3,37	5,81

Fonte: Autora (2024).

A Figura 17 ilustra a fração cumulativa da distribuição do tamanho de partículas dos resíduos brutos obtidos por peneiramento das massas cerâmicas. Verificou-se uma tendência da produção de blocos (M1 a M6) e tavela (M13) e ter um teor maior da fração mais grosseira (>149 µm).

Isso se dá pelo fato de que os fabricantes de blocos usam grãos para auxiliar, sobretudo no escoamento da umidade durante a secagem, e não têm problemas de rugosidade superficial, que os grãos podem ocasionar. As telhas (M7 a M12) e os tijolos a vista (M14 e M15) por sua vez, acabam tendo um maior controle da rugosidade superficial (Fernandes *et al.*, 2012).

Figura 17 - Gráfico com a distribuição de partículas dos resíduos brutos das massas cerâmicas de referência mineral.



Fonte: Autora (2024).

4.1.4 Distribuição do tamanho de partículas

A Figura 18 apresenta o diagrama de Winkler, que ilustra a localização das massas cerâmicas estudadas. Este diagrama permite compreender o sistema cerâmico com base em três faixas de variação do tamanho de partícula, que são: (1) fração argila, com diâmetro $\phi < 2 \mu\text{m}$; (2) fração silte, com $2 \mu\text{m} < \phi < 20 \mu\text{m}$; e (3) fração areia, com $\phi > 20 \mu\text{m}$. O tamanho das partículas de uma argila pode estar relacionado ao tipo de

se obtenha uma composição granulométrica adequada para a massa cerâmica (Goel *et al.*, 2021).

Por fim, a Tabela 3 ilustra as frações cumulativas das massas cerâmicas estudadas. É possível ver uma variação de 20,57 μm – 67,48 μm para D_{90} , e essa variação diminui para D_{50} (0,40 μm – 6,07 μm). Essa análise mostra que em média os blocos vermelhos (M1 a M6) e a tábua (M13) apresentam granulometria mais grosseira (D_{90} - $\bar{x}=63,45 \pm 6,53$ e D_{50} - $\bar{x}=2,75 \pm 1,77$) em relação aos demais produtos estudados. Um ponto bastante importante de salientar é que as telhas vermelhas (M7 a M10) apresentam granulometria mais fina em relação as telhas brancas/mescladas (M11 e M12) (telhas vermelhas D_{90} - $\bar{x}=29,71 \pm 8,23$ / D_{50} - $\bar{x}=0,51 \pm 0,15$ e telhas brancas/mescladas D_{90} - $\bar{x}=61,13 \pm 6,10$ / D_{50} - $\bar{x}=2,53 \pm 0,61$), esse fator pode estar diretamente ligado as matérias primas utilizadas ao processo produtivo desses materiais. Já os tijolos de parede a vista brancos/mesclados (M14 e M15) apresentam tamanho de partículas em D_{90} muito similares (D_{90} tijolos a vista brancos/mesclados $\bar{x}=59,17 \pm 2,74$) a das telhas brancas/mescladas, entretanto, a D_{50} são tamanhos menores (D_{50} tijolos a vista brancos/mesclados $\bar{x}=0,64 \pm 0,15$).

Tabela 3 - Frações cumulativas (10%, 20%, 50%, 90%) das massas cerâmicas de referência mineral.

Materiais	Frações cumulativas (μm)			
	D_{90}	D_{50}	D_{20}	D_{10}
M1	61,04	1,36	0,18	0,18
M2	66,40	3,61	0,21	0,18
M3	49,64	2,16	0,21	0,18
M4	65,69	1,46	0,10	0,10
M5	67,48	6,07	0,52	0,22
M6	65,34	3,42	0,25	0,18
M7	20,57	0,45	0,18	0,18
M8	27,98	0,73	0,18	0,18
M9	40,51	0,40	0,18	0,18
M10	29,78	0,44	0,18	0,18
M11	56,81	2,10	0,18	0,18
M12	65,44	2,96	0,18	0,18
M13	68,54	1,14	0,18	0,18
M14	57,23	0,53	0,18	0,18
M15	61,11	0,75	0,18	0,18

Fonte: Autora (2024).

As frações cumulativas D_{20} e D_{10} , já apresentam uma homogeneidade no tamanho de grãos, apresentando maior granulometria apenas algumas massas de blocos (M2, M3, M5 e M6).

4.1.5 Análise química

A caracterização química das argilas estudadas (Tabela 4) ilustram predominantemente a presença de sílica (SiO_2) seguido de alumina (Al_2O_3). Esses óxidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) são os principais componentes da argila (Benedet *et al.*, 2024) e constituem $>80\%$ das amostras de referência.

Os óxidos alcalinos ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) e alcalino-terrosos ($\text{CaO} + \text{MgO}$), denominados como óxidos fundentes, apresentam baixos teores (entre ~ 1 e $\sim 3\%$), o que pode resultar em baixa formação de fase vítrea durante a queima (Dias *et al.*, 2017; Kong *et al.*, 2004; Pei *et al.*, 2023).

Já os óxidos cromóforos ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) são responsáveis pelo fomento da coloração das peças cerâmicas (Mapuna *et al.*, 2023). Normalmente, o produto cerâmico ilustra tons avermelhados, em função da presença do ferro. Com isso, nota-se que os maiores teores de Fe_2O_3 estão nas telhas vermelhas (~ 5 a 7%) que necessitam da tonalidade mais uniforme. O que não se aplica ao bloco vermelho, muito embora apresentem teores desse óxido em valores que variam de ~ 4 a 6% , as indústrias que fabricam blocos não procuram se adequar a questão da cor.

Por fim, um fator notável, que as peças de coloração branca apresentam teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 < \sim 3\%$, ilustrando que a tonalidade buscada, necessita de valores menores desse óxido em função da cor. Já o TiO_2 também apresenta valores maiores ($>1,25\%$) nas massas de produtos brancos, o que pode estar associado as tonalidades buscadas para este produto. Nota-se também que esse óxido apresenta teores $>1\%$ em telhas vermelhas, o que muito possivelmente, está baseado na origem das matérias primas utilizadas. Devido a necessidade de argilas plásticas, essas são extraídas de áreas de cavas alagadas, e possuem em alguns casos a presença de anatase (Saviatto *et al.*, 2023). Para os blocos vermelhos, que utilizam muitas vezes argilas arenosas na mistura, tende a inibir esse óxido, ficando teores menores, em relação aos demais.

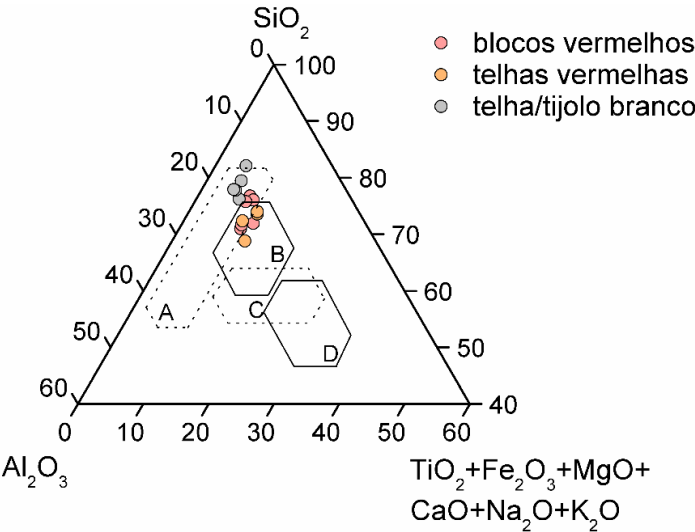
Com base nisso, ao plotar o diagrama ternário, SiO_2 - Al_2O_3 - outros óxidos propostos por (Fabbri e Fiori, 1985), as massas cerâmicas de referência mineral da região de Morro da Fumaça se distribuem em uma faixa estreita de sílica, alumina e outros óxidos de acordo com suas composições mineralógicas (Figura 19).

Tabela 4 - FRX das massas cerâmicas de referência mineral.

Materiais	Óxidos (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	P.F.
M1	64,78	17,88	1,47	0,15	5,35	1,14	0,17	0,33	8,57
M2	71,48	14,23	1,32	0,14	4,44	1,08	0,14	0,31	6,74
M3	67,61	16,15	2,19	0,26	5,92	0,96	0,13	0,78	5,81
M4	66,39	17,72	1,93	0,24	4,73	1,07	0,27	0,31	7,2
M5	70,86	14,1	1,69	0,25	4,65	1,08	0,1	0,46	6,71
M6	70,645	15,31	1,34	0,12	4,45	1,05	0,06	0,27	6,62
M7	63,22	18,41	1,74	0,1	6,62	1,11	0,11	0,57	7,98
M8	66,83	17,19	1,29	0,19	5,21	1,14	0,1	0,39	7,51
M9	68,56	14,66	1,37	0,29	6,27	1,23	0,2	0,59	6,67
M10	68,86	14,48	0,83	0,08	7,08	1,42	0,09	0,24	6,78
M11	73,4	14,1	0,65	0,16	2,36	1,38	0,13	0,22	7,49
M12	76,21	12,25	0,59	0,14	2,05	1,35	0,12	0,11	7,05
M13	69,65	15,72	0,81	0,16	3,27	1,34	0,12	0,31	8,51
M14	71,63	15,66	0,64	0,07	2,53	1,25	0,09	0,24	7,8
M15	71,32	15,72	0,49	0,06	2,43	1,26	0,11	0,16	8,35

P.F.: Perda ao Fogo
Fonte: Autora (2024).

Figura 19 - Ternário da composição química das massas cerâmicas de referência mineral.



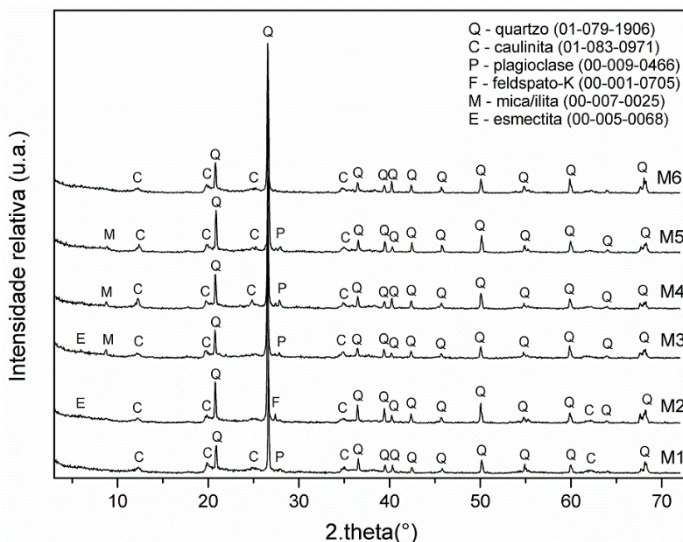
Os campos referem-se a argilas para ladrilhos de grés (A = corpos brancos, B = corpos vermelhos) e ladrilhos porosos (C = cottoforte, D = majólica)
Fonte: Adaptado de Fabbri e Fiori, (1985).

As divisões no diagrama referem-se às argilas para materiais cerâmicos italianos, ladrilhos grés e porosos (Fabbri e Dondi, 1995; Fiori *et al.*, 1989). Pode-se observar que as massas de referência estão distribuídas entre as áreas de corpos brancos e corpos vermelhos. As telhas e tijolos brancos/mesclados estão majoritariamente em corpos brancos, as telhas vermelhas nos corpos vermelhos, em uma área de transição, e os blocos vermelhos já na zona de transição dos corpos vermelhos aos corpos brancos. Conclui-se que as massas cerâmicas de referência apresentam composições químicas aparentemente semelhantes aos produtos cerâmicos da Itália.

4.1.6 Análise mineralógica

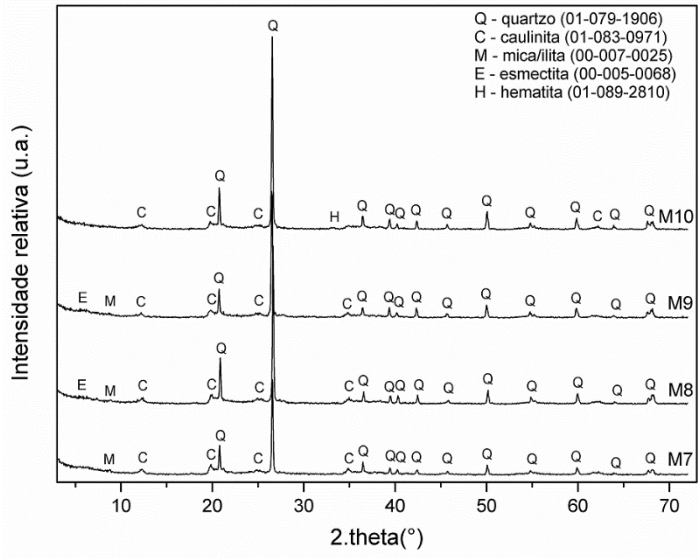
Por meio da análise mineralógica é possível observar uma dada similaridade e algumas particularidades nos conjuntos de massas cerâmicas estudadas (Figura 20 a Figura 22). Todas as formulações apresentaram quartzo (SiO_2 – cartão JCPDS n. 01-079-1906) e o argilomineral caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – cartão JCPDS n. 01-083-0971), o que se pode supor que se tratam de argilas cauliníticas utilizadas nas formulações.

Figura 20 - Difratogramas de raios-X das massas de blocos vermelhos.



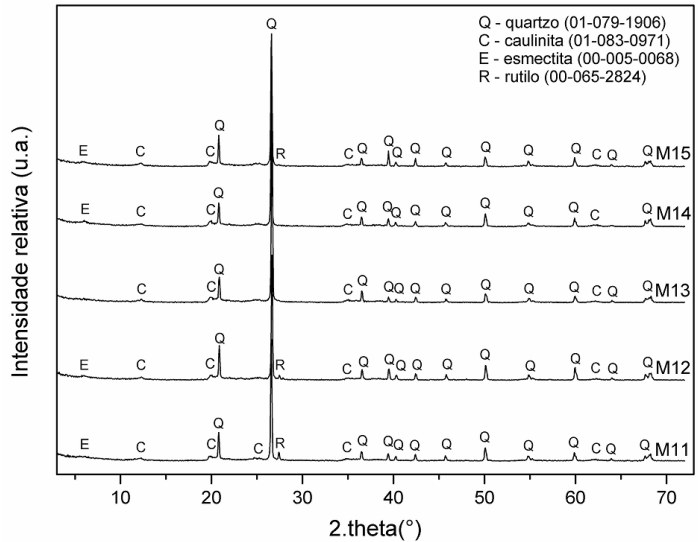
Fonte: Autora (2025).

Figura 21 - Difratomogramas de raios-X das massas de telhas vermelhas.



Fonte: Autora (2025).

Figura 22 - Difratomogramas de raios-X das massas de produtos branco/mesclado.



Fonte: Autora (2025).

Outros argilominerais também estão presentes, como é o caso da mica/ilita ((K,H₃O)(Al, Mg, Fe)₂(Si, Al)₄O₁₀[(OH)₂(H₂O)] – cartão JCPDS n. 00-007-0025) e esmectita (Al₂Si₄O₁₀(OH)₂ – cartão JCPDS n. 00-005-0068). Esse conjunto de argilominerais são a base das massas cerâmicas, pois são as que conferem a possibilidade de moldagem. Além desses minerais, as massas dos blocos vermelhos tiveram a presença dos feldspatos, como plagioclase ((Na,Ca)(Al,Si)₄O₈ - cartão JCPDS n. 00-009-0466) e feldspato-K (KAlSi₃O₈ - cartão JCPDS n. 00-001-0705). Esses minerais feldspáticos apresentam grandes propriedades após queima, devido sua presença de óxidos fundentes. Uma particularidade, está na presença de hematita (Fe₂O₃ - cartão JCPDS n. 01-089-2810) em uma formulação de telha vermelha. Esse mineral é comumente encontrado em argilas, e afere a coloração vermelha no produto cerâmico. Por fim, os produtos de coloração brancas apresentaram o mineral rutilo (TiO₂ - cartão JCPDS n. 00-065-2824), que pode estar associado a origem da coloração específica que esse produto é aferido.

Essa similaridade pode estar diretamente ligada a origem geológica das matérias-primas utilizadas no processo de formulação das indústrias cerâmicas da região, que estão contidas em jazidas muito próximas.

4.2 FONTES MINERAIS SUBUTILIZADAS

4.2.1 Umidade

A umidade *in natura* dos minerais subutilizados estudados (Tabela 5) ilustra o teor de umidade intrinsecamente ligado de sua origem. As argilas de cavas alagadas tendem a ter um maior teor de umidade, enquanto as argilas de morro apresentam um teor menor. É muito importante ressaltar que durante o processo de descanso e blenda haja uma homogeneização dessa umidade, para que atenda às especificações do processo de extrusão.

Tabela 5 - Teor de umidade *in natura* (U%) das fontes minerais subutilizadas (A) primárias e (R) secundárias

A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
U%	32,15	18,69	13,47	6,14	20,90	27,12	35,09	24,56	26,20	20,96
R	R1	R2	R3	R4	R5					
U%	18,44	25,53	19,24	28,57	25,54					

Fonte: Autora (2024).

As argilas de cavas alagadas (A1, A8 e A9) apresentam teores de umidade *in natura* >25%. As argilas A6 e A7, que são originárias de encostas, também apresentam um teor de umidade *in natura* >25 %, o que pode estar associado a pluviometria da região na época da coleta (ano de 2023). Salienta-se que essas argilas são de minas estagnadas, que apresentam o perfil exposto, e possivelmente, devido a alta reatividade, hidratam-se de forma mais expressiva. As demais argilas (A2, A3, A4, A5 e A10) que são oriundos de extração de encosta apresentaram teores de umidade *in natura* <20%, com destaque a A4 que é um argilito e apresentou um teor de 6,14%.

Por fim, os resíduos apresentam teores de umidade que basicamente estão associados ao processo do qual os mesmos passaram. O resíduo R1, que é extraído do filtro prensa apresenta um teor de ~18%. Já os resíduos de saibro, que são acondicionados em bacias de rejeito, ficando exposto no tempo, e apresentaram um teor que variou de 19 a 29%, podendo ter alterações devido as condições pluviométricas.

4.2.2 Plasticidade

Na Tabela 6 é possível verificar as características plásticas das fontes primárias (argilas) e fontes secundárias (resíduos) estudadas. Os valores de plasticidade variam dependendo do clima da região onde foram coletadas.

Podemos verificar que as argilas (A1, A5, A6, A7, A8 e A10) são de média plasticidade apresentando uma capacidade intermediária de ser moldadas sem quebrar ou perder a forma. Elas têm um índice de plasticidade (IP) que variou entre (10,38 a 16,93), o que as torna mais fáceis de modelar do que argilas de baixa plasticidade, mas ainda com certa resistência, como as de alta plasticidade.

Já as argilas A2 e A9 são consideradas de baixa plasticidade pois apresentam IP de (6,04 a 6,33) elas têm capacidade limitada de ser moldadas sem quebras ou deformações excessivas, e sua estrutura é mais rígida em comparação com argilas de maior plasticidade.

As argilas A3 e A4 são consideradas de pouca plasticidade, IP de (4,55 a 4,59). Elas apresentam uma capacidade extremamente limitada de moldagem, sendo difíceis de deformar sem quebras.

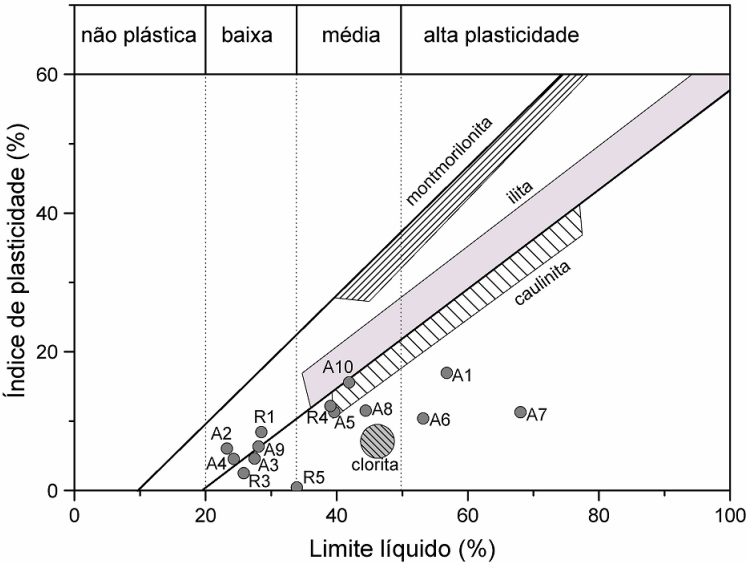
Os resíduos por sua vez apresentaram índices de plasticidades variados desde não plásticos (R2 e R5), quanto resíduos com pouca plasticidade R3, baixa plasticidade R1, e R4 apresentando média plasticidade.

Tabela 6 - Valores obtidos para limite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidade (IP), para os minerais subutilizados estudados.

Materiais	LL	LP	IP
A1	56,81	39,88	16,93
A2	23,25	17,21	6,04
A3	27,49	22,9	4,59
A4	24,29	19,74	4,55
A5	39,66	28,36	11,3
A6	53,21	42,83	10,38
A7	68,06	56,77	11,29
A8	44,44	32,93	11,51
A9	28,07	21,74	6,33
A10	41,89	26,31	15,58
R1	28,53	20,12	8,41
R2	ND	ND	ND
R3	25,83	23,34	2,49
R4	39,05	26,88	12,17
R5	33,93	33,5	0,43

ND: Não detectado
Fonte: Autora (2024).

Figura 23 - Correlação entre índice de plasticidade e limite líquido dos minerais subutilizado estudados.



Fonte: Autora (2024).

A correlação entre o índice de plasticidade e o limite líquido tanto das fontes primárias quanto secundárias está ilustrada na Figura 23. Com base nesse gráfico, pode-se extrair algumas informações pertinentes sobre os materiais estudados. Conforme a classificação proposta Burmister, (1949), situam-se entre as faixas de pouca plasticidade e baixa plasticidade as argilas A2, A3, A4 e A9 e os resíduos R1, R3 e R5. Esses valores correspondem aos demonstrados na Figura 23. Para o processo de extrusão, é necessário um teor aceitável de plasticidade, de modo que se conclui que esses materiais devem ser dosados de forma bastante controlada em possíveis formulações. Os demais materiais (argilas A1, A5, A6, A7, A8, A10 e resíduo R4) ficaram entre as faixas de média e alta plasticidade. É imprescindível notar que as massas estudadas na Etapa I apresentaram uma variação do índice de plasticidade (IP) entre 11,89 e 33,52 e do limite líquido (LL) entre 34,16 e 66,84 (Tabela 1) deixando as massas nesse intervalo.

4.2.3 Resíduo bruto

Os valores obtidos para o resíduo bruto são expressos na Tabela 7 e correlacionados com os teores obtidos para as massas estudadas (Figura 24). É possível observar uma grande variação na distribuição do R.B., o que leva a crer que por esse motivo muitos desses materiais não são aproveitadas pelo setor, que carece de conhecimento técnico para desenvolvimento de formulações. Os materiais que apresentam teores de R.B. muito elevados (superiores a >40% por exemplo) devem ser incorporados em quantidades moderadas, para atingir os limites necessários ao melhor processamento industrial. O gráfico da Figura 24 ilustra de forma mais didática essa distribuição, na qual o limite máximo (22,8%) está associado a conformação de blocos cerâmicos, que permitem uma dosagem maior do teor de grãos >44 μm , e o limite mínimo (9,1%) por sua vez, está relacionado à região para fabricação de telhas vermelhas, que precisam de maior densificação de conformação, e dentro desses limites, também estão os produtos de coloração branca.

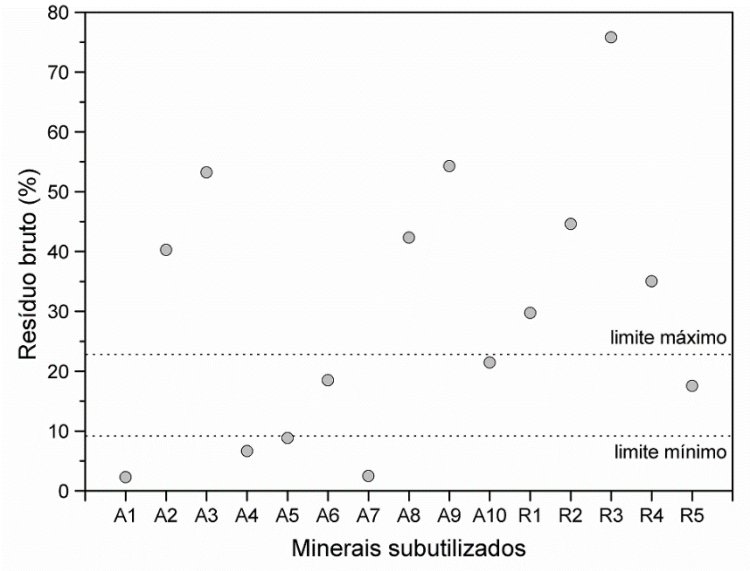
Esse intervalo foi determinado por meio da média das amostras estudadas na Etapa I – Diagnóstico de referência mineral, e serve como um indicador na proposição de desenvolvimento de formulações por meio do teor de R.B. É extremamente importante salientar que na região do APL-CVMF, muitas das indústrias cerâmicas usam o R.B. como um controlador de granulometria nas massas.

Tabela 7 - Valores obtidos de resíduo bruto (R.B.), e a distribuição do tamanho de partículas das frações >44µm das fontes primárias e secundárias estudadas.

Materiais	R.B. % (>44µm)	Teor retido (%)			
		#100	#150	#200	#325
A1	2,30	0,16	0,04	0,48	1,62
A2	40,29	7,52	0,89	18,71	13,17
A3	53,23	48,00	0,49	1,75	2,99
A4	6,65	4,57	0,03	0,25	0,80
A5	8,82	0,52	0,05	0,42	7,83
A6	18,50	11,50	0,36	4,6	2,04
A7	2,47	0,70	0,09	0,85	0,83
A8	42,35	2,33	0,30	13,82	25,90
A9	54,27	33,90	3,86	13,59	2,92
A10	21,44	3,35	0,13	2,76	15,20
R1	29,75	10,53	0,85	10,53	7,84
R2	44,61	13,25	1,50	16,52	13,34
R3	75,82	66,74	0,54	4,74	3,80
R4	35,01	14,27	1,04	9,35	10,35
R5	17,56	1,01	0,22	4,21	12,12

Fonte: Autora (2024).

Figura 24 - Distribuição do resíduo bruto (R.B.) dos minerais subutilizado estudados.

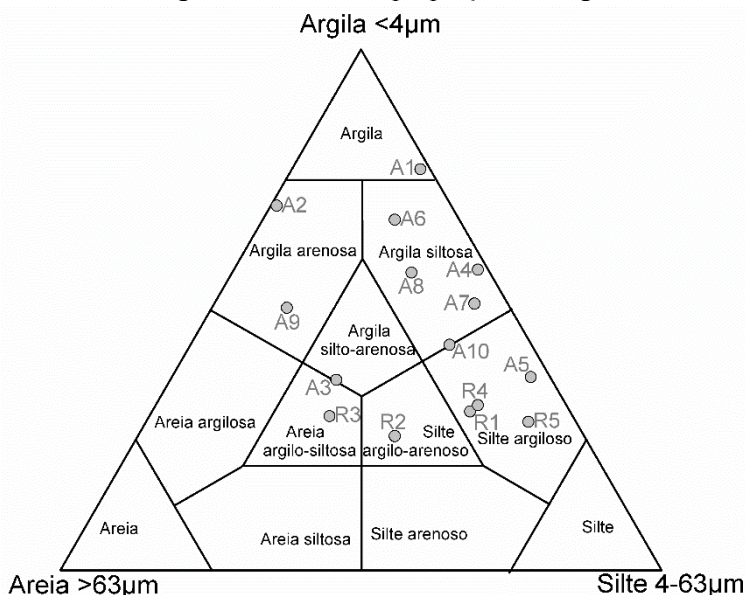


Fonte: Autora (2024).

4.2.4 Distribuição do tamanho de partículas

Os minerais subutilizados primários e secundários estudados foram classificados com o método descrito por (Shepard, 1954) e plotados em um diagrama ternário de areia ($>63\ \mu\text{m}$), silte ($4\text{--}63\ \mu\text{m}$) e argila ($<4\ \mu\text{m}$) (Figura 25). Pode-se observar que os minerais subutilizados primários estão posicionados majoritariamente nas regiões argila: Argila (A1), argila arenosa (A2 e A9), argila siltosa (A4, A6, A7, A8 e A10) e argila silto-arenosa (A3), estando apenas uma das amostras na zona silte: silte-argiloso (A5), estado a maior parte dos minerais secundários nessa mesma zona (R1, R4 e R5). Os demais minerais secundários estão na zona silte argilo-arenoso (R2) e areia argilo-siltosa (R3).

Figura 25 - Distribuição das fontes minerais subutilizadas primárias e secundárias no diagrama ternário das proporções de argila-silte-areia.



Fonte: Autora (2024).

A análise granulométrica das frações cumulativas, apresentada na Tabela 8, fornece informações relevantes sobre os materiais subutilizados estudados. Observa-se que esses minerais possuem uma ampla variação no tamanho dos grãos, o que exige uma avaliação detalhada para seu potencial uso no setor cerâmico.

Tabela 8 - Frações cumulativas (10%, 20%, 50%, 90%) das fontes minerais subutilizadas primárias e secundárias.

Materiais	Frações cumulativas (µm)			
	D ₉₀	D ₅₀	D ₂₀	D ₁₀
A1	14,54	0,13	<0,10	<0,10
A2	72,48	1,49	1,00	0,90
A3	73,91	9,08	1,10	0,50
A4	23,81	2,26	0,27	0,18
A5	40,04	14,86	1,17	0,45
A6	57,81	1,34	0,20	0,18
A7	27,49	3,80	0,46	0,18
A8	61,64	1,13	0,30	0,21
A9	73,51	3,90	0,18	0,18
A10	64,97	6,70	0,69	0,29
R1	66,75	10,57	2,03	0,78
R2	72,36	16,92	2,51	1,00
R3	74,83	14,22	2,19	0,93
R4	64,90	8,07	2,34	1,13
R5	38,70	8,62	2,62	1,20

Fonte: Autora (2024).

Os valores obtidos para D₉₀ tiveram uma variação que partiu de 23,81 µm até 74,83 µm, onde os resíduos da mineração de saibro (R2 e R3) apresentaram um tamanho de grãos >70 µm, assim como A2, A3 e A9. Esses materiais também apresentaram os teores de R.B. mais elevados em relação aos demais, mostrando serem altamente sedimentares. Os valores obtidos no diagnóstico de referência mineral apontam tamanho de grãos em D₉₀ na ordem dos 65 µm para os blocos vermelhos, o que pode ser observado em alguns casos, como A8, A10, R1 e R4, entretanto, quando observado o D₅₀, as massas de blocos apresentam uma variação de 1 a 6 µm, e desses quatro materiais, A8 e A10 ficam nesse intervalo tendo os resíduos (R1 e R4) com tamanhos superiores a esse range.

As massas para fabricação de telhas vermelhas apresentaram D₉₀ entre 20 e 40 µm, e pode-se observar que A4, A5, A7 e R5 estiveram nessa faixa, entretanto D₅₀ das massas ficaram <1 µm, e os minerais subutilizados apontados ficaram entre 2 e 15 µm.

Em um contexto de granulometria, alguns desses minerais estudados até apresentam tamanho de grãos em D₉₀ que se assemelham as massas cerâmicas de referência da região, todavia, quando avaliado D₅₀, o tamanho é majoritariamente maior, havendo poucos que apresentam valores equivalentes. Para D₂₀ e D₁₀ os tamanhos ainda são

na grande maioria maiores, porém, havendo exemplares, como A1, como tamanho de grão menor, que pode ser usado como uma matéria prima base.

4.2.5 **Análise química**

A análise química (Tabela 9) realizada ilustra os óxidos presentes nas fontes minerais primárias (A) e secundárias (R) estudadas. Essa caracterização pode trazer algumas particularidades das amostras, que podem traduzir os motivos, principalmente das fontes primárias de serem subutilizadas pelo setor cerâmico, como o alto teor de Fe₂O₃ em A7, e SiO₂ em A3 e A9, sendo estas possíveis responsáveis por problemas processuais, ocasionados pela deficiência da plasticidade (falta de argilominerais na constituição) (Saviatto *et al.*, 2023).

Tabela 9 - FRX das amostras de fontes primárias (A) e fontes secundárias (R).

Materiais	Óxidos (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	P.F.
A1	65,50	14,97	1,09	0,09	8,49	1,40	0,28	0,54	7,50
A2	73,90	13,72	1,92	0,09	3,31	0,75	0,05	0,23	5,93
A3	79,07	11,06	1,04	0,07	3,35	0,61	0,04	0,07	4,46
A4	61,28	16,73	3,20	0,82	6,21	0,81	0,13	1,25	9,39
A5	71,89	17,24	1,72	0,04	1,89	0,65	0,04	0,37	6,07
A6	54,45	23,05	0,37	0,04	10,10	1,06	0,02	0,12	10,64
A7	30,63	25,96	0,65	0,09	26,01	2,75	<0,02	0,17	13,18
A8	74,66	15,95	1,89	0,1	1,7	0,53	0,05	0,11	4,92
A9	79,42	8,87	0,26	0,05	4,99	0,72	0,04	<0,02	5,6
A10	68,72	15,8	1,85	0,06	6,08	0,78	0,03	0,36	6,18
R1	52,67	20,48	2,55	0,13	3,68	1,02	2,38	0,61	15,82
R2	57,12	20,39	3,03	2,55	6,99	0,85	2,64	0,72	5,23
R3	69,61	15,24	5,34	1,17	3,42	0,60	0,98	0,30	3,15
R4	52,78	24,75	3,00	1,77	6,76	0,79	1,91	0,76	7,20
R5	60,51	19,68	6,71	2,68	4,62	0,60	1,32	0,47	3,16

P.F.: Perda ao Fogo
Fonte: Autora (2024).

As fontes minerais secundárias por sua vez, por serem resultantes de processos de beneficiamento mineral distintos, como carvão (R1) e saibro (R2, R3, R4 e R5), apresentam suas características de acordo com sua origem. Outro fator de grande relevância é que esses materiais normalmente apresentam materiais argilosos em sua composição, uma vez que são as frações mais finas descartadas do processo.

Com base na análise química de todas as amostras estudadas, verifica-se uma grande variação, mas de maneira geral os teores de Al_2O_3 estão relacionados à presença de aluminossilicatos anidros (feldspatos) e aluminossilicatos hidratados (argilominerais). Os óxidos alcalinos ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) e alcalinos terrosos ($\text{CaO}+\text{MgO}$), que estão associados a fundência, podem estar conectados a origem, principalmente os minerais do saibro, que são oriundos do beneficiamento do feldspato (R2, R3, R4 e R5). O Fe_2O_3 em elevados teores nas amostras podem estar associado a hematita (Flores Nicolás *et al.*, 2024).

De maneira geral, A1, A2, A5, A8 e A10 apresentaram teores dos óxidos bastante inerentes as massas ilustradas na Etapa I, como teor de SiO_2 e de Al_2O_3 entre 63 e 76% e 12 e 18% respectivamente, com uma soma próxima a 80%. Essas argilas se apresentam com bastante semelhança para a aplicação em cerâmica vermelha, com destaque a A5 e A8 que apresentaram um teor de $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 2\%$, o que pode ser um bom indicativo como material a ser usado em produtos brancos. Para as argilas A3 e A9, o teor de sílica foi muito alto ($> 79\%$) em relação ao teor de alumina, ocasionado pelo excesso de “sílica livre”. Para A4, mesmo tendo um teor deficiente as massas, apresentando teores de K_2O e MgO superiores, o que pode estar ligado a fundência encontrada nos argilitos. Nota-se que A6 e A7 apresentam baixos teores de SiO_2 e elevados valores para Al_2O_3 e Fe_2O_3 , mostrando dado desequilíbrio químico.

Entre os minerais secundários, R1 apresenta uma deficiência de $\text{Si}+\text{Al}$ ($< 70\%$), com valores elevados de CaO e perda ao fogo (devido a presença de carbono). Por fim, os resíduos oriundos do processo de beneficiamento do saibro, se destacam pelos elevados valores de K_2O e Na_2O , cuja soma variou de 4 a 10%.

4.2.6 Sais solúveis

As fontes primárias e secundárias foram analisadas para determinação da composição química dos sais solúveis. Na sua totalidade os produtos argilosos fornecem uma ampla gama de composições químicas de sais solúveis (Tabela 10). Este estudo embora limitado a 15 amostras, permiti-nos detectar algumas características comuns nas diversas matérias-primas e diferenças importantes com base na sua origem geológica.

As argilas estão basicamente em três formações geológicas diferentes. Na formação geológica Rio do Sul estão localizadas a maior parte das fontes primárias estudadas (A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7), as argilas provenientes dessa formação geralmente possuem baixo teor de

sais solúveis, devido ao ambiente deposicional glacial, onde há menor concentração de elementos solúveis. No entanto, em áreas onde houve maior influência de intemperismo químico, pode haver maior formação de sais. As concentrações de Na destas argilas variaram de 0,007 a 0,04 e para Mg (0,001 a 0,088) os sais de sódio e magnésio são considerados agressivos, podendo causar danos irreparáveis nas peças cerâmicas (Florêncio, 1999). Já os teores de K variaram entre 0,002 a 0,038 e para Ca (0,007 a 0,064) as concentrações totais de sais dessas argilas tiveram grande variação ficando entre 0,08 a 0,2%.

Tabela 10 - Análise de sais solúveis das amostras de fontes primárias (A) e fontes secundárias (R).

Materiais	Sais solúveis (%)				
	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Ca ⁺	total
A1	0,04	0,022	0,008	0,017	0,087
A2	0,01	<0,001	0,021	0,045	0,076
A3	0,022	0,008	0,002	0,011	0,043
A4	0,013	0,038	0,088	0,064	0,203
A5	0,031	0,009	0,009	0,031	0,08
A6	0,007	<0,001	0,001	0,007	0,016
A7	0,019	0,002	0,001	0,008	0,029
A8	0,013	0,011	<0,001	<0,001	0,024
A9	0,014	0,003	0,001	0,005	0,023
A10	0,007	0,01	0,001	0,005	0,023
R1	0,034	0,016	0,006	0,045	0,101
R2	0,012	0,004	0,001	0,005	0,002
R3	0,008	0,005	0,001	0,005	0,019
R4	0,035	0,004	0,001	0,007	0,047
R5	0,072	0,011	0,003	0,04	0,126

Fonte: Autora (2024).

A argila A4 apresentou os maiores teores de sais em comparação com as demais, totalizando 0,203%. Esse resultado provavelmente está associado à camada geológica onde ela é extraída, já que sua obtenção ocorre em um nível mais profundo do perfil, próximo à camada barro branco, associado a região carbonífera.

As argilas A8 e A9 pertencem a formação geológica de depósitos aluvionares, esses depósitos resultam da sedimentação de materiais transportados por rios e correntes de água, que podem carrear minerais solúveis ao longo do percurso (Miall, 2006). Ao comparar essas duas argilas percebe-se que elas são muito semelhantes em sais, com exceção de K (0,003 a 0,011).

Já a argila A10 pertence aos depósitos flúvio-lagunares, esses depósitos resultam da interação entre sistemas fluviais e lagunares, onde a variação no fluxo de água, a salinidade e a evaporação desempenham papéis importantes na composição química dos sedimentos. Os valores de sais de A10 são relativamente baixos.

O resíduo R1 proveniente do processo de beneficiamento do carvão esta localização na formação rio bonito obteve um total de sais de (0,101), o carvão contém impurezas minerais, como pirita (FeS_2), sulfatos, cloretos e outros compostos solúveis que, durante sua decomposição ou combustão, podem liberar sais solúveis (Carasek, 2006). É possível observar que os teores de Na e Ca foram os mais acentuados: 0,34 e 0,045 respectivamente.

Já nas fontes secundárias os resíduos (R2, R3, R4, R5) observa-se que apresentaram desde valores insignificantes (0,001) a valores mais acentuados como R4 e R5 que apresentam valores mais elevados de Na (0,035 e 0,072), R5 se destaca com mais quantidade de sais totalizando 0,126. Vale ressaltar que R5 passa por um processo de beneficiamento com etapas que podem estar associadas a essa alteração nos sais solúveis.

Os sais solúveis presentes em peças cerâmicas podem causar manchas esbranquiçadas, conhecidas como eflorescências. Esses defeitos se manifestam durante o processo de secagem e queima, gerando descolorações superficiais, ou aparecem após a instalação das peças na obra, principalmente em condições de alternância entre umidade e secagem.

É importante notar que a formação de eflorescências está relacionada a fatores complexos, incluindo as características de processamento e as condições ambientais. Portanto, não é possível estabelecer um percentual único de sais solúveis como limite para todas as peças cerâmicas e circunstâncias.

No entanto de acordo com Menezes *et al.*, (2006), um teor de 0,025% de sais solúveis nos corpos cerâmicos é considerado um limite apropriado para determinar a propensão das peças a desenvolverem eflorescências.

4.2.7 **Análise mineralógica**

A Tabela 11 ilustra a quantificação das fases de minerais, nas amostras estudadas. É possível observar a presença de quartzo (sílica livre) em todas as amostras em teores que variam de 2% até 67%. Elevados teores de quartzo tornam o material argiloso em arenoso, e no processo cerâmico a presença desse mineral tende a auxiliar na variação dimensional, entretanto, deve estar em teores moderados (Crozetta *et al.*, 2016).

A caulinita também está presente em todas as amostras estudadas, e entre os argilominerais é o mais encontrado na crosta terrestre (Dai e Zhao, 2018). Para os argilominerais, também se observou presença de illita, esmectita e clorita, que juntos apresentaram uma soma que variou entre ~30% a ~60%. O argilominerais são responsáveis pela plasticidade dos materiais argilosos, o que dão coesão para o processo de conformação por extrusão (Marsigli e Dondi, 1997).

Tabela 11 - Mineralogia das fontes primárias (A) e fontes secundárias (R).

Materiais	Fase identificada / Quantificação (%)										
	ilita	caulinita	esmectita	clorita	Fe-óxido hidróxido	calcita	plagioclásio	feldspato-K	quartzo	rutílio	acessórios
A1	-	37	3	-	9	-	-	-	47	1	3
A2	26	16	-	-	4	-	1	-	51	1	2
A3	14	18	-	-	4	-	-	-	63	1	1
A4	24	20	-	-	7	-	1	2	40	1	5
A5	15	29	2	-	2	-	-	-	51	1	1
A6	-	58	-	-	11	-	-	2	26	1	1
A7	9	51	-	-	33	-	-	-	2	1	3
A8	16	24	1	-	2	-	1	-	55	1	1
A9	3	17	5	-	6	-	-	-	67	1	1
A10	16	23	3	-	7	-	-	-	49	1	1
R1	31	28	-	2	4	4	1	1	20	1	7
R2	15	12	-	2	8	-	34	11	14	1	3
R3	6	11	-	-	4	-	15	29	33	1	2
R4	14	29	-	3	8	-	25	11	8	1	2
R5	17	4	-	2	5	-	29	32	9	1	2

Fonte: Autora (2024).

Os teores de óxido-hidróxido de ferro também variaram de 2% a 33%, encontrado em todas as amostras, sendo muito comum estar presente em solos, seja em forma de minerais, ou algumas vezes junto aos argilominerais (Taneja e Raj, 1993). Feldspatos potássico e plagioclásio

também estiveram em algumas amostras de argilas em teores <2%, entretanto, para R2 a R5, a soma obteve um range de 36% a 61%. Isso se dá a origem desses resíduos (beneficiamento de rochas quartzo-feldspáticas). Em formulações cerâmicas, os feldspatos atuam principalmente como fundentes, onde sua principal função é reduzir a temperatura de fusão dos materiais cerâmicos, facilitando o processo de vitrificação e promovendo a formação de uma fase vítrea que confere resistência e durabilidade ao produto final (Elias *et al.*, 2024).

4.2.8 Classificação

A classificação dos resíduos sólidos é realizada de acordo com a NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a), a qual define se o resíduo é Classe I perigoso ou Classe II não perigoso. Os resíduos de classe II não subdivididos em classe II-A (Não Inertes) e Classe II-B (Inertes).

Primeiramente realizou-se ensaio na massa bruta, para analisar sua corrosividade e reatividade. As fontes secundárias (resíduos) foram caracterizadas como não corrosivos, pois o pH em sua mistura com água na proporção de 1:1 em peso ficaram entre ~6,5 e ~8,4 não ultrapassando o limite estabelecido de 2,1 a 12,4 pela norma, letra A do item 4.2.1.2 Corrosividade. Portanto, todos os resíduos analisados são classificados como não perigosos neste ensaio conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de corrosividade dos minerais subutilizados secundários (resíduos).

Material	Parâmetro	Resultado	Valor Recomendado	L.Q.
R1	pH em água (1:1)	8,33	2,1 a 12,4	0,1 a 14,0
R2		6,52		
R3		6,89		
R4		6,81		
R5		8,42		

L.Q. Limite de Quantificação

Fonte: Autora (2024).

Posteriormente, no teste de reatividade as fontes secundárias foram testadas como não reativas, pois não apresentam em sua constituição íons cianeto (ácido cianídrico [HCN]) e sulfeto (ácido sulfídrico [H₂S]) acima dos limites estabelecidos pela norma (250 mg/kg de HCN e 500 mg/kg de H₂S), letra E do item 4.2.1.3 Reatividade. Assim, os resíduos foram classificados como não perigosos neste ensaio conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Análise de reatividade dos minerais subutilizados secundários (resíduos).

Parâmetro	R1	R2	R3	R4	R5	Limite liberável por kg de resíduo	L.Q.
HCN (mg/kg)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	250mg de HCN	0,005
H ₂ S (mg/kg)	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	500mg de H ₂ S	1,6

L.Q. Limite de Quantificação
Fonte: Autora (2024).

No ensaio de lixiviação (Tabela 14) os parâmetros analisados no extrato do resíduo obtido segundo a norma não apresentam concentrações acima dos limites máximos permitidos do item 4.2.1.4 toxicidade, letra A, anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004, caracterizando o resíduo como não tóxico, sendo classificado como não perigoso – classe II neste ensaio.

Tabela 14 - Resultados da lixiviação dos minerais subutilizados secundários (resíduos).

Parâmetro	R1	R2	R3	R4	R5	Limite Máximo no Lixiviado (mg/L)	L.Q.
Arsênio (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,0	0,001
Bário (mg/L)	<0,001	<0,001	3,37	2,09	1,74	70,00	0,001
Cádmio (mg/L)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	0,5	0,0001
Chumbo (mg/L)	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,00	0,001
Cromo Total (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	5,00	0,001
Fluoreto (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	150,0	0,1
Mercurio (mg/L)	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,1	0,0002
Prata (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5	0,01
Selênio (mg/L)	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,0	0,001
Sólidos Secos (%)	81,79	74,76	83,57	68,68	77,57	-	0,01

L.Q. Limite de Quantificação
Fonte: Autora (2024).

Já no ensaio de solubilização (Tabela 15), os resíduos apresentam concentrações de alumínio (entre 0,02 e 22,1 mg/L) e ferro (entre 1,15 e 7,95 mg/L) acima dos limites máximos permitidos. Além disso, R1, R2, R3 e R5 apresentaram concentrações acima do limite de manganês (entre, 0,05 e 0,32mg/L), R1, R2 e R3 apresentam concentrações acima dos níveis permitidos de Fenóis totais (entre 0,01 e 0,063mg/L) e R1 apresentam concentrações acima do limite de Sulfatos (291 mg/L).

Os teores que estão acima do permitido pela referida norma técnica estão destacados em vermelho, como pode ser observado na tabela seguinte.

Tabela 15 - Resultados da solubilização dos minerais subutilizados secundários (resíduos).

Parâmetro	R1	R2	R3	R4	R5	Limite Máximo no Solubilizado (mg/L)	L.Q.
Alumínio (mg/L)	0,02	22,1	4,06	5,94	21,81	0,2	0,01
Arsênio (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,001
Bário (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,74	0,7	0,001
Cádmio (mg/L)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,005	0,0001
Chumbo (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,001
Cobre (mg/L)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	2,0	0,005
Cromo Total (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,05	0,001
Ferro (mg/L)	<0,05	6,76	1,15	1,55	7,95	0,3	0,05
Manganês (mg/L)	0,09	0,14	0,05	<0,01	0,32	0,1	0,01
Mercurio (mg/L)	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,001	0,0002
Prata (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,01
Selênio (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	0,001
Sódio (mg/L)	0,51	6,51	4,17	6,4	17,43	200,0	0,05
Zinco (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,0	0,01
Surfactantes (mg/L)	<0,10	<0,10	0,31	0,26	0,12	0,5	0,1
Sulfatos (mg/L)	291	<10	<10	<10	<10	250,0	10
Nitrato (mg/L)	<0,10	<0,10	0,13	0,11	0,14	10,0	0,1
Fenóis (mg/L)	0,01	0,063	0,046	<0,002	<0,002	0,01	0,002
Fluoretos (mg/L)	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	1,5	0,1
Cloreto (mg/L)	15,76	1,8	9,45	0,9	1,8	250,0	-

L.Q. Limite de Quantificação

Fonte: Autora (2024).

A identificação dos constituintes (parâmetros) avaliados na caracterização foi estabelecida de acordo com a norma. Considerando os resultados obtidos no decorrer dos ensaios da massa bruta, lixiviação, solubilização e das características físico-químicas todos os resíduos foram classificados como Não Perigosos- Classe II A - Não Inertes segundo a norma ABNT NBR 10004:2004, nos parâmetros analisados.

4.3 APLICABILIDADE DOS MINERAIS SUBUTILIZADOS

Com base nos resultados obtidos, fez-se o levantamento de algumas características relevantes para se conseguir direcionar a aplicabilidade dos minerais subutilizados estudados.

Na Tabela 16 elencou-se o índice de plasticidade (IP), propriedade essencial para a produção de cerâmica vermelha. Também se incluiu os teores obtidos de resíduo bruto (R.B.) como método tradicional regional para controle de massa cerâmica. A representação gráfica do R.B. também está sendo ilustrada na Figura 26, já com os ranges ideais para os diferentes tipos de produtos produzidos na região.

Ainda na Tabela 16, os teores de argilominerais (nesse caso somados aos óxido-hidróxido de ferro), feldspato e quartzo também estão

ilustrados, como base das formulações cerâmicas. E por fim, com intuito de se avaliar a presença de coloração, o Fe_2O_3 (em forma de óxido) também foi apresentada.

Tabela 16 - Características de plasticidade, resíduo bruto, mineralógica e teor de ferro dos minerais subutilizados.

Materiais	Características					
	I.P	R.B.	Argilominerais	Feldspato	Quartzo	Fe_2O_3
A1	Alta	2,30	49	0,1	47	8,49
A2	Baixa	40,29	45	0,8	51	3,31
A3	Baixa	53,23	36	0	63	3,35
A4	Baixa	6,65	51	2,7	40	6,21
A5	Média	8,82	48	0,3	51	1,89
A6	Alta	18,50	70	2,5	26	10,10
A7	Alta	2,47	93	0	2	26,01
A8	Média	42,35	42	1,1	55	1,7
A9	Baixa	54,27	31	0	67	4,99
A10	Média	21,44	49	0	49	6,08
R1	Baixa	29,75	65	2,3	20	3,68
R2	-	44,61	37	44,8	14	6,99
R3	Baixa	75,82	21	43,5	33	3,42
R4	Média	35,01	54	35,6	8	6,76
R5	Média	17,56	28	61,1	9	4,62

I.P.: Índice de Plasticidade, R.B.: Resíduo Bruto.

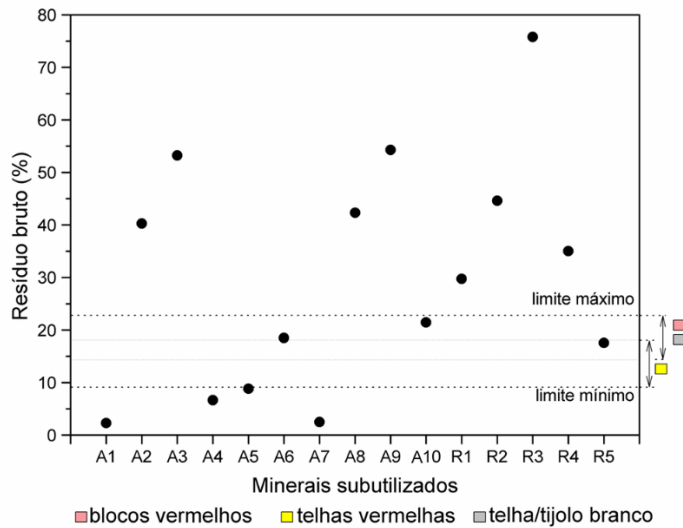
Fonte: Autora (2025).

Cruzando os resultados obtidos da Tabela 16 com a Figura 26, observa-se que A5 está marginalmente no limite mínimo do teor aceitável de R.B. para telhas vermelhas, entretanto, pode ser usado como complementar para todos os produtos, por apresentar média plasticidade e um teor baixo de Fe_2O_3 , que permite o uso em telhas/tijolos brancas.

As amostras A6, A10 e R5, que estão dentro da zona de R.B. podem ser usadas como matérias-primas para produtos vermelhos, em função de apresentarem teores em demasia de ferro – que proporciona a coloração avermelhada as peças após a queima. A6 por apresentar uma alta plasticidade e um teor elevado de Fe_2O_3 pode ser aplicado na telha vermelha como forma de padronizar a coloração da peça, e também pode

ser introduzida em blocos vermelhos. A10, por apresentar uma baixa plasticidade, aconselha-se usar moderadamente, entretanto com aplicação mais recomendada em blocos vermelhos, que são mais susceptível a absorção de minerais menos plásticos. Já R5, por apresentar um teor elevado de feldspatos, pode ser uma boa opção para os produtos cerâmicos, uma vez que esse material é provedor de fundentes, e tende trazer benefícios após a queima.

Figura 26 - Gráfico com a representação do resíduo bruto para os minerais subutilizados.



Fonte: Autora (2025).

Os materiais A2, A3, A8, A9, R2 e R3 apresentam teores muito elevados de R.B., e devem ser evitados na conformação de telhas, por promover porosidade, e as telhas necessitam de teores baixos de absorção de água e devem ser impermeáveis. Com exceção de A8, todas essas amostras apresentam baixa plasticidade, e mesmo utilizadas na fabricação de blocos, é imprescindível que seja em teores muito moderados, e de preferência em conjunto a argilas de alta plasticidade para equilibrar. A8 por sua vez, mesmo apresentando um elevado teor de R.B., apresentou média plasticidade e baixo teor de Fe_2O_3 , e com isso, além de blocos vermelhos, esse material pode ser introduzido em tijolos brancos em teores moderados.

As argilas A1, A4 e A7 apresentam R.B. abaixo dos limites. A1 e A7 apresentam alta plasticidade e teor de Fe₂O₃ elevados, podendo ser materiais base para fabricação de blocos e telhas vermelhas. Já A4, que apresenta baixa plasticidade, também está atrelado a um considerável teor de Fe₂O₃ o que impossibilita a aplicabilidade em produtos brancos, podendo ser usado então em blocos vermelhos e moderadamente em telhas vermelhas.

Tabela 17 - Distribuição dos minerais subutilizados por produtos.

Materiais	Tipo de produto		
	Bloco vermelho	Bloco vermelho	Bloco vermelho
A1	✓	✓	✗
A2	✓	✗	✗
A3	✓	✗	✗
A4	✓	✓	✗
A5	✓	✓	✓
A6	✓	✓	✗
A7	✓	✓	✗
A8	✓	✗	✓
A9	✓	✗	✗
A10	✓	✓	✗
R1	✓	✗	✓
R2	✓	✗	✗
R3	✓	✗	✗
R4	✓	✓	✗
R5	✓	✓	✗

Fonte: Autora (2025).

Por fim, R1 e R4 apresentaram teores de R.B. levemente acima do limite, e podem ser trabalhados em formulações cerâmicas. R1 apresenta baixa plasticidade, entretanto, pode ser moderadamente incluída em blocos vermelhos. Devido sua origem (mineração de carvão), é acompanhado de um teor de matéria orgânica muito elevada, o que ocasiona porosidade, impossibilitando o uso em telhas, entretanto, a presença de carbono pode ser um fator que auxilie na coloração branca (introduzindo monóxido de carbono no interior do forno), mesmo apresentando teor de Fe₂O₃ >3%, extrapolando o limite aceitável para produtos de coloração clara (Dondi, Raimondo e Zanelli, 2014). E R4, que apresenta um índice médio de plasticidade, e um teor considerável de feldspato, pode ser moderadamente experimentado exclusivamente em produtos vermelhos, devido ao teor de ferro contido.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O diagnóstico de referência mineral permitiu traçar um perfil qualitativo do setor da indústria cerâmica do sul de Santa Catarina, como propósito de facilitar a busca de novas jazidas minerais futuras e também no auxílio da valorização de fontes minerais subutilizadas, que possam ser aplicados na fabricação de peças cerâmicas.

Foram focadas a seleção de massas de blocos e telhas vermelhas, que são responsáveis pela maior parte da produção do setor, e também de fabricação de telhas e tijolos brancos/mesclados, que são uma particularidade exclusiva da região. Por meio da imersão no setor, observou-se que o controle tecnológico adotado por muitas indústrias, é por meio do teor de resíduo bruto (R.B.), que apresentaram teores que variaram de 7,77% a 25,06, sendo maiores para as massas de blocos vermelhos ($14\% \pm 25$), seguidos das formulações de peças brancas ($14\% \pm 22$) e por fim, para telhas vermelhas ($7,7\% \pm 18$). Como o R.B. é utilizado como critério no desenvolvimento das formulações, se torna um importante indicador para busca de novas fontes minerais.

Por meio da granulometria das massas, observou-se uma variação de D_{50} entre 0,40 e 6,07 μm , que ilustra uma variabilidade morfológica das formulações, estando os grãos mais grossos em blocos vermelhos ($>1,36 \mu\text{m}$) e as telhas vermelhas os grãos mais finos ($<0,73 \mu\text{m}$). Isso se dá pelo fato de os blocos cerâmicos admitir maior granulometria, com intuito de melhorar etapas no processo, como a secagem por exemplo. As telhas por sua vez, buscam maior densificação, por consequência melhor empacotamento, proporcionado por grãos mais finos. O uso de argilas mais plásticas para fabricação de telhas também é determinante, já que em blocos e tijolos, se aplica o emprego de argilas mais arenosas.

Em reflexo as características granulométricas, o ensaio de plasticidade mostrou que $>90\%$ das amostras estão dentro de uma zona adequada para extrusão. Destacando que as massas de blocos, mesmo apresentando maior granulometria, e menor índice de plasticidade (IP média ~ 18), em relação as telhas (IP média ~ 26), estão apropriadas ao processo de conformação.

A análise química promove dados importantes principalmente no fomento da coloração das peças, que tradicionalmente é avermelhada. Entretanto, a região também se destaca na fabricação de peças brancas, o que é atribuído ao baixo teor de ferro. Para tal, observou-se que os blocos e telhas vermelhas variaram o teor de Fe_2O_3 entre 4,44 e 7,08 %, tendo os maiores percentuais nas telhas vermelhas que necessitam de maior uniformidade da tonalidade. Já aos produtos brancos/mesclados

observou-se um teor desse óxido $<3\%$, sendo necessário restringir matérias-primas que apresentem elevados teores de ferro.

A mineralogia das massas mostrou a presença majoritária de quartzo e argilominerais em todas as amostras estudadas, e em alguns casos observou-se feldspatos, e algumas particularidades como a hematita, que esteve presente nas amostras vermelhas, e rutilo nas amostras de coloração brancas.

Os minerais subutilizados, apresentaram características atípicas que em alguns casos justificam o motivo da sua não utilização. Entretanto, com o diagnóstico mineral, busca-se a introdução no processo cerâmico. A plasticidade, por exemplo, muitas das amostras apresentam teores de média a alta plasticidade (IP entre 10,38 e 16,93) que podem compor a base de massas cerâmicas. Já as amostras de baixa plasticidade (IP entre 6,04 e 6,33) ou pouco plásticas (IP entre 4,55 e 4,59), devem ser dosados em teores moderados para que não afetem a coesão da formulação desenvolvida. Por outro lado, também se teve os minerais oriundos do processo de mineração, que, mesmo contendo argilas em sua constituição, variaram a plasticidade desde média plasticidade até não plástica. Esses materiais não podem constituir a base da formulação podendo não atingir um teor adequado de plasticidade para se obter o processo de extrusão.

O resíduo bruto apresentou uma variação expressiva para todos os materiais estudados (2,30% a 75,82%), sendo os minerais secundários mais siltosos. As argilas, por sua vez, apresentam uma grande variação, sendo argilas-siltosas e argilas-arenosas, o que promovem significativamente o aumento do R.B. Com isso, salienta-se que as argilas com elevados teores de R.B. devem ser moderadamente incorporadas as massas cerâmicas, já os materiais com percentuais de R.B. aceitáveis, torna-se necessário a observação de outras características (plasticidade e o teor de ferro) para sua aplicabilidade nas formulações.

A análise química forneceu dados bastante notáveis sobre a característica dos materiais estudados. Alguns materiais com elevados teores de sílica ($>79\%$), o que fornece um desequilíbrio químico, que consequentemente reflete diminuição dos demais óxidos. Outro fator observado foram materiais com elevadíssimos teores de Fe_2O_3 (entre 10 e 26%), atípico em formulações de cerâmica vermelha. Porém, também se observou, nessa questão do ferro, materiais com teores atrativos para massas de cerâmica branca/mescladas ($<2\%$). Entre os óxidos que comumente são encontrados nas formulações de cerâmica vermelha, a presença de óxidos fundentes como K_2O , Na_2O , CaO e MgO , pode ser observado, sobretudo nos resíduos de saibro em teores elevados (entre 7 e 11%), o que foi um indicativo da possibilidade da presença de

feldspatos, que auxiliam no processo queima, melhorando a qualidade da peça.

Também se observou através do ensaio de sais solúveis que as argilas de forma geral apresentam uma extensa gama de composições químicas dos sais solúveis presentes nas argilas estudadas. A formação geológica exerce uma influência significativa nos teores desses sais, sendo que as argilas do membro Rio do Sul, em geral, apresentam níveis baixos, enquanto os depósitos aluvionares e flúvio-lagunares podem apresentar maior variabilidade devido às condições de transporte e deposição. As fontes secundárias também aumentaram a variação nos teores de sais, com destaque para R5 (0,126%), que apresentou os maiores valores, possivelmente devido a processos de beneficiamento. A presença de sais solúveis em matérias-primas cerâmicas é um fator crítico, pois pode resultar na formação de eflorescências, prejudicando a estética e a qualidade das peças. Embora não exista um limite universal para todas as cerâmicas, estudos indicam que um teor superior a 0,025% pode aumentar significativamente a propensão ao problema. Assim, o controle da matéria-prima e dos processos de produção é essencial para minimizar os efeitos indesejados dos sais solúveis e garantir um desempenho adequado dos produtos cerâmicos.

A análise mineralógica das fontes subutilizadas revelou uma presença significativa de quartzo (2% a 67%), cuja quantidade influencia a textura do material e a variação dimensional no processo cerâmico. A caulinita foi identificada em todas as amostras, assim como os argilominerais ilita, esmectita e clorita, que conferem plasticidade ao material, essencial para a conformação por extrusão. Os óxidos e hidróxidos de ferro (2% a 33%) foram encontrados em todas as amostras, influenciando diretamente a coloração dos produtos cerâmicos. Além disso, feldspatos potássicos e plagioclásios foram detectados em algumas argilas, mas com teores elevados nos resíduos R2 a R5 (36% a 61%), devido à sua origem em rochas quartzo-feldspáticas. Esses minerais são fundamentais na formulação cerâmica, pois atuam como fundentes, reduzindo a temperatura de sinterização e promovendo a vitrificação, resultando em maior resistência e durabilidade do produto final.

Por meio da classificação dos resíduos como Não Perigosos – Classe II A (Não Inertes), conforme a norma ABNT NBR 10004:2004, os ensaios realizados indicaram que eles não são corrosivos, reativos ou tóxicos, atendendo aos limites estabelecidos para cada sortimento. No entanto, no teste de solubilização, alguns resíduos continham concentrações elevadas de alguns óxidos, destaca-se R1 com um teor mais acentuado de sulfatos (291mg/L), devido a oxidação da pirita.

Notou-se que com exceção de R4 os demais resíduos apresentaram limites acima de manganês. Outros óxidos como alumínio, ferro e fenóis totais também apresentaram alguns valores acima dos limites. Essa classificação ressalta a necessidade de monitoramento e gestão adequada para evitar impactos ambientais e garantir seu reaproveitamento seguro.

Por fim, com base nos resultados obtidos, fez-se uma indicação de aplicabilidade dos minerais subutilizados estudados. Os blocos vermelhos, devido sua alta absorção de subprodutos, indicou-se que todos os materiais estudados podem conter, desde que balanceado, para não influenciar no processo e na qualidade do produto final. As telhas vermelhas, por necessitarem de maior controle processual, buscou-se materiais que apresentaram menores teores de resíduo bruto. A plasticidade e a granulometria foram determinantes nesses produtos. Já as massas de telhas e tijolos brancos/mesclados, ficam mais voltados aos materiais que apresentam baixo teor de ferro, visando a conformidade colorimétrica desses produtos. Fabricação de tijolos brancos, aceitam a presença de maior granulometria (teor maior de resíduo bruto), e as telhas, por sua vez, necessitam de maior controle da formulação.

6 CONCLUSÃO

O diagnóstico mineral realizado permitiu construir um perfil detalhado das massas cerâmicas utilizadas no sul de Santa Catarina, com especial atenção para blocos e telhas vermelhas, bem como produtos cerâmicos brancos/mesclados. O estudo evidenciou que fatores como o teor de resíduo bruto e a granulometria são essenciais na formulação adequada para cada produto, influenciando diretamente a qualidade e o comportamento durante o processamento, especialmente nas fases de extrusão e secagem.

A avaliação dos minerais subutilizados mostrou que, apesar de algumas limitações iniciais, como baixa plasticidade ou altos teores de resíduo bruto, esses materiais podem ser aproveitados em quantidades controladas nas massas cerâmicas, contribuindo para a circularidade mineral e o uso de fontes alternativas. Um controle criterioso da composição química, principalmente em relação ao teor de ferro e óxidos fundentes, é fundamental para garantir o desempenho técnico e a coloração apropriada, principalmente em produtos como telhas e tijolos brancos/mesclados.

O estudo também revelou a importância do controle de sais solúveis, que em alguns casos se apresentou elevado, mas pode ser mitigado com um manejo adequado das matérias-primas e processos, evitando problemas como eflorescência. A classificação dos resíduos como Não Perigosos – Classe II-A reforça a possibilidade de reaproveitamento seguro desses materiais no setor cerâmico, desde que os níveis de componentes críticos, como sulfatos e manganês, sejam monitorados.

Em síntese, os resultados indicam um forte potencial de valorização dos minerais subutilizados, desde que suas propriedades sejam adequadamente ajustadas às necessidades da indústria cerâmica. A incorporação dessas fontes alternativas pode fomentar uma produção mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o avanço econômico e tecnológico do setor cerâmico na região.

TRABALHOS FUTUROS

- a) Estudo com a aplicação de diferentes minerais subutilizados como forma a avaliar o comportamento tecnológico em massas cerâmicas;
- b) Caracterizar as argilas usuais no processo de fabricação de cerâmica vermelha, para que os minerais subutilizados possam ter comparativos;
- c) Propor uma central de massas para a região do APL-CVMF para abastecimento do setor cerâmico, fomentado por minerais subutilizados, como estratégia a economia circular.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004a.

ABNT. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004b.

ABNT. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004c.

ABNT. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004d.

ABNT. **NBR-16097- Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ABNT. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016a.

ABNT. **NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016b.

ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016c.

ACORDI, J. *et al.* Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features. **Resources Policy**, v. 80, p. 103243, jan. 2023.

AGUIAR, M. C. DE *et al.* **Processos de fabricação de cerâmica vermelha.** Rio de Janeiro - RJ: CETEM/MCTI, 2022.

ALBERS, A. P. F. *et al.* Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, n. 305, p. 34–37, mar. 2002.

AL-FAKIH, A. *et al.* Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: An update review. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 37–54, jan. 2019.

ALMEIDA, K. S. DE; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E. DE. Characterization of clay deposit in the central region of Piauí for use in the ceramic industry. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, 2020.

ALVES, W.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M. Challenges and pathways for Brazilian mining sustainability. **Resources Policy**, v. 74, p. 101648, dez. 2021.

ANDRADE, F. A.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Measuring the plasticity of clays: A review. **Applied Clay Science**, v. 51, n. 1–2, p. 1–7, 2011.

ANDRADE, F. A. DE; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Measuring and Modeling the Plasticity of Clays. **Materials Research**, v. 13, n. 3, p. 395–399, set. 2010.

ANDREOLA, F. *et al.* Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. **Ceramics International**, v. 42, n. 12, p. 13333–13338, set. 2016.

ANDREOLA, F. *et al.* Rice Husk Ash (RHA) Recycling in Brick Manufacture: Effects on Physical and Microstructural Properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 12, p. 2529–2539, 19 dez. 2018.

ANICER. **Dados oficiais.** Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

ANICER. **Dados do Setor.** Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>>. Acesso em: 13 set. 2023.

ANM. **Índice de Geologia e Mineração: Mineração.** Disponível em: <<https://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>>. Acesso em: 20 out. 2022a.

ANM. **Agência Nacional de Mineração.** Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br>>. Acesso em: 23 jan. 2025b.

ANM. **Resolução nº 85.** Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/resolucao-da-anm-ganha-selo-de-qualidade-regulatoria-do-ministerio-da-economia/resolucao-anm-no-85-02-12-2021.pdf/view>>. Acesso em: 24 out. 2023.

ARIANPOUR, A. Ç.; ARIANPOUR, F. Characterization, technological properties, and ceramic applications of Kastamonu alluvial clays

(Northern Turkey) in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 356, p. 129304, nov. 2022.

ASSUNÇÃO, A. R. S. *et al.* New Clayey Deposit and Their Potential as Raw Material for Red or Structured Ceramics: Technological Characterization. **Materials**, v. 14, n. 24, p. 7672, 12 dez. 2021.

ATTERBERG, A. Über die physikalische Bodenuntersuchung und über die Plastizität der Tone. **Internationale Mitteilungen für Bodenkunde**, v. 1, n. 1, p. 10–43, 1911.

AWAN, U. *et al.* Industry 4.0 and circular economy in an era of global value chains: What have we learned and what is still to be explored? **Journal of Cleaner Production**, v. 371, p. 133621, out. 2022.

BACCOUR, H. *et al.* Mineralogical evaluation and industrial applications of the Triassic clay deposits, Southern Tunisia. **Materials Characterization**, v. 59, n. 11, 2008.

BAGHDAD, A. *et al.* Characteristics and firing behaviour of the under-Numidian clay deposits from the Jijel region (northeast Algeria): potential use in the ceramics industry. **Clay Minerals**, v. 54, n. 4, p. 325–337, 15 dez. 2019.

BAIN, A. *et al.* Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1278–1287, out. 2010.

BAIN, J. A. Composition and properties of clays used in various fields of ceramics. **Cfi-ceramic Forum International**, v. 64, p. 536–538, 1987.

BAIN, J. A.; HIGHLEY, D. E. Regional Appraisal of Clay Resources - A Challenge to the Clay Mineralogist. *Em*: MORTLAND, M. M.; FARMER, V. C. (Eds.). . **Developments in Sedimentology**. London, UK: Elsevier, 1979. p. 437–446.

BARRETO, J. C. B.; SANTOS, G. B. DOS. Cartografia de atributos físicos: Subsídio para análise da mineração de saibro - Juiz de Fora/MG. **Revista GeoUECE**, v. 9, n. 2, p. 96–109, 2020.

BEER, A. Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten. **Annalen der Physik**, v. 162, n. 5, p. 78–88, 15 jan. 1852.

BEERS, D. *et al.* Industrial Symbiosis in the Australian Minerals Industry: The Cases of Kwinana and Gladstone. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 55–72, 9 out. 2008.

BENEDET, G. A. *et al.* Mining Circular Economy: Potential of rice husk ash as an alternative mineral source in the production of clay ceramics using simplex design. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 176, p. 716–724, jun. 2023.

BENEDET, G. A. *et al.* Development of eco-friendly clay ceramics using rice husk ash as a secondary mineral source of quartz. **Materials Today Communications**, v. 38, p. 108103, mar. 2024.

BERGAYA, F.; LAGALY, G.; BENEKE, K. History of clay science: a young discipline. *Em: Developments in Clay Science*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V., 2006. p. 1163–1181.

BIAN, Z. *et al.* **The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes** *Science*, 2012.

BOCKEN, N. M. P. *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308–320, 3 jul. 2016.

BOHN, B. P. *et al.* A novel method to produce a ceramic paver recycling waste glass. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, p. 100043, jun. 2021.

BOMENI, I. Y. *et al.* Ceramic with potential application of Ngwenfon alluvial clays (Noun, west Cameroon) in building construction: Mineralogy, physicochemical composition and thermal behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 493–503, set. 2018.

BOOM-CÁRCAMO, E.; PEÑABAENA-NIEBLES, R. Analysis of the Development of Industrial Symbiosis in Emerging and Frontier Market Countries: Barriers and Drivers. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 4223, 2 abr. 2022.

BOONS, F.; SPEKKINK, W.; MOUZAKITIS, Y. The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9–10, p. 905–911, jun. 2011.

BOUKILI, G. EL *et al.* Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clay from Bensmim (Morocco):

Suitability for building application. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 122300, abr. 2021.

BOUKILI, G. EL *et al.* Improving rheological and mechanical properties of non-plastic clay soil from Bensmim region (Morocco) using bentonite additions: Suitability for building application. **Journal of Building Engineering**, v. 63, p. 105525, jan. 2023.

BOULDING, K. E. The economics of the coming spaceship earth. *Em*: JARRETT, H. (Ed.): **Environmental Quality in a Growing Economy**. Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, 1966. p. 3–14.

BRASIL. **Decreto-lei nº 227**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0227.htm>. Acesso em: 25 ago. 2022.

BURMISTER, D. M. Principles and techniques of soil identifications. **Proceedings of Highway Research Board**, p. 402–433, 1949.

CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Arranjos Produtivos Mínero-Cerâmicos e o Desenvolvimento Econômico: Caso do APL de Socorro - SP. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 2, p. 24–29, 2006.

CÁCERES, V. I.; MOLINA, J. S.; GARCÍA, A. L. C. Development and validation of an analytical method for the extraction and quantification of soluble sulfates in red clay. **Cerâmica**, v. 61, n. 359, 2015.

CAMARA, V. F. *et al.* Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de Santa Catarina, Brasil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 213–218, jun. 2015.

CARASEK, H. Patologia das Argamassas de Revestimento. **Materiais de Construção Civil**, 2006.

CASAGRANDE, A. Classification and Identification of Soils. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 113, n. 1, p. 901–930, jan. 1948.

CELIK, H. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. **Applied Clay Science**, v. 50, n. 2, p. 245–254, out. 2010.

CHERTOW, M. R. “Uncovering” Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 11–30, 2007.

CHRISTIDIS, G. E. Assessment of Industrial Clays. *Em*: BERGAYA, F.; LAGALY, G. (Eds.). **Developments in Clay Science**. vol. 5 ed. Oxford, UK: Elsevier, 2013. p. 425–449.

COMIN, A. B. *et al.* Characterization and use of clays from the Rio Bonito Formation/Paraná Basin for ceramic industry application. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 18, n. 5, p. 1814–1824, 14 set. 2021.

COMIN, A. B. *et al.* Mineral circularity of kaolin for industrial application in Brazilian porcelain tiles. **Material-ES**, v. 7, n. 3, p. 41–44, 2023.

CORDER, G. D. Insights from case studies into sustainable design approaches in the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 76, p. 47–57, maio 2015.

CORRÊA, M. R. S. The evolution of the design and construction of masonry buildings in brazil. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 7, n. 2, 2012.

CORVELLEC, H.; STOWELL, A. F.; JOHANSSON, N. Critiques of the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 2, p. 421–432, 17 abr. 2022.

CPRM. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina**. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17996>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

CROZETTA, J. R. *et al.* Influência de tamanhos de partículas na plasticidade e retração de secagem das argilas. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 1, p. 21–29, 2016.

DAI, C.; ZHAO, F. Clay Minerals. *Em*: **Oilfield Chemistry**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 1–395.

DAVIS, R. O. E.; BENNETT, H. H. **Grouping of soils on the basis of mechanical analysis**. Washington, DC: USDA, 1927. v. Volume 419

DIAS, F. G. *et al.* Assessment of the fluxing potential of igneous rocks in the traditional ceramics industry. **Ceramics International**, v. 43, n. 18, p. 16149–16158, dez. 2017.

DIKO-MAKIA, L.; LIGEGE, R. Composition and Technological Properties of Clays for Structural Ceramics in Limpopo (South Africa). **Minerals**, v. 10, n. 8, p. 700, 7 ago. 2020.

DILL, H. G. A geological and mineralogical review of clay mineral deposits and phyllosilicate ore guides in Central Europe – A function of geodynamics and climate change. **Ore Geology Reviews**, v. 119, p. 103304, abr. 2020.

DONDI, M. Clay materials for ceramic tiles from the Sassuolo District (Northern Apennines, Italy). Geology, composition and technological properties. **Applied Clay Science**, v. 15, n. 3–4, p. 337–366, out. 1999.

DONDI, M. Technological characterisation of clay materials: experimental methods and data interpretation. **International Ceramics Journal**, p. 55–59, 2003.

DONDI, M.; FABBRI, B.; GUARINI, G. Grain-size distribution of Italian raw materials for building clay products: a reappraisal of the Winkler diagram. **Clay Minerals**, v. 33, n. 3, p. 435–442, 9 set. 1998.

DONDI, M.; RAIMONDO, M.; ZANELLI, C. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. **Applied Clay Science**, v. 96, p. 91–109, jul. 2014.

DONG, L. *et al.* Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1562–1578, fev. 2019.

EKINS, P. *et al.* **The Circular Economy: What, Why, How and Where** Managing environmental and energy transitions for regions and cities. **Anais...** Paris, France: OECD/EC, 2019

ELIAS, R. *et al.* Pyroplastic deformation analysis of Brazilian porcelain tile formulations using mixture design. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 21, n. 6, p. 4241–4256, 3 nov. 2024.

ELICHE-QUESADA, D. *et al.* Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 463–475, jan. 2017.

FABBRI, B.; DONDI, M. **Mineralogical classification of Italian clay raw materials for production of different ceramics** Proc. 5th Neubrandenburger Industriemineralsymp. **Anais...** 1995

FABBRI, B.; FIORI, C. Clays and complementary raw materials for stoneware tiles. **Mineralogica et Petrographica Acta**, v. 29- A, p. 535-545., 1985.

FARACO, M. N. S. **Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2022.

FARJANA, S. H. *et al.* A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 1200–1217, set. 2019.

FEIL, N. F.; KLIEMANN NETO, F. J. Produção Conjunta no Processo de Beneficiamento de Carvão Mineral: Custos Conjuntos. **Produto & Produção**, v. 9, n. 2, 2008.

FERNANDES, P. *et al.* O Estudo da Diminuição da Rugosidade da Superfície de Telhas Cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 5–6, p. 42–46, 2012.

FIALA, L. *et al.* Application of ceramic waste in brick blocks with enhanced acoustic properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121185, jul. 2020.

FIORI, C. *et al.* Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. **Applied Clay Science**, v. 4, n. 5–6, p. 461–473, dez. 1989.

FLORÊNCIO, R. **As argilas do subgrupo Itararé: Potencialidades como matérias primas cerâmicas e como inertizadoras de resíduos industriais**. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo - USP, 1999.

FLORES NICOLÁS, M. *et al.* Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 63, n. 5, p. 377–388, set. 2024.

FROSCH, R. A.; GALLOPOULOS, N. E. Strategies for Manufacturing. **Scientific American**, v. 261, n. 3, p. 144–152, set. 1989.

GARCÍA-GAINES, R. A.; FRANKENSTEIN, S. **USCS and the USDA Soil Classification System, Development of a Mapping Scheme: UPRM and ERDC Educational and Research Internship Program**. Hanover, HN: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2015.

GARCIA-MUIÑA, F. *et al.* The Paradigms of Industry 4.0 and Circular Economy as Enabling Drivers for the Competitiveness of Businesses and Territories: The Case of an Italian Ceramic Tiles Manufacturing Company. **Social Sciences**, v. 7, n. 12, p. 255, 4 dez. 2018.

GEORGE, D. A. R.; LIN, B. C.; CHEN, Y. A circular economy model of economic growth. **Environmental Modelling & Software**, v. 73, p. 60–63, nov. 2015.

GIPPINI, E. Contribution à l'étude des propriétés de moulage des argiles et des mélanges optimaux de matières premières. **L'Industrie Céramique**, v. 619, p. 423–435, 1969.

GOEL, G. *et al.* Potential pathway for recycling of the paper mill sludge compost for brick making. **Construction and Building Materials**, v. 278, 2021.

GONÇALVES, A. T. P.; CÂNDIDO, G. A. **Caracterização estrutural de Arranjos Produtivos Locais: Uma aplicação no setor de extração mineral em microrregião brasileira**XV Congresso Latino-Iberoamericana de Gestão de Tecnologia - ALTEC. **Anais...**Porto, Portugal: ALTEC, 2013

GRAFSTRÖM, J.; AASMA, S. Breaking circular economy barriers. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126002, abr. 2021.

HAFEZ, R. D. A.; TAYEH, B. A.; ABD- AL FTAH, R. O. Development and evaluation of green fired clay bricks using industrial and agricultural wastes. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01391, dez. 2022.

HAO, N. *et al.* Utilization of silt, sludge, and industrial waste residues in building materials: A review. **Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials**, v. 20, p. 228080002211147, 24 jan. 2022.

HASAN, MD. R. *et al.* Effects of waste glass addition on the physical and mechanical properties of brick. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 6, n. 1, p. 36, 26 mar. 2021.

HAWKINS, A.; MCCONNELL, B. J. **Influence of Geology On Geomechanical Properties of Sandstones**.7th International Congress on Rock Mechanics. **Anais...**Aachen, Germany: ISRM, 1991

HETTIARACHCHI, B. D.; SEURING, S.; BRANDENBURG, M. Industry 4.0-driven operations and supply chains for the circular

economy: a bibliometric analysis. **Operations Management Research**, v. 15, n. 3–4, p. 858–878, 1 dez. 2022.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. 1st. ed. New York, NY: Academic Press, 1980.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. 1st. ed. New Jersey, NJ: Prentice Hall Inc., 1981.

HOWE, L.; JOHNSTON, S.; CÔTE, C. Mining-related environmental disasters: A High Reliability Organisation (HRO) perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 417, p. 137965, set. 2023.

IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 – Ano base 2019**. 1a. ed. Brasília, DF: IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, 2020.

ILO. **Industrial symbiosis networks as part of a circular economy: Employment effects in some industrializing countries**, Geneva, Switzerland: International Labour Organization, 2022.

JAMIESON, H. E.; WALKER, S. R.; PARSONS, M. B. Mineralogical characterization of mine waste. **Applied Geochemistry**, v. 57, p. 85–105, jun. 2015.

KALISZ, S. *et al.* Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114239, fev. 2022.

KAZMI, SYED MINHAJ SALEEM *et al.* Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 372–378, set. 2016.

KAZMI, SYED M.S. *et al.* Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 29–41, set. 2016.

KHUDYAKOVA, L. I.; VOILOSHNIKOV, O. V.; KOTOVA, I. YU. Building Ceramic from Mining Wastes. **Glass and Ceramics**, v. 75, n. 7–8, p. 264–267, 7 nov. 2018.

KING, B. Optimal mining practice in strategic planning. **Journal of Mining Science**, v. 47, n. 2, p. 247–253, 19 mar. 2011.

- KINNUNEN, P. H.-M.; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 153–160, ago. 2019.
- KIRCHHERR, J. *et al.* Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 194, p. 107001, jul. 2023.
- KITULA, A. G. N. The environmental and socio-economic impacts of mining on local livelihoods in Tanzania: A case study of Geita District. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 3–4, 2006.
- KONG, L. B. *et al.* Effect of alkaline-earth oxides on phase formation and morphology development of mullite ceramics. **Ceramics International**, v. 30, n. 7, p. 1319–1323, jan. 2004.
- LAHCEN, D. *et al.* Characteristics and ceramic properties of clayey materials from Amezmiz region (Western High Atlas, Morocco). **Applied Clay Science**, v. 102, p. 139–147, dez. 2014.
- LEZIUS, W. G. Geography of Glass Manufacture at Toledo, Ohio. **Economic Geography**, v. 13, n. 4, p. 402, out. 1937.
- LU, H.; ZHAO, G.; LIU, S. Integrating circular economy and Industry 4.0 for sustainable supply chain management: a dynamic capability view. **Production Planning & Control**, p. 1–17, 31 maio 2022.
- LÜDEKE-FREUND, F.; GOLD, S.; BOCKEN, N. M. P. A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 36–61, 25 fev. 2019.
- MACHADO, D. M. *et al.* Valorization of Brazilian waste foundry sand from circular economy perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 407, p. 137046, jun. 2023.
- MALLET, A. *et al.* Environmental impacts of mining in Brazil and the environmental licensing process: Changes needed for changing times? **Extractive Industries and Society**, v. 8, n. 3, 2021.
- MANJATE, V. A.; ISSUFO, Z.; MAGENGE, A. L. Evaluation of clay soils from Manjacazi district (Mozambique) as potential raw material for the ceramic industry. **Heliyon**, v. 6, n. 10, p. e05189, out. 2020.
- MAPUNA, E. C. N. *et al.* Mineralogical, geochemical, and physicochemical features of the Mbalimayo lateritic clays (Southern

Cameroon) for potential use as raw materials in the making of fired bricks. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 12, p. 671, 25 dez. 2023.

MARCIANO MOTTA, F. J. *et al.* As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional : Argilas e Caulins. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 2, 2004.

MARSIGLI, M.; DONDI, M. Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura. **L'Industria dei Laterizi**, v. 46, p. 214–222, 1997.

MAZA-IGNACIO, O. T. *et al.* Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117314, fev. 2020.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.

MEDEIROS, V. S. C. *et al.* Study of mixtures using simplex design for the addition of chamotte in clay bricks. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 16, n. 6, p. 2349–2361, 16 nov. 2019.

MENDES, B. C. *et al.* Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116669, dez. 2019.

MENEZES, R. R. *et al.* Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, 2006.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. DE A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 303–313, 2002.

MIAL, A. D. **The Geology of Fluvial Deposits**. Springer-Verlag Berlin, 582, 1996.

MILOŠEVIĆ, M.; LOGAR, M.; DJORDJEVIĆ, B. Mineralogical analysis of a clay body from Zlakusa, Serbia, used in the manufacture of traditional pottery. **Clay Minerals**, v. 55, n. 2, p. 142–149, 1 jun. 2020.

MISHRA, P. C.; PANIGRAHI, R. R.; SHRIVASTAVA, A. K. Geo-environmental factors' influence on mining operation: an indirect effect

of managerial factors. **Environment, Development and Sustainability**, 5 abr. 2023.

MOHAN, N. V.; SATYANARAYANA, P. V. V.; RAO, K. S. Performance Of Rice Husk Ash Bricks. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, v. 2, n. 5, p. 1906–1910, 2012.

MOMCILOVIC-PETRONIJEVIC, A.; TOPLICIC-CURCIC, G.; CURCIC, A. Architecture and ceramic materials, development through time: Adobe and brick. **Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 387–400, 2018.

MONATSHEBE, T.; MULABA-BAFUBIANDI, A. F.; KASONGO NYEMBWE, D. Mechanical properties and mineralogy of artisanal clay bricks manufactured in Dididi, Limpopo, South Africa. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 972–982, 2019.

MORAIS, D. M.; SPOSTO, R. M. Propriedades Tecnológicas e Mineralógicas das Argilas e suas Influências na Qualidade de Blocos Cerâmicos de Vedação que Abastecem o Mercado do Distrito Federal. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 5–6, p. 35–38, 2006.

MORE, A. S.; TARADE, A.; ANANT, A. Assessment of suitability of Fly Ash and Rice Husk Ash burnt clay bricks. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 4, n. 7, p. 397–402, 2014.

MORENO-MAROTO, J. M.; ALONSO-AZCÁRATE, J. What is clay? A new definition of “clay” based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. **Applied Clay Science**, v. 161, n. April, p. 57–63, set. 2018.

MOUSSI, B. *et al.* Numidian clay deposits as raw material for ceramics tile manufacturing. **Journal of African Earth Sciences**, v. 164, p. 103775, abr. 2020.

MYMRIN, V. *et al.* Environment friendly ceramics from hazardous industrial wastes. **Ceramics International**, v. 40, n. 7, p. 9427–9437, ago. 2014.

NANDI, V. DE S. *et al.* Plastic behaviour of clay materials for the manufacture of fast-drying red ceramics. **Clay Minerals**, v. 58, n. 1, p. 26–37, 30 mar. 2023.

NCUBE, A. *et al.* Moving towards resource efficiency and circular economy in the brick manufacturing sector in Zimbabwe. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125238, jan. 2021.

NEVES, A. *et al.* A comprehensive review of industrial symbiosis. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119113, fev. 2020.

NKALIH MEFIRE, A. *et al.* Mineralogy and geochemical features of Foumban clay deposits (west Cameroon): genesis and potential applications. **Clay Minerals**, v. 53, n. 3, p. 431–445, 17 set. 2018.

NWEKE, O. M.; OMEOKACHIE, A. I. Ceramics Properties of Indurated-Shale Quarry Wastes from Abakaliki, Southeastern Nigeria: Application as Raw Materials in Roofing-Tile Production. **Clays and Clay Minerals**, v. 71, n. 2, p. 143–165, 6 abr. 2023.

NZEUKOU NZEUGANG, A. *et al.* Clayey soils from Boulgou (North Cameroon): geotechnical, mineralogical, chemical characteristics and properties of their fired products. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 5, p. 551, 13 maio 2021.

OLIVEIRA, A. A. DE. **Tecnologia em Cerâmica**. Criciúma, SC: Editora Lara, 2011.

OLIVEIRA, C. M. DE *et al.* Valorization of iron pyrite from coal mining in southern Brazil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 102931, 2019.

OLIVEIRA, K. A. *et al.* Ceramic shell waste valorization: A new approach to increase the sustainability of the precision casting industry from a circular economy perspective. **Waste Management**, v. 157, p. 269–278, fev. 2023.

OLIVEIRA, M. L. S.; HEIDEMANN, E. E.; LIMA, K. T. A Influência do carvão no desenvolvimento socioeconômico do sul de Santa Catarina/Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 23, n. 2, p. 263–274, 2011.

ONANA, V. L. *et al.* Mineralogy and preliminary assessment of the potential uses of alluvial clays from Batouri (Eastern-Cameroon). **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 407–415, set. 2019.

PAGNAN, S. *et al.* Fornecimento sustentável de argilas para APL de cerâmica vermelha. Em: SILVA, C. F. C. *et al.* (Eds.). **Prêmio Melhores Práticas em APL de Base Mineral: Coletânea 2010-2022**. 1a. ed. Teresina, PI: IFPI/ CT RedeAPLmineral, 2023. p. 82–91.

PEI, J. *et al.* Effects of alkali and alkaline-earth oxides on preparation of red mud based ultra-lightweight ceramsite. **Ceramics International**, v. 49, n. 11, p. 18379–18387, jun. 2023.

PINTO, L. A. *et al.* Study of clay used in the production of red ceramic pottery on semi-arid Cearense, Brazil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, 2021.

PRADO, U. S. DO; BRESSIANI, J. C. Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década. **Cerâmica Industrial**, v. 18, n. 1, p. 7–11, 2013.

PRADO, W. F. R.; LIMA, L. V. Avaliação de impactos ambientais na extração de argila para a indústria de cerâmica vermelha em Guanambi/BA. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 11–19, 2021.

PRATES, P. B. *et al.* Evaluation of magnesium chloride waste recovery: A case study in nanofertilizers. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 21, p. 419–437, 2022.

QUEIROZ, A. J. P.; MORAIS, C. R. DA S. Soil characterization used in ceramic industries and an analysis of its feasibility in ecological bricks. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, p. 111–123, out. 2021.

RACANELLI, L. DE A. *et al.* Characterization of two types of clays of the municipality of São Miguel do Guamá used for fabrication of roofing tiles and blocks. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 5, p. 3803–3812, 2019.

RAI, R. K.; SINGH, V. P.; UPADHYAY, A. Soil Analysis. *Em*: RAI, R. K.; SINGH, V. P.; UPADHYAY, A. (Eds.). **Planning and Evaluation of Irrigation Projects**. London, UK: Elsevier, 2017. p. 505–523.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Connecting circular economy and industry 4.0. **International Journal of Information Management**, v. 49, p. 98–113, dez. 2019.

RAMOS, S. DE O. *et al.* Caracterização de argilas de novos jazimentos situados em Parelhas/RN, Brasil, visando aplicação na indústria cerâmica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

RAMPACEK, C. An overview of mining and mineral processing waste as a resource. **Resources and Conservation**, v. 9, p. 75–86, ago. 1982.

RAUPP-PEREIRA, F. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. Novas Edições Acadêmicas, 272 p., 2006.

REBELO, W. B.; ZACCARON, A. Evolução da mineração de argila para cerâmica vermelha na região da AMREC**, sob a ótica da lavra ambiciosa: Um estudo de caso. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 17, n. 3, 2020.

RENNER, G. T. Geography of Industrial Localization. **Economic Geography**, v. 23, n. 3, p. 167, jul. 1947.

RIETVELD, H. M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. **J. Appl. Crystallogr.**, v. 2, n. 65, p. 65–71, 1969.

RUIZ, A. S.; CHAVES, A. P. Flotação do carvão contido em um rejeito carbonoso. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 315–322, set. 2009.

SALAH, I. BEN *et al.* Potential use of the lower cretaceous clay (Kef area, Northwestern Tunisia) as raw material to supply ceramic industry. **Applied Clay Science**, v. 161, n. April, p. 151–162, 2018.

SALLEH, S. Z. *et al.* Recycling food, agricultural, and industrial wastes as pore-forming agents for sustainable porous ceramic production: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 306, p. 127264, jul. 2021.

SALVADOR, G. N. *et al.* Mining activity in Brazil and negligence in action. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 18, n. 2, p. 139–144, abr. 2020.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM-MCT Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007.

SANTANA, H. D.; ÍTAVO, L. C. V.; SILVA, L. F. DA. As relações dos atores envolvidos com o arranjo produtivo local Terra Cozida do Pantanal. **Interações (Campo Grande)**, v. 14, n. 1, p. 63–69, jun. 2013.

SANTOS, P. DE S. **Ciências e tecnologia de argilas**. 2ª ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher Ltda, 1989. v. 1

SANTOS, R. C. DE V. DOS S. Contribuição do setor mineral no produto interno bruto brasileiro. **Radar: tecnologia, produção e comércio exterior**, n. 65, 2021.

SARTOR, F. DE L. *et al.* Effect of the Addition of the Waste Generated from the Feldspar Mining on the Obtainment of Ceramic Brick. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 164–169, set. 2018.

SARTOR, F.; GEREMIAS, M. **Estudo de viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento de rejeitos provenientes do beneficiamento de rocha quartzo-feldspática no sul de Santa Catarina**. Criciúma, SC., Universidade SATC - UniSatc, 2022.

SAVIATTO, E. *et al.* Sustainable Mining: Reuse of Clay from Abandoned Areas in the South of Brazil for Ceramic Production Based on a Simplex Design. **Materials**, v. 16, n. 19, p. 6466, 28 set. 2023.

SEGUI, P. *et al.* Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. **Minerals**, v. 13, n. 1, p. 90, 6 jan. 2023.

SEMİZ, B.; ÇELİK, S. B. Mineralogical and geochemical characteristics of Belevi clay deposits at Denizli, SW Turkey: industrial raw material potential. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 8, p. 313, 11 abr. 2020.

SHAHBA, S. *et al.* Application of multi-attribute decision-making methods in SWOT analysis of mine waste management (case study: Sirjan's Golgohar iron mine, Iran). **Resources Policy**, v. 51, p. 67–76, mar. 2017.

SHEPARD, F. P. . Nomenclature Based on Sand-silt-clay Ratios. **SEPM Journal of Sedimentary Research**, v. 24, p. 151–158, 1954.

SILVA, G. H. M. J. S. DE; PERERA, B. V. A. Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 252–259, jul. 2018a.

SILVA, M. DE L.; PEREIRA, F. M. M. Caracterização de argilas provenientes de indústria de cerâmica vermelha do Município do Crato – Ceará, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e448101018392, 15 ago. 2021.

SILVA, R. A. DA *et al.* Caracterização de matérias-primas cerâmicas utilizadas na produção de placas de revestimento em indústria do Cabo de Santo Agostinho - PE. **Em: Tópicos Especiais em Engenharia: inovações e avanços tecnológicos 6**.

SIMÃO, L. *et al.* Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market

opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128678, out. 2021.

SINGH, S.; SUKLA, L. B.; GOYAL, S. K. Mine waste and circular economy. **Materials Today: Proceedings**, v. 30, p. 332–339, 2020.

SOTERO, M. *et al.* **Projeto de materiais de construção na região metropolitana de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: Ministério de Minas e Energia, 2020.

SOUZA, M. T. *et al.* Aluminum anodizing waste and its uses: An overview of potential applications and market opportunities. **Waste Management**, v. 84, p. 286–301, fev. 2019.

STOKES, G. G. **On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1844.

STRAZZERA, B.; DONDI, M.; MARSIGLI, M. Composition and ceramic properties of tertiary clays from southern Sardinia (Italy). **Applied Clay Science**, v. 12, n. 3, p. 247–266, jul. 1997.

SUN, Q.; TANG, Z. **Establishment and Empirical Study of Evaluation Index System on Mining Corporations Circular Economy** 2010 3rd International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. **Anais...** Kunming, China: IEEE, nov. 2010

TANEJA, S. P.; RAJ, D. Identification of iron oxide and hydroxide in soil clays. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 76, n. 1–4, p. 230–232, abr. 1993.

TAYPONDOU DARMAN, J. *et al.* Evaluation of lateritic soils of Mbé for use as compressed earth bricks (CEB). **Heliyon**, v. 8, n. 8, p. e10147, ago. 2022.

UPADHYAY, A. *et al.* Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. **Resources Policy**, v. 72, p. 102037, ago. 2021.

USEPA. **Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number SW-846** Washington, DC, 1986.

VARELA, M. L. *et al.* Otimização de uma metodologia para análise mineralógica racional de argilominerais. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 388–392, 2005.

VASIĆ, M. V. *et al.* Recycling of waste coal dust for the energy-efficient fabrication of bricks: A laboratory to industrial-scale study. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101350, fev. 2021.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; DUAILIBI FH, J. Considerações sobre o Uso da Granulometria como Parâmetro de Controle de uma Argila Sedimentar. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 1, p. 23–26, 2005.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, p. 245–250, dez. 2003.

VIGNES, J. *et al.* **Effect of moisture on the behaviour of an extruded clay pastel** 16th Annual ESAFORM conference on material forming. **Anais...Aveiro**, Portugal: ESAFORM 2013, 2013

VILAÇA, A. S. I. *et al.* Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resources Policy**, v. 75, p. 102477, mar. 2022.

VILLACHICA, C. *et al.* Circular Economy in Tailings Management. **Mine Water and the Environment**, v. 40, n. 1, p. 23–35, 5 mar. 2021.

WIEMES, L.; PAWLOWSKY, U.; MYMRIN, V. Incorporation of industrial wastes as raw materials in brick's formulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 69–77, jan. 2017.

WINKLER, H. G. F. Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. **Berichte Deutsche Keramics Gesellschaft**, v. 31, p. 337–343, 1954.

WOLF, A.; ROSENDAHL, P. L.; KNAACK, U. Additive manufacturing of clay and ceramic building components. **Automation in Construction**, v. 133, p. 103956, jan. 2022.

WOŹNIAK, J.; PACTWA, K. Overview of Polish Mining Wastes with Circular Economy Model and Its Comparison with Other Wastes. **Sustainability**, v. 10, n. 11, p. 3994, 2018.

YU, S. *et al.* Role of mining waste trade on green development in China: Policy implications for circular economy. **Resources Policy**, v. 86, p. 104147, out. 2023.

ZACCARON, A. *et al.* Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 3, 2014.

ZACCARON, A. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para a fabricação de cerâmica vermelha**. Criciúma, SC: Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, 2018.

ZACCARON, A. *et al.* Efeito da adição de resíduo de vidro em massa de cerâmica de alvenaria. **Revista Materia**, v. 24, n. 4, 2019.

ZACCARON, A. *et al.* Characterization and use of clays and argillites from the south of Santa Catarina State, Brazil, for the manufacture of clay ceramics. **Clay Minerals**, v. 55, n. 2, p. 172–183, 3 jun. 2020.

ZACCARON, A. *et al.* Analysis of clay ceramic microstructure with the glass waste incorporation. **Revista de Ciencia y Tecnología**, n. 37, p. 32–39, 10 maio 2022.

ZACCARON, A. *et al.* The behavior of different clays subjected to a fast-drying cycle for traditional ceramic manufacturing. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 36, n. 5, p. 339–348, jul. 2024.

ZACCARON, A.; SOUZA NANDI, V.; BERNARDIN, A. M. Fast drying for the manufacturing of clay ceramics using natural clays. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101877, jan. 2021.

ZHAO, Y. *et al.* Discussion on the Model of Mining Circular Economy. **Energy Procedia**, v. 16, p. 438–443, 2012.

ZOCCHÉ, J. J. *et al.* Technosols in coal mining areas: Viability of combined use of agro-industry waste and synthetic gypsum in the restoration of areas degraded. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 13, p. 100618, abr. 2023.

ZURBRÜGG, C. *et al.* Determinants of sustainability in solid waste management – The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia. **Waste Management**, v. 32, n. 11, p. 2126–2133, nov. 2012.