

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

WAGNER BENEDET REBELO

**CIRCULARIDADE MINERAL DA FRAÇÃO RESIDUAL FINA
DO REJEITO DE CARVÃO COMO ESTRATÉGIA DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PARA O APL DE
CERÂMICA VERMELHA DE MORRO DA FUMAÇA/SC**

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

R291c Rebelo, Wagner Benedet.

Circularidade mineral da fração residual fina do rejeito de carvão como estratégia de desenvolvimento sustentável para o APL de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça/SC / Wagner Benedet Rebelo. - 2025.

136 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. Cerâmica vermelha - Propriedades tecnológicas. 3. Economia circular. 4. Rejeitos da mineração de carvão - Reaproveitamento. I. Título.

CDD 23. ed. 620.135

Wagner Benedet Rebelo

Circularidade mineral da fração residual fina do rejeito de carvão como estratégia de desenvolvimento sustentável para o APL de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça/SC.

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, 25 de fevereiro de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



ELIDIO ANGIOLETTO

Data: 27/02/2025 08:37:11-0300

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

Prof. Dr. Elídio Angioletto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



MORGANA NUERNBERG SARTOR FARACO

Data: 25/02/2025 21:33:32-0300

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

Profª. Drª. Morgana Nuernberg Sartor Faraco

Centro Universitário - UniSatc

Assinado por: **Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro**

Num. de Identificação: 05403140

Data: 2025 02 25 15:09 27+00'00'

Prof. Dr. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro

Instituto Politécnico de Viana do Castelo - IPVC

Merecedores desta dedicatória são as pessoas que estiveram ao meu lado me incentivando a buscar o êxito: esposa, pais e professores.

AGRADECIMENTOS

O agradecimento especial é para a minha esposa, Mirian Melo Bitencourt, que me levantou em momentos de fraqueza. Aos meus pais, Valdemar Rebelo e Maria Helena Benedet Rebelo por proporcionarem a base educacional, valores e sabedoria.

Aos meus amigos de infância e atuais, que de alguma forma influenciam e contribuem para o meu crescimento.

Agradeço ao Sindicer e a NATREB por disponibilizarem o laboratório LabCer da qual realizei grande parte dos meus experimentos, assim como o Paulo Fernandes e Vitor Nandi pelas orientações prestadas em laboratório. Agradeço ao Richard Minatto Mezari e Mateus Milanez por também me auxiliar em alguns ensaios. Ainda, agradeço ao Instituto Politécnico de Viana do Castelo, por também disponibilizar alguns dos seus laboratórios para realização de ensaios.

Agradeço toda instrução do meu orientador Fabiano Raupp-Pereira e coorientador Alexandre Zaccaron. Ambos me auxiliaram precisamente nos momentos de dúvidas. Estendo os agradecimentos aos professores do PPGCEM/UNESC pelos ensinamentos e aos membros da banca pela disponibilidade em avaliar meu estudo.

Sou grato a todas as pessoas que impuseram críticas construtivas ao longo do caminho da vida. Essas experiências me motivaram a buscar formações intelectuais e me ajudaram a desenvolver profundo autoconhecimento, além de fortalecer minha certeza de que sou capaz de superar desafios.

Finalmente, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que por meio do Projeto CNPq/CT Mineral, que fomentou e tornou possível a realização desta etapa (processo nº 381506/2023-1).

“A divisão do trabalho é o resultado da capacidade humana de cooperar e especializar-se.”

Adam Smith

RESUMO

Essa pesquisa técnico-científica averiguou o comportamento resultante da adição da fração residual fina do rejeito de carvão, em conjunto com duas argilas para a produção de cerâmica vermelha: a argila plástica e o argililo, popularmente denominado como taguá. Embora estudos correlatos sejam constantemente realizados, a literatura carece de trabalhos científico efetivamente aplicados a indústria, que ilustrem possíveis benefícios ou problemáticas. Inicialmente, estes três materiais foram caracterizados quanto suas propriedades químicas, físicas, mineralógicas, térmicas e morfológicas e, posteriormente, formuladas dez composições através do sistema de mistura simplex centroide, variando percentuais entre os três materiais. Na sequência foram confeccionados corpos-de-prova, submetendo-os sob três condições de temperatura: 750, 850 e 950 °C. Após tratamento térmico, os corpos-de-prova foram caracterizados e, além de estudar o desempenho e o comportamento tecnológico, tais como a retração, absorção de água e resistência mecânica, foram averiguados os indicadores ambientais dos produtos e os aspectos econômicos dos processos. A aplicação do rejeito fino, com incremento em até 35%, têm a tendência geral de melhorar as características das amostras, especialmente a resistência mecânica. No entanto, ao ultrapassar este limite, observa-se redução no desempenho. Ao comparar a composição F.7, que possui 33,3% de cada material, junto com a formulação padrão da cerâmica vermelha, que corresponde a F.4, composta por 50% de argila plástica e taguá, os resultados foram semelhantes. Todavia, ao comparar a amostra padrão junto com a F.8, que possui incremento menor de rejeito fino, com 16,6%, os resultados apresentaram valores superiores. Para as investigações ambientais e econômicas, foi desenvolvido nova formulação, a denominada F.11 considerada a ideal visando a produção industrial, com incremento de 10% de rejeito fino de carvão. Esta nova composição caracterizou-se ambientalmente como resíduo não perigosos - classe II, sendo um aspecto positivo para a validação ambiental, embora tenha solubilizado manganês e selênio, classificando-a como não inerte. Sob os aspectos econômicos, as vantagens estenderam-se tanto para o setor cerâmico, que incluem a aquisição de materiais e o tratamento térmico dos produtos, assim como para o setor carbonífero.

Palavras-chave: cerâmica vermelha, economia circular, rejeito fino de carvão.

ABSTRACT

This research evaluated the outcome behavior of adding residual fraction of coal tailings, along with two types of clay, for producing clay ceramic: Plastic clay and argillite, commonly known as “tagua”. Although other studies are frequently done regarding this subject, the existing literature lacks scientific studies related to industrial applications, especially ones that show possible benefits or problems. Firstly, these three materials were analyzed as to their chemical, physical, mineralogic, thermal and morphological properties, afterwards ten formulations were developed with them, using a design of experiments (DOE) simplex centroid, varying the rates of each material present. Those were used to make the test pieces, which were submitted to three different temperatures: 750°, 850°, 950°C. After that thermal treatment, the samples were analyzed as to their shrinkage, water absorption and tensile strength, besides environmental indicators for each resulting samples, as well as the economic aspects of the process. The use of residual fraction up to 35% has a general tendency to improve the characteristics of the samples, especially regarding tensile strength. However, after this threshold, the performance dropped. Both sample F.7, which has 33.3% of each material, and the standard formulation for clay ceramic (sample F.4) composed of 50% each plastic clay and argillite, showed similar results. While the standard v. sample F.8, that has a smaller increment of residual fraction (16.6%), the standard sample showed a greater performance. For the environmental and economic evaluation, a new sample was created, named F.11, having 10% of residual fraction. That showed the optimum results. This new composition was determined to be a non-hazardous waste – class II, a positive aspect regarding environment approval, although it did show manganese and selenium solubilization, being characterized as non-inert. As to the economic aspects, both the carbon extraction industry as well as the clay ceramic industry would benefit from such a process, the latter being able to acquire cheaper materials and greater thermal properties in the end.

Keywords: Ceramic clay, circular economy, residual fraction of coal tailings

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Amostras representativas dos artefatos da cerâmica vermelha, tijolo de vedação (a), telha (b) e tavela (c).....	43
Figura 2 - Frente de lavra em ambiente de morro (a), frente de lavra em ambiente de várzea (b), executadas com escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes.....	44
Figura 3 - Representação de uma extrusora e de cortador de peças (a), bem como da boca de entrada de forno contínuo (b) na produção de cerâmica vermelha.....	45
Figura 4 - Materiais utilizados no estudo: argila plástica (AP/a), taguá (T/b) e rejeito fino de carvão (R/c).	49
Figura 5 - Polo produtivo de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça/SC.	50
Figura 6 - Representação dos títulos minerários da COOPEMI dentro do município de Içara.....	51
Figura 7 - Frentes de lavra da COOPEMI destacando os diferentes locais de coleta dos materiais: (a) ambiente de várzea e (b) ambiente de encosta.....	52
Figura 8 - Representação dos títulos minerários que compõem a coleta da argila em ambiente de várzea (a) e ambiente de encosta (b).	53
Figura 9 - Mapa de representação dos pontos de coleta: (a) ambiente de várzea, indicando p1 e p2 e (b) ambiente de encosta, indicando p3 e p4.....	53
Figura 10 - Momento da coleta dos materiais: (a) em ambiente de várzea para o material AP, (b) em ambiente de encosta para o material T e (c) armazenamento em sacos plásticos.	54
Figura 11 - Detalhe da unidade de britagem do material T, mostrando pilha objeto da coleta do material de estudo (lado direito).	54
Figura 12 - Filtro prensa relacionado ao processo de beneficiamento do carvão (a) e o instante da coleta do rejeito fino de carvão (b).	55
Figura 13 - Representação do diagrama <i>simplex centroid</i> revelando as 10 formulações do projeto.....	61
Figura 14 - Preparo dos materiais, representando a pesagem da formulação (a), o destorroamento manual (b), o equipamento laminador (c), e o preparo finalizado (d).	63
Figura 15 - Preparação de suspensões das amostras para o ensaio de resíduo bruto.	64

Figura 16 - Gráfico do índice de trabalhabilidade ilustrando as zonas aceitáveis e ótimas de extrusão.....	65
Figura 17 - Processo de extrusão realizado para a confecção dos corpos-de-prova do estudo.....	66
Figura 18 - Amostra dos corpos-de-prova obtidos após secagem para avaliação tecnológica das formulações.....	67
Figura 19 - Demonstração das etapas relacionadas ao corte manual (a), a medição (b), a pesagem (c) e a representação de todos os corpos-de-prova para uma única formulação (d).....	68
Figura 20 - Detalhe da estufa (a) e do forno mufla (b) utilizados no tratamento térmico dos corpos-de-prova.	69
Figura 21 - Máquina universal de ensaios mecânicos utilizado para a realização de ensaios de resistência mecânica.	71
Figura 22 - Composição qualitativa mineralógica dos materiais obtido por difração de raios X.....	80
Figura 23 - Distribuição do tamanho de partículas das dos materiais estudados.	82
Figura 24 - ATD/TG das amostras estudadas, com linhas sólidas (—) para TG e linhas pontilhadas (...) para ATD.....	83
Figura 25 - Representação gráfica do índice de trabalhabilidade das dez formulações desenvolvidas nas zonas aceitáveis e ótimas de extrusão.....	90
Figura 26 - Curvas dilatométricas das dez formulações desenvolvidas com ciclo térmico completo (aquecimento e resfriamento) até 950 °C.	91
Figura 27 - Curvas de queima das dez formulações desenvolvidas, obtidas a partir das curvas dilatométricas e admitindo uma razão $dL/dt = \text{Constante (k)}$, usando para e todas as curvas $k = 1$	92
Figura 28 - Fotografias dos corpos-de-prova após o ensaio de dilatometria, que permitem avaliar em detalhe os diferentes graus de combustão da matéria orgânica em cada uma das amostras.....	93
Figura 29 - Detalhe dos CPs das diferentes formulações após o processo de queima nas temperaturas de 750, 850 e 950 °C.....	94
Figura 30 - Amostras que detalhem a presença de coração negro (a) e delaminação (b) em CPs queimados na temperatura de 750 °C.	97
Figura 31 - Detalhe dos CPs indicando a presença de coração negro nas formulações F.3, F.6 e F.10, sob as temperaturas 750 °C, 850 °C e 950 °C.....	98

Figura 32 - Retração térmica linear total de todas as formulações sob as diferentes faixas de temperaturas de queima.	101
Figura 33 - Superfície resposta para a análise de retração linear total, para as três temperaturas avaliadas.	102
Figura 34 - Superfície resposta para a análise de absorção de água, para as três temperaturas avaliadas.	106
Figura 35 - Superfície resposta para a análise de resistência mecânica, para as três temperaturas avaliadas.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentuais necessários para o desenvolvimento de cada formulações conforme o diagrama de misturas.....	61
Tabela 2 - Quantidade em massa úmida necessária para o desenvolvimento de cada formulação.	62
Tabela 3 - Teor de umidade <i>in natura</i> dos materiais estudados.	76
Tabela 4 - Composição química dos materiais obtido por espectrometria de fluorescência de raios X.	77
Tabela 5 - Frações cumulativas (10, 20, 50 e 90%) da distribuição do tamanho de partículas dos materiais estudados.....	82
Tabela 6 - Ensaio dos elementos combustíveis no rejeito fino (R).	85
Tabela 7 - Ensaio dos sais solúveis dos materiais estudados.	85
Tabela 8 - Valores de resíduo bruto para as dez formulações desenvolvidas.....	87
Tabela 9 - Índices de plasticidade de Atterberg das dez formulações desenvolvidas.....	89
Tabela 10 - Resultados da caracterização tecnológica de umidade e retração linear de secagem.	95
Tabela 11 - Resultados de caracterização tecnológica de retração linear de queima, perda ao fogo, absorção de água e resistência mecânica para as diferentes temperaturas de queima.....	96
Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA) para retração linear total, para as três temperaturas avaliadas.	102
Tabela 13 - Análise de variância (ANOVA) para absorção de água, para as três temperaturas avaliadas.	105
Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para resistência mecânica, para as três temperaturas avaliadas.	109
Tabela 15 - Resultados tecnológicos para a F.11 e F.8 sob as temperaturas 750, 850 e 950 °C.....	111
Tabela 16 - Resultados do ensaio de corrosividade para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.	112
Tabela 17 - Resultados do ensaio de reatividade para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.	112
Tabela 18 - Resultado do ensaio de toxicidade para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C..	113
Tabela 19 - Resultados do ensaio de lixiviação para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.	113
Tabela 20 - Resultados do ensaio de solubilização para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.	114

Tabela 21 - Variáveis com transporte por km rodado.....	117
Tabela 22 - Custos para a aquisição dos materiais com base nas formulações F.4 e F.11.	117
Tabela 23 - Custo com transporte de material com base nas formulações F.4 e F.11.	118
Tabela 24 - Custo global para produzir a F.4 e F.11.....	118
Tabela 25 - Viabilidade econômica para a produção da composição padrão, F.4 na temperatura de 850 °C, junto com a formulação ideal, a F.11 na temperatura de 750 °C.	119
Tabela 26 - Resultado econômico proporcionado no setor da cerâmica vermelha, com a utilização da composição F.11.	120
Tabela 27 - Despesas com o manejo de rejeito fino de carvão de forma legal.	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fluxograma geral das seis etapas experimentais desenvolvidas.....	47
Quadro 2 - Classificação das formulações conforme o Índice de Plasticidade (IP).....	65
Quadro 3 - Volume de material produzido pelo setor da cerâmica vermelha e setor carbonífero.....	116
Quadro 4 - Variáveis com aquisição das argilas plástica (AP) e taguá (T).	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
ANICER – Associação Nacional de Indústria Cerâmica
APL CV-MF – Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça/SC
CE – Comissão Europeia
CECAM/Iparque – Laboratório de Cerâmica e Centro de Caracterização de Materiais
CerTec/Iparque – Laboratório de Cerâmica Técnica
COOPEMI – Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga
CPQvA – Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade
CRC/São Carlos – Centro de Revestimentos Cerâmicos
DAM – Drenagem Ácida de Mina
ESG – *Environmental, Social and Governance*
EU COM – Comunicação da União Europeia
IDT/UNESC - Instituto de Engenharia e Tecnologia
IGEO – Instituto de Geociências
Iparque/UNESC – Parque Científico e Tecnológico
IPAT/UNESC - Instituto de Pesquisa Ambientais e Tecnológica
Laqua/UniSatc – Laboratório de Águas e Efluentes da UniSatc
NBR – Norma Brasileira
OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU – Organização das Nações Unidas
RedeAPLmineral – Rede Brasileira de Informação de Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral
ROM – *Rom-of-mine*
SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SINDICER - Sindicato da Indústria da Cerâmica Vermelha
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
WWF – *World Wildlife Fund*

LISTA DE SÍMBOLOS

g - Grama
h - Hora
ha - Hectare
Kg - Quilograma
km - Quilômetro
kV - Quilovolts
m³ - Metro cúbico
mA - Miliamperes
min - Minuto
mL - Mililitro
mm - Milímetro
mm³ - Milímetro cúbico
MPa - Mega pascal
MW - Megawatt
N/s - Newton por segundo
RPM - Rotações por minuto
s - Segundo
 α - Alfa
- Malha
% - Porcentagem
°C - Graus Celsius
 μm - Micrómetro
 μV - Microvolt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
2	JUSTIFICATIVA	33
3	OBJETIVOS	37
3.1	OBJETIVO GERAL	37
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
4.1	SETOR CARBONÍFERO	40
4.1.1	Beneficiamento mineral e rejeito	41
4.1.2	Meio ambiente	42
4.2	SETOR DA CERÂMICA VERMELHA	42
4.2.1	Extração mineral sul catarinense	44
4.2.2	Etapas produtivas	44
4.2.3	Propriedades das argilas	45
5	MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1	COLETA DOS MATERIAIS (ETAPA I)	48
5.1.1	Coleta das argilas	50
5.1.2	Coleta do rejeito fino de carvão	55
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA II).....	55
5.2.1	Umidade <i>in natura</i>	56
5.2.2	Fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX)	56
5.2.3	Distribuição de tamanho de partículas (DTP)	57
5.2.4	Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG):	57
5.2.5	Análise elementar (CHNS-O)	58
5.2.6	Sais solúveis (por condutividade elétrica)	59
5.3	DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES (ETAPA III)	60
5.4	CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES (ETAPA IV)	63
5.4.1	Resíduo bruto (RB)	64
5.4.2	Plasticidade (PL)	64
5.4.3	Dilatometria (DL)	66
5.5	PROCESSAMENTO (ETAPA V)	66
5.6	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA (ETAPA VI).....	69
5.6.1	Caracterização tecnológica dos CPs	69
5.6.1.1	Perda ao fogo (PF)	70
5.6.1.2	Retração linear (RTL)	70

5.6.1.3	Absorção de água (AA)	70
5.6.1.4	Resistência mecânica (RM)	71
5.6.2	Caracterização ambiental dos CPs.....	72
5.6.3	Caracterização econômica.....	73
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	75
6.1.1	Umidade <i>in natura</i>	75
6.1.2	Caracterização química e mineralógica (FRX/DRX)	76
6.1.3	Distribuição de tamanho de partícula (DTP)	81
6.1.4	Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG)	83
6.1.5	Análise elementar (CHON-S).....	84
6.1.6	Sais solúveis	85
6.2	CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES	86
6.2.1	Resíduo bruto	86
6.2.2	Plasticidade.....	88
6.2.3	Dilatometria.....	90
6.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	93
6.3.1	Retração linear (RTL)	98
6.3.2	Absorção de água (AA).....	103
6.3.3	Resistência mecânica (RM)	107
6.3.4	Desenvolvimento da formulação ideal (F.11)	110
6.4	CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL.....	112
6.5	CARACTERIZAÇÃO ECONÔMICA	115
6.5.1	Aquisição dos materiais.....	116
6.5.2	Processo Produtivo	119
6.5.3	Relação econômica entre F.4 e F.11	120
6.5.4	Manejo de Rejeito	120
7	CONCLUSÃO.....	123
	REFERÊNCIAS.....	127

1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa abrange importantes setores produtivos para a região sul de Santa Catarina, que possuem grande destaque no desenvolvimento regional e geração de riqueza. Envolve o setor da cerâmica vermelha, que é um segmento da indústria e que produz materiais para construção civil, sobretudo tijolos, telhas e tavelas. Ele ainda depende diretamente da mineração e fornecimento de argilas, que são as matérias-primas essenciais para a fabricação destes artefatos cerâmicos (Zaccaron, 2018).

O outro setor é o carbonífero, que se dedica à exploração, produção e fornecimento de carvão mineral. O uso principal deste material correlaciona-se com a geração de energia elétrica, sendo destinado e utilizado pela termoeletrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo/SC (Soares; Santos; Possa, 2008). Esta é a maior usina à carvão do Brasil com capacidade instalada de 857 MW (ENGIE, 2021).

Apesar da influência cultural, social e avanços econômicos proporcionado por ambos os setores, aspectos ambientais negativos marcaram principalmente o carbonífero. Durante muitos anos, os problemas enfrentados relacionavam-se com o conhecimento científico ambiental insipiente e a lavra predatória devido à baixa tecnologia disponível. Além disso, havia o expressivo volume de rejeitos gerados durante os processos de beneficiamento mineral, que foram, até o final da década de 1990, manejados e descartados de maneira inadequada (Sousa, 2022). Estas práticas resultaram em níveis de degradação ambiental praticamente irreversíveis para a região, que persiste até os dias atuais (Milioli; dos Santos; Citadini-Zanette, 2009).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 (Brasil, 2010), artigo 3º, inciso XV, define rejeitos como sendo os materiais que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não seja a disposição final ambientalmente adequada. Já a definição para resíduos, estabelecida no inciso XVI, indica que são materiais que apresentam características que os permitem ser tratados e recuperados, por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, agregando valor ao material, de modo que possam ser reaproveitados.

Diante destes apontamentos, fica evidente a importância de valorizar os resíduos que possuam potencialidade para a reutilização, evitando que sejam descartados como rejeitos, e que provoquem impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. Para além disso, a busca pela reintrodução destes potenciais materiais na cadeia produtiva pode

gerar benefícios econômicos, como a redução de custos de produção e de gestão, a minimização da exploração mineral e uso de matéria-prima, assim como para a melhoria das propriedades de determinado produto (Pactwa; Woźniak; Dudek, 2020).

A área de engenharia e a de ciência dos materiais, visam solucionar tais problemas, buscando valorizá-los mediante pesquisas científicas, na pretensão de encontrar alternativas para o reaproveitamento. Torna-se, portanto, essencial investigar as propriedades dos materiais e as técnicas adequadas de processamento, que visam desempenho e que permita sua aplicação como material ou produto de engenharia (Callister Jr; Rethwisch, 2016).

Ressalta-se que o setor de mineração de carvão da região sul de Santa Catarina, em média mensal, gera entorno de 300.000 toneladas de rejeito, que correspondem a aproximadamente 50% de todo o ROM (*run-of-mine*) (Faraco, 2022). Esses materiais são descartados em aterros específicos e controlados, porém sem qualquer forma de reaproveitamento.

De acordo com a Comunicação da UE COM/2014/398 “Rumo a uma economia circular: Um programa de desperdício zero para a Europa”, apresenta os principais objetivos e ações da CE, e planeja que o armazenamento de resíduos em aterros deverá ser banido completamente até o ano de 2050. Prevê-se que o mercado de matérias-primas secundárias, contudo, experimente um crescimento dinâmico, priorizando a reutilização e reciclagem de resíduos (Pactwa; Woźniak; Dudek, 2020).

Diante desta tendência europeia, o setor de mineração de carvão no Brasil, responsável por gerar expressivos volumes de rejeito, precisa se adaptar ou acompanhar as novas exigências. Portanto, há fortes incentivos para que a comunidade científica e industrial possa estudar ou explorar novas maneiras de aproveitar estes materiais como fontes de matérias-primas alternativas, em diferentes setores produtivos.

Em um contexto geral, diversas pesquisas científicas apresentam resultados positivos sob aspectos relacionados a qualidade de produtos a partir de resíduos. No entanto, a adoção ou desenvolvimento de tais projetos, em geral, desconsideram fatores como quantidade e viabilidade, os quais acabam por inviabilizar qualquer possibilidade de valorização ou aplicação efetiva destes materiais (Ângulo; Zordan; John, 2002; Raupp-Pereira, 2006).

Desta forma, considerando-se que os produtos de cerâmica vermelha têm baixo valor agregado, o aspecto logístico se torna essencial na colaboração e no fornecimento destes materiais de forma integrada entre as empresas (Quintana; Bueno; de Melo, 2012). Nesse sentido, o

transporte é um fator crítico, constituindo uma significativa parcela nos custos totais das etapas de lavra (Curi, 2017), especialmente quando o destino das matérias-primas é para o setor da cerâmica vermelha. Além disso, é necessário garantir que o produto acabado esteja completamente livre de contaminações ou esteja inertizado, para não transferir substâncias químicas nocivas ao meio ambiente durante os processos produtivos ou no instante de seu uso (Rebello, 2022; Ribeiro, 2004).

Diante desta temática, a abordagem adotada neste estudo consistirá na aplicação da sistemática CPQvA para valorização de resíduos (Raupp-Pereira, 2006). Conceitualmente, esta metodologia sugere a valorização de resíduos ou subprodutos industriais, como fontes minerais alternativas, considerando a Classificação (C), Potencialidade (P), Quantidade/viabilidade (Qv) e Aplicabilidade (A).

A carência de estudos que abordam a qualidade tecnológica em sintonia com as análises de viabilidade ambientais e econômicas, pode desencorajar empresas a adotarem práticas visando a valorização de resíduos, ou ainda esbarrar nos enquadramentos ambientais legais. Contudo, havendo comprovação científica e técnica das aplicações em todos os aspectos, assim como a possível utilização na indústria, os retornos podem ser extremamente significativos, resultando em avanços para o desenvolvimento sustentável.

Ao utilizar resíduos como fonte alternativa mineral, inicialmente espera-se solucionar ou minimizar os problemas decorrentes com o seu manejo e deposição final em aterros específicos. Tais problemas envolvem elevados custos e, embora os aterros sejam controlados, estes apresentam riscos associados aos impactos ambientais. Assim, este estudo está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente com os quesitos 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (ONU, 2022).

Esses objetivos também estão relacionados com o conceito de economia circular, que propõe um novo paradigma de produção que visa reduzir o desperdício de recursos e maximizar o seu valor. As empresas que adotam esse conceito buscam valorizar os resíduos gerados em seus processos, transformando-os em novos produtos ou matérias-primas (dos Anjos, 2021). Essa prática traz benefícios ambientais, sociais e econômicos, além de estar alinhada com os princípios ESG (*Environmental, Social and Governance*), que avaliam o desempenho das empresas em relação à sustentabilidade e à responsabilidade corporativa (Da Silva, 2021).

Ressalta-se também a importância do conceito de simbiose industrial, estabelecido pela OCDE - Organização para a Cooperação e

Desenvolvimento Econômico (Ekins *et al.*, 2019), a qual busca o desenvolvimento de parcerias entre empresas de diferentes setores, com foco na gestão eficiente e sustentável de resíduos. Ao invés de descartar, as empresas geradoras encontram oportunidades para que outras possam aproveitá-los, sendo reinseridos na cadeia produtiva como subprodutos de valor agregado (Weetman, 2019). Torna-se válido destacar que o processo de valorização de resíduos necessita ser criteriosamente investigado para garantir a viabilidade e o sucesso de aplicação.

Portanto, o escopo deste trabalho envolveu, no âmbito da economia circular e da simbiose industrial, dois setores produtivos extremamente importantes para a região sul de Santa Catarina, que correspondem ao setor da cerâmica vermelha e da mineração de carvão. Assim, objetivou-se demonstrar que a fração residual fina do rejeito de carvão, ou simplesmente, rejeito fino de carvão, que atualmente é um problema e está sendo disposto em aterros industriais com elevados custos, pode ser transformada em fonte mineral alternativa e incluída no setor da cerâmica vermelha a partir da sistemática CPQvA. Ainda, pretendeu-se contribuir com o desenvolvimento regional sustentável, bem como manter ou melhorar as propriedades tecnológicas dos produtos cerâmicos inserido no Arranjo Produtivo Local - APL de Morro da Fumaça/SC.

2 JUSTIFICATIVA

Convém destacar que os rejeitos gerados pela extração de carvão pela indústria carbonífera são separados e classificados sob duas frações. Primeiro tem-se os grossos, que são originados durante o processo de separação gravimétrica em equipamentos como os jigues ou meio denso, com aglomerados variando entre 58,8 e 2,0 mm. Na sequência do tratamento mineral, concentra-se as frações finas, com tamanho de grãos inferiores a 2 mm e são separados com uso de diversos equipamentos, podendo destacar as mesas concentradoras, espirais, hidrociclones e flotação (da Luz; França; Braga, 2018).

Conforme informações concedidas pela Carbonífera Rio Deserto, considerando somente as frações residuais finas, que é objeto desta pesquisa, elas correspondem a 12% de todo o minério bruto extraído, perfazendo, somente para aquela empresa, a quantidade anual gerada de aproximadamente 127.500 toneladas.

A disposição adequada dos rejeitos implica, além de elevados custos com transporte e todas as operações que envolvem a disposição nos aterros industriais, se mal geridos, também podem implicar em riscos de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrânea e dos ecossistemas (Barbosa, 2017). Diante da complexidade do setor carbonífero, surge a necessidade de encontrar alternativas para sua valorização e investigar possíveis oportunidades para a reutilização, transformando estes materiais inúteis em recursos úteis.

Por sua vez, o setor da cerâmica vermelha de Morro da Fumaça/SC demanda por expressivo volume de matéria-prima, na medida que as reservas de argilas estão gradualmente se esgotando. De acordo com informações concedidas pela Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga - COOPEMI, que é a entidade fomentadora de bens minerais ao setor, no ano de 2024 foram comercializadas 460 mil toneladas de argila.

Os registros históricos da COOPEMI indicam que a entidade modificou, a partir do ano de 2012, seus métodos de trabalho em função de necessidades no suprimento de argila. Naquela época, era evidente que as reservas disponíveis e licenciadas, constituídas por argilas de elevada qualidade e com uso direto na indústria, estavam se esgotando de modo acelerado. Tal situação induziu a entidade a buscar outros tipos de argila, e a solução encontrada foi a reativação de antigas jazidas abandonadas. Estas áreas, formadas pela extração mineral sem qualquer plano preestabelecido, ou efetuada de modo a impossibilitar o posterior aproveitamento econômico, denominada de lavra ambiciosa, e possuíam,

conforme informações fornecidas pelo setor, matérias-primas com propriedades limitadas e de baixa qualidade.

Durante este período, a cooperativa enfrentou resistência frente aos seus cooperados, em virtude das mudanças operacionais, principalmente por adotar a alternância entre o fornecimento de argilas, ora em áreas consideradas pelos ceramistas com qualidade, ora em áreas que estavam abandonadas. Em paralelo e diante de toda a turbulência, mesmo que de forma empírica, a cooperativa incentivou aos seus cooperados a realização de blendagem, que incluía as misturas dos diferentes tipos de matérias-primas.

De maneira geral, as argilas presentes nos locais que estavam abandonados são de dois tipos: as arenosas, que têm pouca plasticidade, mas que podem se comportar bem na massa cerâmica se misturadas em proporção adequada; e o argilito, conhecido popularmente como taguá, que apresenta elevada coesão entre partículas, exigindo processamento mecânico de britagem para a utilização na indústria cerâmica, ou longo período de sazonalização pós lavra, para promover o intemperismo e a sua fragmentação natural (Rebello; Zaccaron, 2020; Saviatto *et al.*, 2023).

A mudança de hábito e de cultura produtiva aconteceu, e as empresas gradualmente adotaram práticas de otimização das matérias-primas, inserindo em seus lotes, aqueles materiais que antes estavam sendo desprezados. Ao explorar áreas abandonadas, a COOPEMI aumentou a capacidade de fornecimento e ampliou a vida útil das reservas minerais.

Este projeto foi reconhecido pelo prêmio de melhores práticas no ano de 2013, promovido pela Rede Brasileira de Informação de Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral (RedeAPLmineral), que é uma entidade sem fins lucrativos, constituída e apoiada por instituições públicas, privadas e diversos especialistas do setor (Pagnan *et al.*, 2023). O saldo computado considerou que, havendo a continuidade das extrações na forma antiga, com aproveitamento irregular das reservas, elas teriam vida útil curta, calculada para 15 anos. Já com a mudança de concepção, passou a considerar que as reservas aproveitadas de forma racional e sustentável, ampliaram, naquela época, a vida útil para 50 anos.

Efetivamente a COOPEMI ainda vêm explorando estas áreas que estavam abandonadas, onde ainda existem grandes volumes de material disponíveis para serem aproveitados. Mesmo com exploração racional das reservas de argila, estas são finitas e estão sujeitas ao esgotamento. Diante desta preocupação, o setor da cerâmica vermelha busca por fontes minerais alternativas para garantir a sustentabilidade produtiva e ambiental, por meio da introdução de subprodutos industriais de outras

atividades que possam substituir ou complementar as argilas (Benedet *et al.*, 2023; Zaccaron *et al.*, 2019).

Assim, destaca-se que a valorização do rejeito fino de carvão deve ser realizada a partir da identificação de características físico-químicas potenciais atribuídas por dois diferentes aspectos: (i) de geolocalização, o qual estabelece as características geológicas naturais dos minérios presentes no material e (ii) de processamento, relacionado com as diferentes operações de beneficiamento aplicados na obtenção de carvão energético da região sul catarinense e, conseqüentemente, na geração dos rejeitos minerais inorgânicos desta segregação (Acordi, 2017; Faraco, 2022).

Ressalta-se também que o rejeito fino de carvão, em geral, contém argilominerais, fração energética remanescente e outros minerais de densidades intermediárias (Campos *et al.*, 2010; Hummes, 2007).

A similaridade química e mineralógica entre a fração residual fina proveniente da extração mineral de carvão e de matérias-primas argilosas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha (Rebelo, 2022), despertou interesse em averiguar a sua valorização como fonte mineral alternativa. Estas investigações têm como fundamento base a gestão de resíduos eficiente, na busca por reinseri-lo na cadeia produtiva e promover a economia circular, tema amplamente discutido por Weetman, (2019), em seu livro Economia Circular.

Dessa forma, para além de mitigar os impactos ambientais decorrentes do descarte desses materiais pelas carboníferas, pretendeu-se aproveitar seu potencial como recursos alternativos e proporcionar qualidade tecnológica para as peças cerâmicas, assim como garantir a continuidade do setor. A implementação de práticas eficazes pode trazer outras vantagens, como a redução da dependência de matérias-primas virgens, minimização do consumo de energia e de recursos naturais, além de fomentar a competitividade na indústria cerâmica.

Na prática, houve outros aspectos relevantes desta investigação que devem ser apontados. Inicialmente os materiais descartados não necessitaram sofrer quaisquer processos de transformação, sendo utilizados como gerados. Isso poupou a necessidade de processamento adicional, energia e custos associados, o que contribuiu para a viabilidade requerida pelo setor da cerâmica vermelha. Além disso, existe o fator de proximidade entre os setores, o que facilita a logística para o transporte dos materiais, minimizando os custos e permitindo as ações relacionadas a simbiose industrial.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Valorizar a fração residual fina do rejeito de carvão a partir da circularidade mineral como estratégia de desenvolvimento sustentável do Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça/SC (APL CV-MF).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Conhecer as propriedades e características dos materiais que irão compor o estudo, a fim de embasar as investigações, sobretudo pelos seus comportamentos e fenômenos associados;
- b) Formular composições utilizando os materiais sugeridos, por meio de delineamento de misturas, e avaliar o desempenho processual de cada formulação;
- c) Estudar o comportamento das formulações no âmbito tecnológico, ambiental e econômico, com o intuito de valorizar e viabilizar a aplicação industrial da fração residual fina do rejeito de carvão, junto ao setor da cerâmica vermelha;

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até o final da década de 1990, o tema meio ambiente e todas as obrigações intrínsecas aos setores produtivos eram consideradas inoportunas, burocráticas ou ainda, onerosas. Atualmente a adoção de práticas ambientalmente sustentáveis no campo empresarial vêm ganhando notoriedade, muito em virtude das aplicações das leis ambientais, pela importância e atenção midiática, pela consciência coletiva, do fomento às pesquisas científicas promovidas por instituições de ensino ou órgãos governamentais e, sobretudo, pelos retornos financeiros que as boas práticas ambientais podem proporcionar para as empresas ou instituições.

As atividades produtivas desenvolvidas pelos setores primário ou secundário, na sua maioria, geram inúmeros impactos ambientais das mais variadas magnitudes, que podem alterar a qualidade do solo, água, ar, a fauna ou a flora. De modo geral, as principais causas para a degradação ambiental proveniente das atividades extrativas ou de transformação, estão associadas à geração de resíduos e o sucessivo descarte em locais não apropriadas (Assis, 2020).

Tais impactos e reflexos ao meio ambiente podem ser minimizados mediante a disposição dos resíduos em depósitos ou aterros industriais devidamente projetados (Silva, 2007). Embora esta medida seja adequada, há outras formas mais eficientes de gerenciar os resíduos sólidos, pois a simples disposição final em aterros tem se mostrado ser um grande desafio para as empresas, muito em função dos elevados custos financeiros. Além disso, é comum que aterros estejam mal projetados, o que não garante a total contenção dos impactos ambientais (de Melo, 2020).

Em razão da ampla importância global no controle dos impactos ambientais, no desenvolvimento sustentável, assim como a utilização racional dos recursos naturais, torna-se essencial discutir e buscar por novas soluções ao gerenciamento de resíduos sólidos (WWF, 2010).

Nesta circunstância, surgiu o conceito de simbiose industrial, que visa a colaboração entre empresas de segmentos industriais diversos, como alternativa para a reutilização de resíduos sólidos gerados por uma indústria em outras, tornando os resíduos em subprodutos (OECD, 2001). Desta forma, aborda-se temas relacionados ao desenvolvimento sustentável e aos interesses econômicos, meio ambiente e a sociedade.

Diante dos desafios atuais, não basta apenas descartar os resíduos de maneira correta. As pesquisas científicas e os avanços tecnológicos dos meios de produção são essenciais para a busca do reaproveitamento e

valorização destes materiais em diversos setores produtivos. Dessa forma, pode-se reduzir os impactos ambientais nocivos e transformar o que antes era considerado como despesa, em uma fonte de receita para as empresas (Gomes, 2017).

4.1 SETOR CARBONÍFERO

As reservas de carvão no Brasil em grande quantidade, das quais são economicamente exploráveis, concentram-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e uma unidade produtiva no estado do Paraná. Outros estados brasileiros possuem reservas, no entanto, devido à baixa relevância em termos de quantidade e/ou qualidade, tornam-se inviáveis a sua exploração mineral. Apesar de haver o aproveitamento mineral no sul do Brasil, quando comparados aos padrões mundiais, o carvão brasileiro é considerado inferior devido as suas características químicas, com rank médio de classificação de sub-betuminoso a betuminoso (Soares; Santos; Possa, 2008).

A maioria dos bens minerais encontradas na crosta terrestre não possuem teores suficientes que os qualificam para serem aplicadas na indústria na condição bruta, isto é, não é usado tal como é lavrado. Normalmente estão associadas a impurezas, necessitando ser submetida a processos de beneficiamento para remover estes contaminantes e concentrar elementos desejados, melhorando assim as suas propriedades físicas e/ou características químicas (Soares; Santos; Possa, 2008).

Conforme apontado anteriormente, o carvão mineral que ocorre nas jazidas da região sul de Santa Catarina contém elevados índices de cinzas e variações em níveis de enxofre, tornando indispensável, portanto, a etapa de beneficiamento (Fallavena *et al.*, 2013). Este processo é fundamental para atender aos requisitos de qualidade e eficiência de combustão exigido pelo complexo termoelétrica Jorge Lacerda, situado em Capivari de Baixo/SC.

O carvão bruto obtido diretamente da mina, denominado ROM (*run-of-mine*), após submetido ao processo de tratamento mineral apresenta teor médio de 60% de cinzas, distribuído na forma de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxidos cromóforos (Fe_2O_3 e TiO_2), óxidos alcalinos ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), alcalinos terrosos ($\text{CaO}+\text{MgO}$), além de metais pesados e elementos voláteis como carbono, enxofre, água e etc. Dentre todos os elementos químicos presentes na cadeia dos rejeitos, o agrupamento Fe+S é o que requer maior atenção dado que apresentam nódulos de pirita (FeS_2), minerais estes, que têm potencial para causarem severos distúrbios ambientais (Casagrande *et al.*, 2023).

Geralmente, o material orgânico está associado a outros materiais inorgânicos (argilas, pirita e algumas vezes carbonatos). As argilas são responsáveis pela maior parte das cinzas geradas na queima do carvão, já a pirita é a responsável pelo teor de enxofre. Essa fração inorgânica não é de interesse econômico e por isso precisa ser separada por um processo denominado de beneficiamento mineral (Soares; Santos; Possa, 2008).

4.1.1 Beneficiamento mineral e rejeito

O processo de beneficiamento do carvão consiste no conjunto de técnicas e operações complexas, dotados de diversos equipamentos capazes de promover a recuperação do mineral de interesse. Em síntese, visa reduzir a granulometria das partículas através dos processos de cominuição para atingir o grau de liberação adequada, submetendo-as na sequência, a estágios de concentração cujo objetivo final é separar os materiais de interesse e remover os minerais de ganga (rejeito). Comumente o processo de concentração mineral é operado via úmida o que ocasiona ao final do beneficiamento, a necessidade de remover as partículas sólidas do líquido, em ambos os casos, seja para os minerais de interesse, seja para os rejeitos (da Luz; França; Braga, 2018).

No beneficiamento do carvão, basicamente, são gerados dois tipos de rejeitos classificados quanto a sua granulometria e densidade. O primeiro corresponde preferencialmente aos rejeitos com características granulométricas grossas e densidade elevadas, predominando a pirita, além de outros minerais sulfetados e metais pesados. O segundo rejeito contém argilominerais, frações de carvão e outras impurezas de densidades intermediárias, apresentando partículas finas e ultrafinas (Campos *et al.*, 2010; Hummes, 2007).

As partículas grossas e densas, assim que removida do circuito de beneficiamento, têm como destino direto os depósitos de rejeitos. Os rejeitos finos e ultrafinos passam por etapas complementares antes de serem acomodados nos depósitos. Assim, devido a menor granulometria e densidade, aspectos reológicos da polpa, entre outros fatores, ocorre a necessidade de submetê-los a processos gravíticos estáticos, conduzindo a polpa para bacias ou barragens de rejeitos, para proceder o acúmulo dos sedimentos no fundo dos reservatórios. Os sedimentos, por sua vez, são removidos mediante a uso de dragline, carregados em caminhões e enviados ao depósito (Hummes, 2007).

Devido aos problemas relacionados aos rompimento de barragens ocorrido principalmente em Mariana/MG no ano de 2015 e Brumadinho/MG no ano de 2019, o poder legislativo brasileiro aprovou

alteração da Lei 12.334/2010 que estabelece políticas nacionais à segurança de barragens, para a Lei 14.066/2020, tornando-a mais restritiva e punitiva. Com a rigorosidade das legislações e as fiscalizações, o elevado custo para o manejo das bacias, além do inevitável passivo ambiental, algumas empresas carboníferas da região de Criciúma estão abandonando a prática de uso de bacias de rejeitos e optando pela separação de resíduos finos valendo-se do uso de espessadores de fluxo vertical (para remoção do maior volume de água possível) e filtros pressas (para secagem do rejeito) (Smaniotto, 2017).

Muito embora o rejeito fino e ultrafino de carvão possa não apresentar aparente interesse econômico, estudos de caracterização apontam que há certas substâncias contidas que podem ser aproveitados quando submetido a novos processos industriais. Ainda, estes materiais podem ser utilizados diretamente em determinados segmentos, como o cerâmico, por apresentarem características e propriedades físico-mecânicas devido à presença de argilominerais (Casagrande, 2017).

4.1.2 Meio ambiente

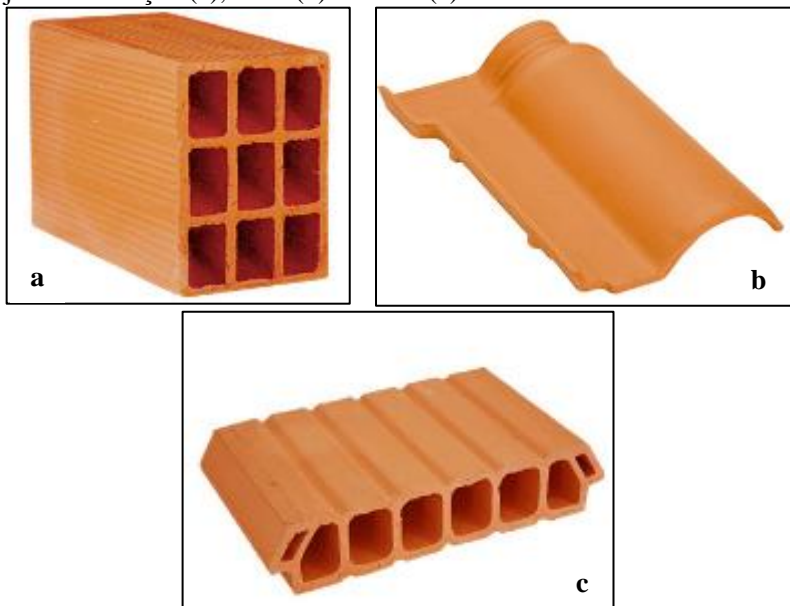
Os impactos ambientais e os devidos cuidados para a sua minimização envolvem todo o ciclo produtivo do carvão, partindo das etapas de planejamento e, principalmente, no cumprimento de medidas ambientais nas fases de instalação, operação e fechamento da mina. Os efeitos negativos principais estão associados aos rejeitos constituídos por minerais de pirita que geram drenagem ácida de mina (DAM) que altera a qualidade da água; tornando-a imprópria ao uso, degrada o solo; tornando-o improdutivo e ainda, prejudica a fauna e a flora (Vigânico, 2009).

A oxidação da pirita pela presença de oxigênio e água, gera efluentes com baixo pH, altas concentrações de ferro (nas formas de Fe^{2+} e Fe^{3+}), sulfatos (SO_4^{2-}) e outros metais pesados presentes na matéria mineral, como alumínio, manganês, zinco, entre outros, todos dissolvidos pela alta acidez deste composto (Vigânico, 2009).

4.2 SETOR DA CERÂMICA VERMELHA

O setor da cerâmica vermelha é o segmento industrial que produz materiais cerâmicos a partir de argilas, que resultam em produtos de coloração avermelhada (Figura 1). Basicamente os produtos são os tijolos do tipo vazado, maciço e aparente, além de telhas, tabelas e pisos rústicos, utilizados na construção civil.

Figura 1 - Amostras representativas dos artefatos da cerâmica vermelha, tijolo de vedação (a), telha (b) e tavela (c).



Fonte: Do autor (2023).

As matérias-primas base para produção destes artefatos cerâmicos possuem composição química constituída por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Podem também ser encontrados óxido de cálcio (CaO), óxido de potássio (K_2O) e óxido de titânio (TiO_2), entre outros elementos (Saviato, 2022).

Por sua vez, os argilosminerais são os principais constituintes das argilas, que são silicatos a base de Al, Fe, Mg, Ca e Na hidratados, com estruturas cristalinas acomodadas em camadas (filossilicatos). A presença de água nos interstícios estruturais destes argilosminerais é a que confere a propriedade de plasticidade, essencial para o modelamento ou conformação das peças cerâmicas (Zaccaron, 2018).

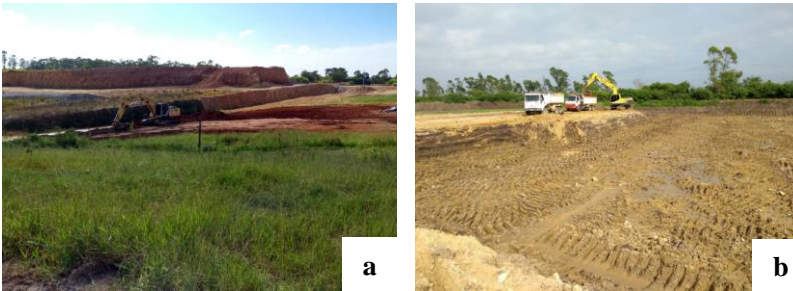
Considerando os quesitos ambientais, o segmento a base de materiais de alvenaria, se comparados com os produtos à base de concreto, causam menores impactos ambientais levando em consideração toda a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), deste a extração da matéria-prima, até o descarte final do produto. O relatório solicitado pela Associação Nacional de Cerâmica Vermelha (ANICER) aponta que os artefatos cerâmicos se destacam por ser considerado como: baixo

impactos nas mudanças climáticas de modo a emitir menor volume de CO_2 .eq., causam menor esgotamento dos recursos não renováveis e consomem menores volumes de água (Maia de Souza *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2015)

4.2.1 Extração mineral sul catarinense

As argilas para a confecção das peças cerâmicas são obtidas de jazidas situadas muito próximas ao núcleo cerâmico de Morro da Fumaça. Basicamente ocorrem em dois ambientes distintos, as denominadas argilas de morro (Figura 2a) e as argilas de várzea, cada qual com suas propriedades (Figura 2b).

Figura 2 - Frente de lavra em ambiente de morro (a), frente de lavra em ambiente de várzea (b), executadas com escavadeiras hidráulicas e caminhões basculantes.



Fonte: Do autor (2023).

O desenvolvimento dos trabalhos de exploração mineral é relativamente simples, se comparado com o carvão mineral, sendo desenvolvido à céu aberto, por bancada, mediante ao uso de equipamentos convencionais. O desmonte e o carregamento são realizados de modo simultâneo, utilizando-se escavadeira hidráulica e, quanto ao transporte para as empresas, são feitos por caminhões basculantes. Ainda, esta operação não exige etapas de beneficiamento e não gera rejeitos, o que torna menos agressiva ao meio ambiente (Rebelo; Zaccaron, 2020).

4.2.2 Etapas produtivas

A operação produtiva do setor cerâmico essencialmente é simples e divide-se em três etapas; a preparação da massa, a conformação e o tratamento térmico. Após a obtenção das argilas, elas são submetidas ao

processo de sazonalidade por período médio de seis meses, para decomposição de eventuais matérias orgânicas e lavagens de sais solúveis. Para que haja melhor empacotamento, ou seja, melhor interação funcional entre elementos estruturais e fundentes que visa qualidade da massa, normalmente é realizado a blendagem de tipos de argilas com características físico-química diversificadas, encaminhando-as, na sequência, para misturadores, homogeneizadores e laminadores. A seguir, a composição argilosa preparada é direcionada ao processo de conformação, objetivando a densificação do produto, normalmente realizada por extrusão, seguida pelo corte entre peças (Figura 3a). Por fim, o tratamento térmico envolve importantes detalhes técnicos e requer grandes cuidados para a obtenção de índices de elevada qualidade produtiva. Nesta etapa, os produtos são enviados para câmaras de secagem e, sucessivamente para a queima (Figura 3b), finalizando o ciclo produção cerâmica (da Silva, 2013; Zaccaron, 2018).

Figura 3 - Representação de uma extrusora e de cortador de peças (a), bem como da boca de entrada de forno contínuo (b) na produção de cerâmica vermelha.



Fonte: Do autor (2017).

4.2.3 Propriedades das argilas

Aspectos importantes para assegurar a qualidade dos produtos cerâmicos são criteriosamente avaliados. Além dos quesitos tecnológicos, ou equipamentos de ponta disponíveis para a produção, o conhecimento das matérias-primas, tal como as propriedades físico-químicas e mecânicas, torna-se fatores fundamentais para o sucesso do processo produtivo.

Segundo Geremias, (2003), os argilominerais da região de Morro da Fumaça são classificados como minerais do grupo da illita ou caulinita. A caulinita é formada por tetraedro de sílicas associados a octaedro de

alumina $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ onde, em alguns casos, sugerem-se evidências de substituição do alumínio por ferro ou titânio. Já a illita é constituída por estrutura cristalina complexa, similar as da mica, apresentando além da sílica e alumínio, elementos como potássio, magnésio, ferro, titânio, entre outros.

A principal característica físico-química da caulinita é possuir elevado ponto de fusão em virtude do grande percentual de Sílica (SiO_2) e Alumina (Al_2O_3), que são elementos com característica refratária. Isso implica na maior absorção de água, devido a maior porosidade dos materiais, além de adquirirem baixa resistência mecânica, em virtude da reduzida sinterização. Já as argilas ílíticas possuem elementos com características fundentes, devido ao baixo ponto de fusão, o que resulta na menor absorção de água e maior resistência mecânica, visto que o corpo cerâmico obtém maior densificação e retração da peça em virtude da elevada sinterização (Geremias, 2003; Zaccaron, 2018).

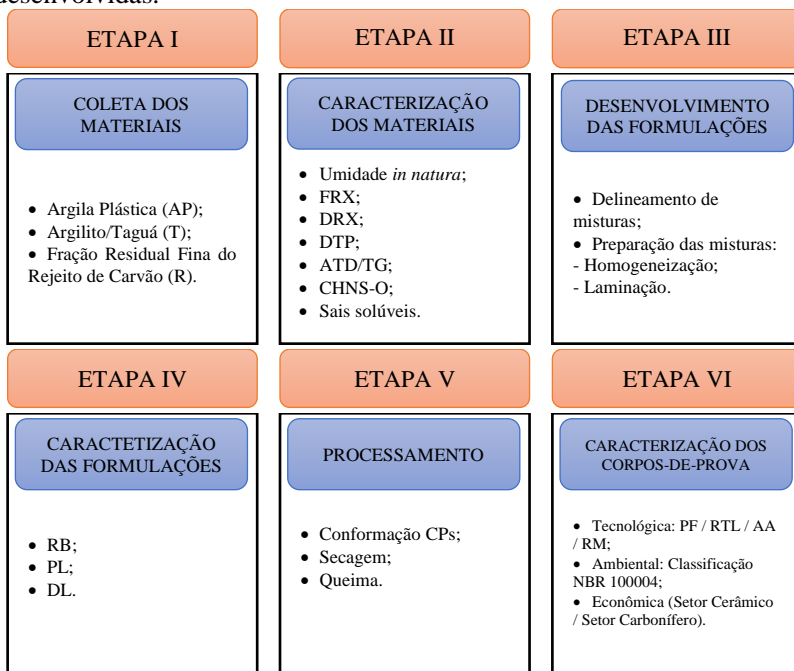
Dentre as mais variadas etapas processuais, é de suma importância estudar a melhor blendagem das matérias-primas, de modo que permita proceder a correta dosagem das argilas com base nas respectivas funções no sistema composicional ou comportamento de cada material. Estas medidas podem garantir a fabricação adequadas de produtos específicos, associadas ao atendimento das normas que validam a qualidade do produto (Geremias, 2003; Zaccaron, 2018).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O enfoque científico-experimental adotado investigou os efeitos, tanto positivos quanto negativos, que a fração residual fina do rejeito de carvão (rejeito fino de carvão) exerce sobre as argilas que são utilizadas na produção de cerâmica vermelha.

Contudo, para alcançar os objetivos estabelecidos, o estudo foi organizado em seis etapas (Quadro 1), iniciando pela escolha e coleta dos materiais. Em seguida, caracterizou-se individualmente cada material coletado, obtendo-se dados analíticos que fundamentaram as fases subsequentes.

Quadro 1 - Fluxograma geral das seis etapas experimentais desenvolvidas.



*FRX: fluorescência de raio-X, DRX; difração de raio-X; DTP: distribuição de tamanho de partícula; ATD: análise térmica diferencial; TG: termogravimétrica; CHNS-O: análise elementar dos gases; RB: resíduo bruto; PL: plasticidade; DL: dilatométrica; CPs: corpos-de-prova; PF: perda ao fogo; RTL: retração linear; AA: absorção de água; RM: resistência mecânica.

Fonte: Do autor (2023).

Nas próximas etapas foram desenvolvidas diversas formulações e, além da caracterização individual das matérias-primas, foram feitos ensaios adicionais para verificar as características destas composições. Por fim, as formulações foram processadas e confeccionados corpos-de-prova (CPs). Ainda, os CPs foram caracterizados através de ensaios para verificar seu desempenho ou a sua qualidade tecnológica.

Das formulações desenvolvidas, foram feitas interpretações estatísticas da qual identificou-se a região ótima de trabalho, baseado em alguns critérios técnicos estabelecidos. Desta forma, foi desenvolvido nova composição para avançar com as pesquisas, principalmente sob os indicadores ambientais e econômicos.

Exclusivos aos ensaios tecnológicos de todas as formulações, incluindo a considerada ideal, seus CPs foram submetidos a três condições térmicas. Este experimento teve como finalidade determinar se o rejeito fino de carvão, rico em carbono, atua como combustível adicional na atmosfera do forno, elevando a temperatura interna ou acelerando o processo de sinterização. Esse efeito pode trazer vantagens econômicas, como a redução nos custos de produção.

5.1 COLETA DOS MATERIAIS (ETAPA I)

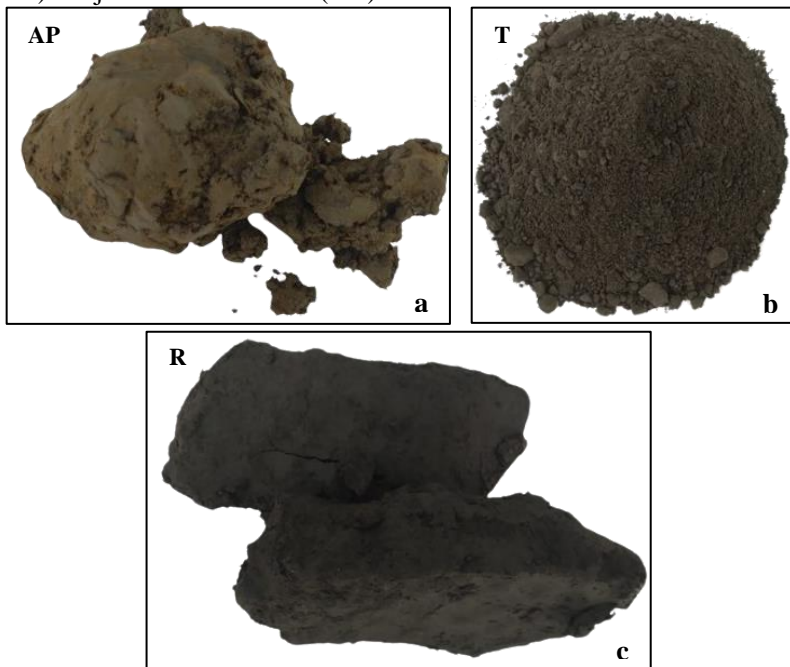
Para assegurar a viabilidade econômica e otimizar o transporte, os materiais escolhidos encontram-se em jazidas a um raio de 10 km. Esta proximidade é vantajosa para o setor, pois simplifica a logística e otimiza os custos com transporte.

As matérias-primas foram estrategicamente selecionadas por serem acessíveis às indústrias cerâmicas, além de sua alta disponibilidade, que garante a longevidade do estudo. Ademais, a parceria com o APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça busca prosperar com o emprego futuro desses materiais.

Foram obtidas, portanto, duas amostras de argilas da Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga - COOPEMI, sendo a denominada argila plástica (AP), (Figura 4a), e o argilito, popularmente conhecido como taguá (T), (Figura 4b).

Quanto a fração residual fina do rejeito de carvão (R), também denominado rejeito fino de carvão (Figura 4c), foi obtida junto a empresa Carbonífera Rio Deserto, que possui unidade de lavra e beneficiamento próximo do centro produtivo da cerâmica vermelha de Morro da Fumaça.

Figura 4 - Materiais utilizados no estudo: argila plástica (AP/a), taguá (T/b) e rejeito fino de carvão (R/c).



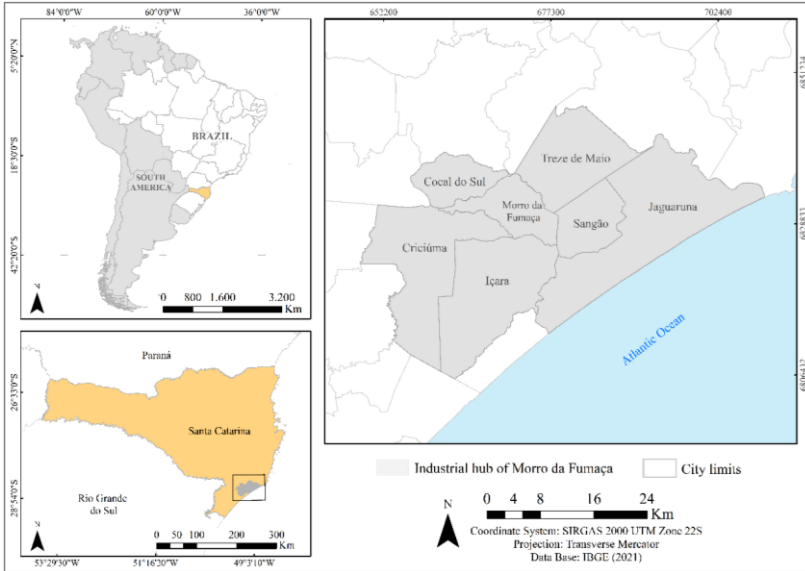
Fonte: Do autor (2024).

Para obter sucesso nos resultados, destaca-se que a argila (AP) foi escolhida por conferir a plasticidade necessária ao processo de misturas. O taguá (T) atua como desplastificante, mas também apresenta ação fundente após a queima, contribuindo assim para melhorar o desempenho do produto. Essas propriedades são determinantes para viabilizar o emprego do material R nas misturas.

Todos os materiais foram coletados no município de Içara/SC, entre as localidades de Rio Acima e Esperança, as margens da rodovia federal BR-101, no sul do estado de Santa Catarina. Na Figura 5 está apresentado mapa de situação do polo produtivo de cerâmica vermelha do APL de Morro da Fumaça/SC.

Embora o centro produtivo de cerâmica vermelha seja reconhecido no município de Morro da Fumaça, devido à sua origem e pela concentração do maior número de empresas, atualmente a principal fonte de abastecimento de argilas vêm de Içara, município vizinho.

Figura 5 - Polo produtivo de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça/SC.



Fonte: Do autor (2024).

5.1.1 Coleta das argilas

A escolha dos tipos de argila foi fundamentada em alguns critérios, sendo a disponibilidade de material existente em cada jazida a predominante, atendendo desta forma, a sistemática CPQvA, anteriormente discutida.

A COOPEMI possui diversas áreas, com argilas apresentando diferentes características. Optou-se pelas quais demonstram reservas mineráveis com maiores volumes disponíveis e que estão devidamente regularizadas, ou seja, autorizadas ao desenvolvimento das atividades de lavra. Isso permitirá assegurar o abastecimento contínuo e a longo prazo, caso as investigações atinjam êxito e haja adesão dos empresários no desenvolvimento e aplicação do projeto.

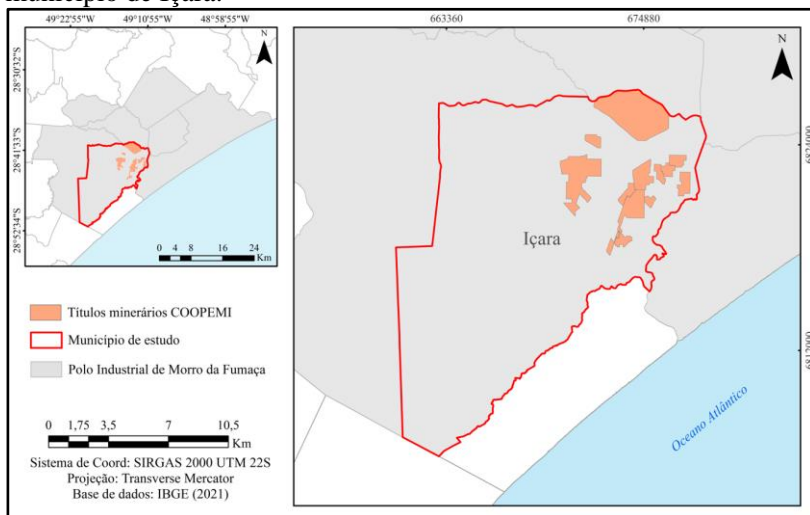
Para a matéria-prima T, além de ter boa disponibilidade e garantir longevidade na produção, é pouco aproveitado pelo setor da cerâmica vermelha. Contudo, a intenção é desenvolver nova formulação com a combinação entre materiais que apresentam características e propriedades adequadas ao setor, em conjunto com este material que é pouco utilizado. A proposta é otimizar a exploração das jazidas, garantindo que a lavra

seja conduzida de maneira racional, evitando ao máximo a lavra predatória.

A matéria-prima AP, como sugere a sua denominação, destaca-se pela boa plasticidade, característica que confere qualidade superior e, portanto, sofre por demasiada demanda. Em contrapartida, o material T possui características que limitam a procura, em função da alta coesão entre as partículas, que o torna compacto e de utilização imediata difícil. Para comercializar o material T, mesmo em razoável volume, a cooperativa precisa britá-lo para reduzir a sua granulometria e torná-lo friável.

A Figura 6 detalha, em laranja, os processos de mineração da COOPEMI inseridos no interior do município de Içara/SC, das quais estão regularizados e que possuem os direitos para explorar as substâncias argilosas. A atividade efetiva de lavra, contudo, depende do licenciamento ambiental de cada propriedade. Desta forma, a cooperativa detém, em números arredondados, 1.950 hectares de direito a exploração mineral, distribuídos em 12 títulos minerários, dos quais, apenas 380 hectares estão atualmente aptos a serem imediatamente minerados.

Figura 6 - Representação dos títulos minerários da COOPEMI dentro do município de Içara.



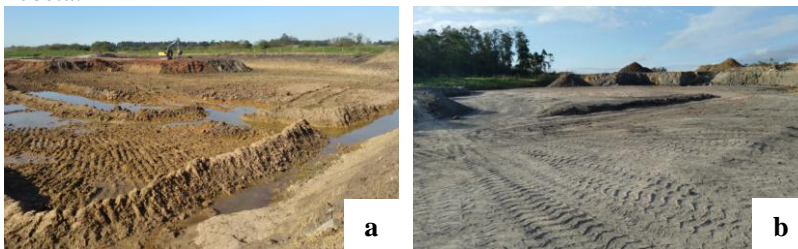
Fonte: Do autor (2024).

Considerando as áreas totalmente regularizadas (380 ha), tanto sob os aspectos mineral quanto ambiental, estas encontram-se em diferentes situações operacionais. Há locais em que houve o esgotamento da jazida e os terrenos já foram recuperados em definitivo, como há pontos onde houve recuperação ambiental provisória, restando volumes de material a serem aproveitados. Ainda há áreas de mineração ativas, mas pouco exploradas, em função das propriedades das argilas ou a dificuldade de acessar certas minas. Por fim, existem os sítios de mineração onde a cooperativa concentra as suas atividades devido a fatores específicos, sendo o principal, a qualidade da argila para uso imediato.

Diante desta realidade, foram selecionados dois tipos de argilas, uma com as propriedades ideais ao desenvolvimento de cerâmica vermelha, e outra com características e aquisições limitadas, mas que pode combinar-se perfeitamente em uma composição.

Neste aspecto, a primeira foi a denominada argila plástica (AP), obtida em ambiente plano-várzea (Figura 7a), da qual possui reserva estimada de 750.000 m³, constituindo um dos pontos onde a cooperativa concentra as suas atividades. O segundo foi o taguá (T), que ocorre em ambiente de encosta (Figura 7b), com reserva estimada de 800.000 m³, representando a jazida com menor demanda.

Figura 7 - Frentes de lavra da COOPEMI destacando os diferentes locais de coleta dos materiais: (a) ambiente de várzea e (b) ambiente de encosta.



Fonte: Do autor (2023).

Da mesma forma, a Figura 8 demonstra o mapa relacionado aos títulos minerários de requerimento da cooperativa, onde houve as coletas das matérias-primas.

Para garantir homogeneidade da amostra, os materiais foram coletados em pontos distintos, com utilização de escavadeira hidráulica. Em seguida, constituiu-se pilha amostral única e, através de ferramentas

manuais, a amostra foi obtida da pilha através da técnica de quarteamento, seguindo a norma técnica NBR 10007 (ABNT, 2004).

Por fim, armazenou-se em sacos plásticos, devidamente etiquetados e selados com abraçadeiras, para assegurar a manutenção das propriedades originais dos materiais.

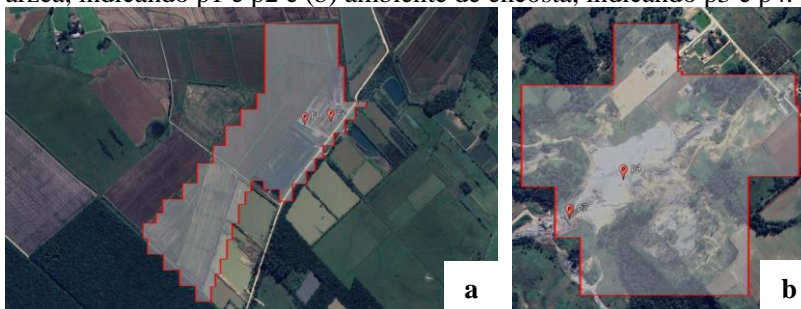
Figura 8 - Representação dos títulos minerários que compõem a coleta da argila em ambiente de várzea (a) e ambiente de encosta (b).



Fonte: Do autor (2024).

A imagem a seguir detalha o mapa de identificação dos pontos de coleta, representando o p1 e p2 em ambiente de várzea (Figura 9a), para a matéria-prima AP e os pontos p3 e p4 em ambiente de encosta (Figura 9b), para a matéria-prima T. A Figura 10a e Figura 10b demonstra o instante da coleta das argilas e a Figura 10c, o armazenamento em sacos plásticos.

Figura 9 - Mapa de representação dos pontos de coleta: (a) ambiente de várzea, indicando p1 e p2 e (b) ambiente de encosta, indicando p3 e p4.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 10 - Momento da coleta dos materiais: (a) em ambiente de várzea para o material AP, (b) em ambiente de encosta para o material T e (c) armazenamento em sacos plásticos.



Fonte: Do autor (2023).

Especialmente para o material T, devido a maior coesão entre as partículas minerais e a necessidade de desagregação dos grãos para os avanços na pesquisa, foi necessário realizar processos adicionais. Além do uso de escavadeira hidráulica para a desmobilização nos dois pontos indicados (p3 e p4) da jazida, realizou-se a cominuição, utilizando britador primário da marca NATREB, instalado na própria mina da COOPEMI. A Figura 11 apresenta a unidade de britagem para cominuir o taguá (T) em conjunto com a pilha objeto da coleta, onde dela, foi obtido a amostra também pela técnica de quarteamento.

Figura 11 - Detalhe da unidade de britagem do material T, mostrando pilha objeto da coleta do material de estudo (lado direito).



Fonte: Do autor (2023).

Quanto ao volume, obteve-se 40 kg de material AP e T, mensurando ser o suficiente para a continuidade e realização das pesquisas científicas.

5.1.2 Coleta do rejeito fino de carvão

Obteve-se também 40 kg do rejeito fino de carvão (R) da empresa carbonífera Rio Deserto, estabelecida em Içara/SC. O material foi coletado após o equipamento denominado filtro prensa (Figura 12a), na pilha de descarte do processo de beneficiamento (Figura 12b). Esta etapa está relacionada ao desaguamento do rejeito, tornando o material mais seco e compacto, permitindo seu carregamento e transporte.

Figura 12 - Filtro prensa relacionado ao processo de beneficiamento do carvão (a) e o instante da coleta do rejeito fino de carvão (b).



Fonte: Do autor (2023).

Apesar de haver processo de separação entre frações grossas e finas durante a etapa de tratamento mineral, seja para o carvão como para o resíduo, ao final dos processos eles são novamente agrupados. Atualmente a empresa está dispondo os resíduos oriundo do processo de beneficiamento em aterros específicos, uma prática que implica em elevados custos operacionais.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (ETAPA II)

Quanto à caracterização dos materiais, foram realizadas as análises das propriedades físicas, químicas, mineralógicas, térmicas e morfológicas. Estima-se que estas análises sejam suficientes para verificar as propriedades e o comportamento de cada material, além de fornecer os dados essenciais para embasar as interpretações dos fenômenos e resultados obtidos durante a pesquisa.

Foram realizadas, portanto, as análises de umidade *in natura*, difratometria de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), distribuição do tamanho de partículas (DTP), análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG), análise elementar (CHNS-O) e sais solúveis. Essas análises abrangeram todas as três amostras, tais como a argila plástica (AP), o taguá (T) e o rejeito fino de carvão (R).

5.2.1 Umidade *in natura*

Foram utilizados 100 g de cada material, pesando-os em balança de precisão (Marte, AC 10K, precisão de 0,1 g). Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa (com resistência elétrica, marca DeLeo n° 2211, tipo 8) a uma temperatura de 100 ± 10 °C, por um período de 24h, de acordo com a NBR 16097 (ABNT, 2012). Após desidratação, foram novamente pesadas e assim calculada a umidade em percentuais, através da relação entre a medida da massa úmida em conjunto com a massa seca. O ensaio foi realizado no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha - LABCER, instalado na empresa NATREB, em Morro da Fumaça/SC.

Estes valores também foram importantes para realizar o desenvolvimento das formulações, proposta na Etapa 3 do item 5.3 “desenvolvimento das formulações”. Como o desenvolvimento do estudo previu a utilização da argila natural, foi necessário conhecer a umidade de trabalho e assim desconsiderar da massa total formulada.

A umidade é a quantidade de água natural ou intersticial presente nas argilas, que têm possibilidade de influenciar diretamente na plasticidade, essencial ao processo de moldagem durante a etapa de extrusão. É fundamental que haja a umidade adequada das matérias-primas, considerando que a falta ou o excesso pode resultar em problemas (Alvarez, 2013). Se houver pouca umidade, não será possível conformá-lo, e se houver umidade acima dos padrões, haverá necessidade de maior energia para remover a água durante o tratamento térmico e, não somente isso, esse excesso pode causar defeitos, tais como: trincas, fissuras e outros danos associados.

5.2.2 Fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX)

Os materiais foram preparados mediante aos seguintes procedimentos: moagem em moinho periquito, maceração em almofariz de porcelana e peneiramento em malha # 200 mesh (74 µm). Após peneiramento, as amostras foram separadas em duas porções.

A primeira foi separada 50 g para a análise de FRX por espectrometria de fluorescência de raio-X (Espectrômetro Epsilon 3^{XLE} Panalytical, com pastilha fundida), realizada no laboratório Safira Soluções Minerais, em Tijucas/SC. A segunda, separou-se 3 g para a análise de DRX por difratômetro Siemens, D-5000, com tubo de cintilação e radiação incidente $\text{CuK}\alpha$ nas condições de 40 kV e 40 mA. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro são de 4 s para $0,02^\circ$ do goniômetro e 4° a 72° 2θ . O experimento foi realizado no laboratório de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, em Porto Alegre/RS.

A análise de DRX é uma técnica que identifica os minerais presentes nas amostras, enquanto a FRX consiste em uma técnica para identificação da composição química e os teores dos elementos (Silva, 2013). É fundamental identificar tanto os elementos químicos quanto os minerais, pois eles determinam como as substâncias reagem aos processos industriais. Com as informações obtidas, é possível interpretar as transformações e os fenômenos, culminando em propriedades específicas.

5.2.3 Distribuição de tamanho de partículas (DTP)

Esse ensaio foi feito 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. Este método foi considerado o mais apropriado devido à estrutura lamelar das argilas.

O ensaio consiste em colocar as amostras em um tubo de ensaio com água e deixadas em reserva. A intensidade de raios-X que atravessa a fenda posicionada na altura do tubo de ensaio é monitorada para determinar a velocidade de sedimentação das partículas (da Luz; França; Braga, 2018).

Tal parâmetro é relevante para a indústria cerâmica, especialmente para garantir boa variação granulométrica, pois afeta o empacotamento dos grãos e a compactação da massa cerâmica. Esse indicador interfere nos processos industriais como a secagem, e nas propriedades das peças cerâmicas, tais como a resistência e absorção (Zaccaron; de Souza Nandi; Bernardin, 2021).

5.2.4 Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG):

Inicialmente as amostras foram preparadas, reduzindo-as a pó, por meio de moagem em moinho periquito. Foi separado alíquotas de 3 g e colocadas em cadinhos de alumina. Na sequência, foi posicionado em um

analisador térmico simultâneo (Netzsch 409 EP), com taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ da temperatura ambiente a $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. O analisador é equipado junto a um sistema de controle operado através de software, que registra as variações de temperatura e de massa ao longo do tempo de ensaio, da qual origam as curvas de ATD e TG.

As análises térmicas permitem verificar as transformações químicas e físicas que possam ocorrer nos materiais, à medida que são submetidos ao aumento da temperatura. A ATD (Análise Térmica Diferencial) é uma técnica de análise térmica usada para estudar a ocorrência de reações em uma determinada amostra, quando esta é aquecida. Na prática, mede a diferença de temperatura entre uma amostra e um material de referência (neste caso alumina pré-calcinada a 1600°C), enquanto ambos são aquecidos ou resfriados, o que permite identificar o tipo de reação, endotérmica ou exotérmica, que ocorre na amostra. O momento em que ocorre e a intensidade da reação são fatores que permitem na caracterização do fenômeno. Tipicamente, reações endotérmicas envolvem a absorção de energia térmica, como eliminação de água e decomposição (carbonatos, hidróxidos, etc.), enquanto reações exotérmicas, como cristalizações, liberam energia térmica.

A TG (Análise Termogravimétrica) mede a variação de massa em função da temperatura de aquecimento ou do tempo, permitindo identificar as reações com alteração de massa da amostra, denominada de: decomposição, desidratação, oxidação, entre outras (Denari; Cavalheiro, 2012).

As transformações térmicas obtidas na sinterização podem afetar a qualidade tecnológica do produto final, pois influenciam propriedades como absorção de água, resistência, retração e estabilidade dos materiais. Além disso, tais ensaios fornecem dados essenciais para atingir um dos objetivos deste estudo, que consiste em avaliar o comportamento térmico, sobretudo do material R, em um forno.

5.2.5 Análise elementar (CHNS-O)

Planejou-se identificar os elementos carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O) quando as amostras são submetidas a combustão (Xavier, 2014). Estes elementos podem formar diferentes compostos gasosos, e esta análise contribui para quantificá-los a partir da sua composição elementar.

O ensaio foi realizado no laboratório LABSATC – Laboratórios SATC, em Criciúma/SC. De modo geral, a análise consiste em secar as amostras em estufa a $110 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, britar, que não é o caso para os

materiais que estão sendo manipulados, e moer em moinho de bola, até atingir a granulometria de 0,6 mm. Após pulverização, é separado e pesado 5 g de cada amostra em balança analítica. Finalizado o preparo das amostras, elas foram levadas ao analisador (CHN628 Series, LECO), para a combustão em alta temperatura, obedecendo a norma ASTM D 5373 (ASTM, 2021). A queima das amostras produz gases que são detectados e medidos por infravermelho. Os valores obtidos serão expressos em porcentagem do peso inicial da amostra, e a combustão converte o carbono em CO₂, hidrogênio em H₂O, nitrogênio em N₂ e o enxofre em SO₂. Os valores de oxigênio são obtidos por balanço de massa.

Os resultados da liberação de gases representam uma importante ferramenta para interpretar potenciais fenômenos ou resultados subsequentes, podendo ter impacto nas características tecnológica das amostras, assim como auxiliar nas interpretações dos resultados ambientais e econômicos. O excesso de voláteis pode induzir a formação de porosidade, impactando propriedades como absorção e resistência mecânica, ou ainda revelar a qualidade ambiental em função da quantidade de gases emitidos.

5.2.6 Sais solúveis (por condutividade elétrica)

Esta análise consiste em extrair os sais solúveis presentes nas amostras, utilizando água destilada, determinando a concentração iônica dos cátions (Na⁺¹, K⁺¹, Mg⁺², Ca⁺²). Desta solução, medem-se os íons dissolvidos, que estão diretamente associados à condutividade elétrica. Esta análise tem como finalidade determinar a concentração e o tipo de sais presentes nas amostras, que podem afetar as propriedades dos materiais.

Os materiais foram preparados envolvendo as seguintes etapas: moagem em moinho periquito; passagem em peneira malha # 200 mesh (74 µm); separação e secagem de 13 g por 12 h em estufa a 110 ± 10 °C; em duplicata, pesar exatamente 5,0000 ± 0,0005 g da amostra diretamente no erlenmeyer; adicionar 100 mL de água deionizada, agitar em agitador magnético durante 6 h e filtrar. O ensaio foi realizado no Instituto de Tecnologia – SENAI, laboratório de cerâmica, em Criciúma/SC.

Segundo Menezes *et al.*, (2006) os sais solúveis dão origem a eflorescência (análise prevista na Etapa VI – Caracterização dos CPs), que são deposições salinas originados na superfície do material, que resultam mais em defeitos de ordem estéticos do que propriamente estrutural.

5.3 DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES (ETAPA III)

O desenvolvimento das formulações baseou-se no método estatístico de delineamento de misturas *simplex centroid*, com uso do software *Statística, versão 10*. Para validar os resultados obtidos, foi empregado tratamento estatístico. Os dados de desempenho dos corpos-de-prova (CPs) foram submetidos à análise de variância (ANOVA), uma técnica que permite avaliar a significância das diferenças observadas.

A confiabilidade é aplicada em 95%. Para a análise foram considerados o maior valor de F, que implica maior significância e o $p < 0,05$ que indica maior confiabilidade; $p = 100 \times (1 - p - \text{valor})$. Os resultados obtidos para a determinação do modelo ou coeficiente de ajuste (R^2) servem como ferramentas na escolha do modelo adotado.

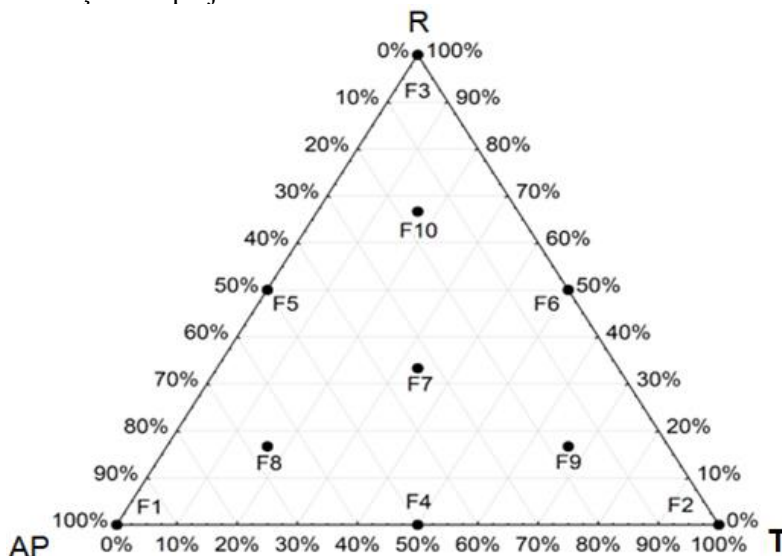
Na etapa do desenvolvimento das formulações, preparou-se três amostras puras, correspondendo a cada tipo de material, com o objetivo de estabelecer padrões de referências. Em seguida, foram elaboradas três composições binárias, relacionando duas substâncias em partes iguais. Além disso, formulou-se mais quatro misturas triangulares, incorporando os três materiais em proporções variadas. Este método resultou em um total de 10 formulações.

A seguir está apresentado o diagrama de mistura *simplex centroid* (Figura 13), indicando cada proporção da mistura, juntamente com os respectivos códigos. Ademais, para facilitar a visualização, a representação destas informações foi listada em planilha (Tabela 1).

É imprescindível destacar, que o processo fabril da região do APL de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, e até mesmo de outras regiões do país, utilizam o método de volume para dosagens de matérias-primas no desenvolvimento de formulações, através das conchas das máquinas carregadeiras. Entretanto, para uma abordagem estatística mais precisa, é adequado adotar a dosagem por peso.

Com isso, optou-se por desenvolver as formulações mantendo a condição natural dos materiais, com o intuito de simular um ambiente industrial. Portanto, para determinar o percentual de cada matéria-prima na mistura, em valores de massa, foi necessário descontar a umidade natural, e assim computá-lo da massa total formulada.

Figura 13 - Representação do diagrama *simplex centroid* revelando as 10 formulações do projeto.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 1 - Percentuais necessários para o desenvolvimento de cada formulações conforme o diagrama de misturas.

Formulações	Materiais (%)		
	Argila Plástica (AP)	Taguá (T)	Rejeito Fino (R)
F.1	100	0	0
F.2	0	100	0
F.3	0	0	100
F.4	50	50	0
F.5	50	0	50
F.6	0	50	50
F.7	33,4	33,3	33,3
F.8	66,6	16,7	16,7
F.9	16,7	66,6	16,7
F.10	16,7	16,7	66,6

Fonte: Do autor (2023).

Após obter o valor de umidade *in natura*, conforme os procedimentos apresentados na ETAPA II, e definir a quantidade

adequada de massa seca, que foi 15kg para cada formulação, cruzou-se essas informações para estabelecer a dosagem correta considerando a massa úmida.

Para a obtenção destes valores, utilizou-se balança de precisão (Marte, AC 10K, precisão de 0,1 g), (Figura 14a). As quantidades em massa úmida manuseadas estão discriminadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade em massa úmida necessária para o desenvolvimento de cada formulação.

Formulações	Materiais (Kg em massa úmida)			Massa úmida total para extrusão (Kg)
	Argila Plástica (AP)	Taguá (T)	Rejeito Fino (R)	
F.1	18,60	0,00	0,00	18,60
F.2	0,00	16,68	0,00	16,68
F.3	0,00	0,00	17,76	17,76
F.4	9,30	8,34	0,00	17,64
F.5	9,30	0,00	8,88	18,18
F.6	0,00	8,34	8,88	17,22
F.7	6,21	5,55	5,91	17,68
F.8	12,39	2,79	2,97	18,14
F.9	3,11	11,11	2,97	17,18
F.10	3,11	2,79	11,83	17,72

Fonte: Do autor (2024).

Estabelecida a massa úmida necessária para cada formulação, deu-se início ao preparo dos materiais, aplicando técnicas de beneficiamento. Nesta fase, utilizou-se as estruturas do Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha - LABCER, instalado na empresa NATREB em Morro da Fumaça/SC.

Em primeiro momento, as formulações passaram por destorroamento manual para a desintegração primária dos grãos, (Figura 1b). Na sequência, e para assegurar a mistura homogênea, as formulações sofreram o processo de laminação, utilizando um laminador de escala laboratorial da Bertan, (Figura 14c). Este procedimento foi repetido em média cinco vezes, até que cada formulação alcançasse a completa homogeneidade, (Figura 14d).

Para garantir a sequência dos trabalhos, que incluem a extrusão e a moldagem dos corpos-de-prova (CPS), respectivo ao processamento, foi essencial hidratar, de maneira intuitiva, as formulações F.2, F.4, F.7 e F.9.

Esta prática visa corrigir o déficit de umidade, para performar a plasticidade e permitir a extrusão.

Figura 14 - Preparo dos materiais, representando a pesagem da formulação (a), o destorroamento manual (b), o equipamento laminador (c), e o preparo finalizado (d).



Fonte: Do autor (2024).

Concluído estes ajustes, as formulações foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetados e vedados com braçadeiras para preservar a umidade. Estes sacos foram mantidos no laboratório LABCER, em ambiente isento da luz, para serem posteriormente utilizados na etapa de processamento (ETAPA V).

5.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES (ETAPA IV)

Foram analisados alguns parâmetros técnicos importantes para compreender a interação das argilas junto com o rejeito fino de carvão. Além disso, foi possível identificar as misturas que possuem potencialidade para uso industrial, assim como aquelas que apresentam limitações técnicas. Foram realizados, portanto, análises de resíduo bruto, plasticidade e a dilatométrica para as dez formulações

5.4.1 Resíduo bruto (RB)

Este ensaio identifica o percentual de material retido na peneira de malha de # 325 *mesh* (44 μm), sem sofrer qualquer tipo de desagregação de grãos por meio de instrumentos de cominuição, como moinhos.

O ensaio foi baseado na literatura (Inocente *et al.*, 2018). Separou-se amostra das formulações, desidratando-as em estufa (DeLeo n° 2211, tipo 8) à 110 ± 10 °C por período de 24 h. Após secagem, pesou-se 100 g em balança de precisão, inserindo-os na sequência, em garrafas PET de 500 mL diluído em água, mantendo-as por período de 24 h (Figura 15). Após agitação manual, a solução aquosa foi vertida em peneira de # 325 *mesh* (44 μm), utilizando água para lavagem, até que todas as partículas menores que esta malha fosse filtrada.

Figura 15 - Preparação de suspensões das amostras para o ensaio de resíduo bruto.



Fonte: Do autor (2024).

Este ensaio é complementar a DTP, porém, exclusivos a identificação das partículas mais grosseiras, e que podem ser importantes a depender do percentual, para a estruturação das peças cerâmicas, ou também contribuir com o processo de secagem (Oliveira, 2011).

5.4.2 Plasticidade (PL)

Indica a maior tendência a moldagem e a região de trabalho, essencial ao processo de conformação das peças cerâmicas.

O ensaio foi realizado no laboratório de cerâmica do SENAI e foi determinada por meio do índice de Atterberg (Atterberg, 1911), da qual relaciona o limite liquidez (LL) conforme NBR 6459 (ABNT, 2016) e o limite de plasticidade (LP) baseado na NBR 7180 (ABNT, 2016) sendo que a diferença entre os valores determina o índice de plasticidade (IP).

Com base no IP, é possível classificar o grau de moldagem das argilas com base no Quadro 2.

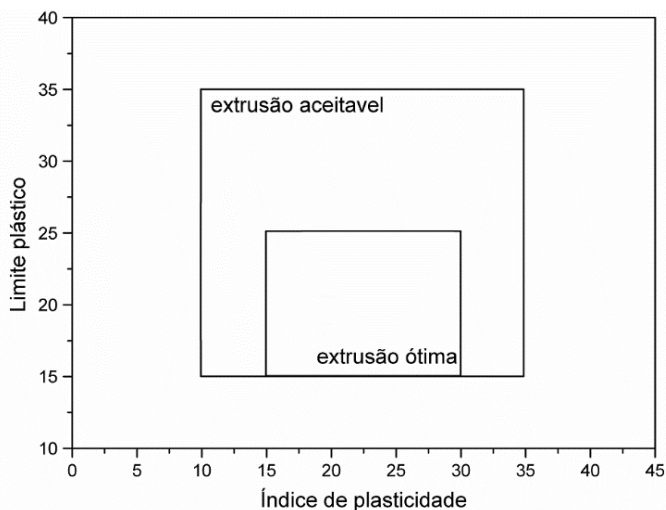
Quadro 2 - Classificação das formulações conforme o Índice de Plasticidade (IP).

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).

Ainda, com os valores de limite plástico e o índice de plasticidade, é possível obter o índice de trabalhabilidade plotadas em gráfico de superfície respostas, da qual indica a região extrusão aceitável ou ótima de extrusão, (Figura 16).

Figura 16 - Gráfico do índice de trabalhabilidade ilustrando as zonas aceitáveis e ótimas de extrusão.



Fonte: Adaptado de Marsigli; Dondi, (1997).

Os valores que indicam a zona aceitável para a extrusão variam para LP, entre 15 até 35 e os de IP, entre 10 até 35. Considerando a zona

ótima de extrusão, variam para LP entre 15 até 25 e para IP, entre 15 até 30 (Marsigli; Dondi, 1997).

5.4.3 Dilatometria (DL)

O ensaio foi realizado em dilatômetro (DIL 402 EP, Netzsch), com taxa de aquecimento 10 °C/min até à temperatura de 950 °C. Forneceu, para cada formulação, a variação dimensional das peças em função de aumento da temperatura, indicando também a temperatura ideal de queima para que ocorra o processo de sinterização.

Por meio da curva dilatométrica, foi possível determinar a curva de queima mais apropriada para cada formulação estudada (Velasco *et al.*, 2015), que auxilia, por sua vez, na definição do ciclo térmico ideal para reprodução nos fornos cerâmicos.

5.5 PROCESSAMENTO (ETAPA V)

Após o preparo das formulações, foi realizado o processamento e a confecção dos CPs. Visando reproduzir o processo produtivo da cerâmica vermelha, foram confeccionados CPs pela técnica de extrusão a vácuo, em equipamento denominado extrusora a vácuo (NATREB modelo NTB 140), com pressão de vácuo 760 mm Hg, velocidade de RPM do caracol de 20 giros/min, (Figura 17).

Figura 17 - Processo de extrusão realizado para a confecção dos corpos-de-prova do estudo.



Fonte: Do autor (2024).

O resultado foi a produção de peças no formato retangular com seis furos, de dimensões aproximadas ($24 \times 37 \times 54 \text{ mm}^3$), conforme apresentado pela Figura 18.

Figura 18 - Amostra dos corpos-de-prova obtidos após secagem para avaliação tecnológica das formulações.



Fonte: Do autor (2024).

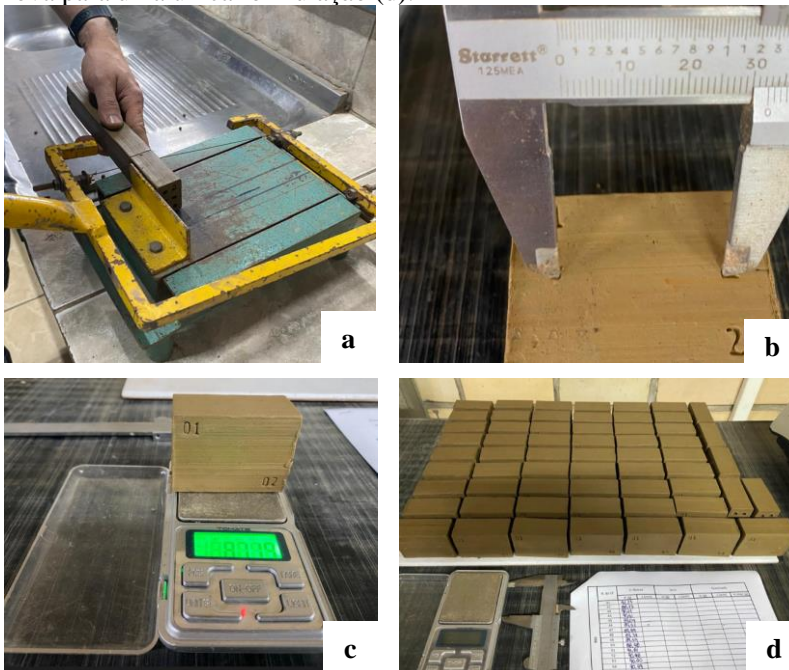
Produziram-se 60 peças por formulação, sendo 20 designadas para queima em cada uma das três faixas de temperatura. Deste conjunto, 13 peças foram reservadas para ensaios destrutivos que avaliam a resistência mecânica. Considerando as 10 formulações, foram confeccionados 600 CPs.

Todos os CPs, após conformação, foram seccionadas utilizando cortador manual (Figura 19a). Cada peça foi medida com o auxílio de um paquímetro manual da marca UNIVERSAL, precisão de 0,02 mm, (Figura 19b) e pesada em mini balança digital precisão (KuPro, 0,1 g), (Figura 19c). Além disso, procedeu-se à identificação de cada peça, marcando-as com o número correspondente à formulação (de 1 a 10) e o número correspondente a cada peça (de 1 a 60), identificando-as em planilhas (Figura 19d).

Em seguida, os CPs foram mantidos por período de 24 horas ao ar livre, com temperatura e umidade natural, para a remoção parcial da umidade. Esta etapa é fundamental para minimizar riscos com trincas durante o subseqüente processo de secagem induzida.

Após a remoção do excesso de umidade, os CPs foram conduzidos aos processos associados ao tratamento térmico. Essa seqüência inicia com a secagem lenta e controlada, seguida pela proposta de queima em 3 faixas térmicas: 750°C, 850°C, 950°C.

Figura 19 - Demonstração das etapas relacionadas ao corte manual (a), a medição (b), a pesagem (c) e a representação de todos os corpos-de-prova para uma única formulação (d).



Fonte: Do autor (2024).

A secagem foi executada no laboratório da NATREB, em estufa com resistência elétrica (marca DeLeo nº 2211, tipo 8), (Figura 20a) por período de 24 h. A queima foi feita no laboratório de Fundação I do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/Iparque), em forno mufla (Quimis, modelo Q318M21), (Figura 20b), com taxa de aquecimento de 2°C/min e o patamar de queima com tempo de 120min.

É importante frisar que o tratamento térmico é a etapa mais crítica do processo cerâmico, e responsáveis pelos maiores custos dentro da indústria de fabricação de telhas e tijolos (Nandi *et al.*, 2015).

Para manter a integridade das amostras, as peças foram secas lentamente, minimizando trincas de secagem. A queima foi realizada individualmente em um forno pequeno, evitando interferências entre as composições, pois cada formulação contém diferentes proporções de material R, cada qual com seu potencial térmico.

Figura 20 - Detalhe da estufa (a) e do forno mufla (b) utilizados no tratamento térmico dos corpos-de-prova.



Fonte: Do autor (2024).

Tradicionalmente, no setor da cerâmica vermelha de Morro da Fumaça, a temperatura média na queima varia entre 850°C até 950°C. No entanto, este estudo propõe uma abordagem inovadora: submeter as formulações a um gradiente térmico inferior ao habitual. O objetivo é investigar o comportamento do carbono presente no material R durante o processo de queima, e se essa condição tem impacto positivo nas características ou propriedades dos CPs.

Este método poderá fornecer perspectivas sobre eficiência energética, qualidade e desempenho dos CPs, além da valorização de resíduos que resulta em redução do impacto ambiental, consolidando práticas que reforçam o compromisso com a sustentabilidade.

Para cada etapa (anterior a secagem, pós secagem e pós queima), os CPs foram medidos e pesados, compilando as informações em planilhas.

5.6 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA (ETAPA VI)

Nesta etapa será discutido os procedimentos adotados para investigar as características tecnológicas, ambientais e econômicas de todas as 10 formulações, e seus respectivos CPs.

5.6.1 Caracterização tecnológica dos CPs

Os ensaios de análise de desempenho consistiram na obtenção da retração linear de secagem e queima, absorção de água e resistência mecânica. O método seguiu a norma técnica 15270 – 2 (ABNT, 2017) e os resultados foram comparados com a 15270 – 1 (ABNT, 2017), que

define as propriedades mínimas para os componentes cerâmicos – blocos e tijolos para alvenaria. Paralelo aos procedimentos para investigar o desempenho, foi possível determinar a perda ao fogo, que é um indicador importante e contribui na interpretação de demais comportamentos e resultados.

5.6.1.1 Perda ao fogo (PF)

A perda ao fogo consiste na liberação de água e gases durante o tratamento térmico, que resulta em redução da massa e das dimensões dos CPs (Zaccaron *et al.*, 2015). Este parâmetro pode ser indicativo de qualidade das peças cerâmicas, uma vez que a excessiva liberação de gases ou água, pode provocar maior porosidade, deformações e tricas, ou ainda, influenciar na resistência mecânica.

Para determinar a perda ao fogo em cerâmica vermelha, o procedimento inicia-se com a pesagem imediatamente após serem moldados. Posteriormente, as amostras são conduzidas ao processo de secagem e queima, permitindo a comparação entre a massa inicial, após a moldagem, e a massa final, após o tratamento térmico. A diferença entre os valores indica a perda de massa, refletindo na eliminação de água e a liberação dos compostos voláteis.

5.6.1.2 Retração linear (RTL)

As informações relacionadas as dimensões, indicam o comportamento de retração, em virtude de fenômenos que ocorrem durante os processos de tratamento térmico, como a perda de água, de voláteis e pela sinterização de determinados minerais. Este parâmetro também está correlacionado com o grau de vitrificação. Baixas retrações de queima geralmente levam a alta porosidade e, portanto, baixa resistência, enquanto alta retração aumenta o risco de deformação (Wang *et al.*, 2023).

Este procedimento consiste em avaliar o comportamento de contração após submeter os CPs ao tratamento térmico. As dimensões de cada CP foi obtida com uso de paquímetro (UNIVERSAL, precisão de 0,02 mm) e as informações foram anotadas em planilha.

5.6.1.3 Absorção de água (AA)

Prosseguindo com as análises para avaliar a qualidade das peças cerâmicas após a queima, foram realizados os testes de absorção de água.

Este método padronizado consiste obter a massa seca dos CPs, submetê-lo em banho de imersão em água a temperatura ambiente, por período de 24 h e, posteriormente, pesar a massa úmida, conforme obtenção do índice de absorção de água baseado na NBR 15270 (ABNT, 2017).

A absorção de água indica a porosidade residual aberta das peças cerâmicas relacionada ao comportamento de sinterização e, dependendo da intensidade, pode afetar as propriedades físicas, como a resistência mecânica e a sua durabilidade (Vieira, 2016).

5.6.1.4 Resistência mecânica (RM)

A resistências mecânica, que é a capacidade de um material suportar cargas, sem que sofra ruptura, deformação ou danos, é o índice de qualidade de engenharia mais importante para materiais de construção, influenciando também em outras propriedades como flexão e resistência á abrasão (Phonphuak; Kanyakam; Chindaprasirt, 2016).

Este ensaio consiste aplicar força compressiva em CPs até que ocorra a sua ruptura, obtendo a tensão máxima suportada pelo material. O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do Iparque, UNESC, mediante uso do equipamento denominado Máquina Universal de Ensaio (EMIC, modelo DL-10000), com taxa de aplicação de força de 100 N/s, (Figura 21). Os resultados são computados pelo software (TESC) conectado ao equipamento, com os valores expressos em MPa e são aferidos conforme a NBR 15270 (ABNT, 2017).

Figura 21 - Máquina universal de ensaios mecânicos utilizado para a realização de ensaios de resistência mecânica.



Fonte: Do autor (2024).

5.6.2 Caracterização ambiental dos CPs

Planejou-se ensaios para determinar a qualidade ambiental das peças cerâmica produzidas a partir do incremento do material R. Para isso, foram realizados ensaios que verificam a estabilidade dos elementos ou minerais presentes nos CPs e a sua interação com os meios externos, medindo a transferência de elementos em contato com água.

Mesmo que a maioria dos produtos relacionados a cerâmica vermelha são de vedação, como os tijolos e telhas, exceto as telhas, mas que recebe camada de esmalte, entendeu-se como válido realizar as análises ambientais. Isso porque não é garantida a proteção total e permanente, podendo haver fissuras, trincas, desgastes nas vedações que podem expor os tijolos às condições externas, ou ainda, em caso de possíveis contaminantes em excesso, migrar gradativamente para o exterior da argamassa. Os produtos cerâmicos também passam por períodos de armazenamento em ambientes externos, sem cobertura ou proteção, podendo solubilizar ou lixiviar poluentes, caso as substâncias não estejam neutralizadas após o processo de ceramização.

Diante da contextualização, foi desenvolvida formulação ideal, a denominada F.11, baseada em critérios técnicos e pela região ótima de trabalho obtida nos resultados estatísticos. Além disso, foi escolhido a formulação F.4, que representa a composição padrão utilizada na indústria da cerâmica vermelha, como parâmetro de referência e para a comparação com a nova formulação.

Quanto as disposições legais, verifica-se que não há norma específica para avaliar a qualidade ambiental dos produtos cerâmicos. Dada a utilização de rejeito fino de carvão, considera-se adequado adotar como modelo a norma técnicas brasileiras NBR 10004 (ABNT, 2004), que classifica resíduos sólidos de acordo com seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública.

Portanto, foi mensurada a periculosidade dos CPs, que é a capacidade em transferir possíveis poluentes, do interior das peças ao extrato exterior, por meio de dissolução. Para classificar os CPs, foram realizados ensaios de corrosividade, reatividade, toxicidade, lixiviação e solubilização, em com NBR 10004 (ABNT, 2004). Os procedimentos para a obtenção dos extratos lixiviados seguiram a NBR 10005 (ABNT, 2004), e a norma NBR 10006 (ABNT, 2004), para o extrato solubilizado.

Os CPs são considerados como Classe I - perigoso, quando apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade ou ainda, concentração lixiviada superior ao limite máximo estabelecido pelo anexo F, caracterizando-o como tóxico. Serão

considerados Classe II A - não perigosos e não inertes, se liberarem substâncias solubilizadas acima dos limites máximos estabelecido pelo anexo G. Caso não apresentem nenhuma das características anteriores, os CPs serão considerados Classe II B – não perigosos e inertes.

Embora essa normativa se aplique a resíduos, é considerado válido utilizá-la para verificar se as composições escolhidas, após o processo de queima, apresentem alguma periculosidade ou toxicidade que possa causar impacto ambiental.

5.6.3 Caracterização econômica

Além das análises tecnológicas e ambientais dos novos produtos desenvolvidos, foram realizadas investigações econômicas / financeira, tanto para o setor da cerâmica vermelha, quando ao setor carbonífero.

Setor cerâmico: Foram avaliadas as possíveis economias na obtenção dos materiais, sobretudo pelo transporte e aquisição de materiais, além de cálculos para determinar a viabilidade do processo produtivo de cerâmica vermelha, baseado em Benedet *et al.*, (2023).

Para avançar com as investigações econômicas, foi desenvolvida a nova formulação (F.11) contendo incremento de rejeito fino de carvão, comparando-a com a formulação padrão do setor (F.4). Ambas as formulações foram submetidas a três condições térmicas diferentes. O intuito foi verificar se a formulação F.11 pode alcançar resultados tecnológicos, como resistência mecânica, semelhantes aos da F.4, quando submetida a uma temperatura de queima inferior. Na indústria da cerâmica vermelha de Morro da Fumaça, tradicionalmente as empresas submetem as peças a queima a 850 °C e, neste estudo, avaliou a possibilidade em reduzir a temperatura de queima para 750 °C.

Contudo, foi verificado a influência do carbono presente no material R e se teve impacto na sinterização. A hipótese é que o carbono atue como um agente potencializador no forno, favorecendo o tratamento térmico. A presença de carbono pode reduzir o consumo de insumo energético e, conseqüentemente, resultar em benefícios econômicos.

Foram realizados também os cálculos relacionados aos custos com o transporte de argila plástica (AP) e taguá (T), comparando-os aos custos de transporte do material R. Considerando que as empresas estão localizadas em pontos distintos na região, sugeriu-se definir um ponto central como referência para o transporte, como o centro de Morro da Fumaça. A partir desse ponto, foi aplicada a tabela de frete fornecida pelo SINDICER, que indica valores estipulados, baseado nas distâncias percorridas em km até as jazidas de argila ou a unidade da Rio Deserto.

Embora possa haver acréscimo no transporte, devido a maior distância entre o centro produtivo e a Rio Deserto, em comparação com as minas de argila, o custo global com a aquisição dos materiais poderá ser inferior ao habitual. Isso ocorre porque a carbonífera fornecerá gratuitamente o material R, compensando o possível aumento com o transporte. Assim, pretende demonstrar os valores que podem ser poupados com a compra dos materiais, de acordo com o percentual de material R a ser adicionada a nova formulação.

Setor carbonífero: A valorização do material R, como subproduto ao setor cerâmico, pode trazer benefícios econômicos também ao setor carbonífero, especialmente pela redução nos custos associados ao seu manejo. Atualmente a Carbonífera Rio Deserto arca com despesas após o processo de tratamento de rejeitos, que incluem o carregamento, transporte, disposição no depósito de rejeito e todas as suas operações complementares, como os controles operacionais e ambientais.

A carbonífera disponibilizou todas as informações pertinentes aos custos que envolvem o manejo deste material, como a quantidade de material R gerado e o custo por toneladas. Os cálculos relacionados a economia foi em função do envio global do rejeito fino ao setor da cerâmica vermelha.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, estão apresentados os resultados de caracterização dos três materiais, das dez formulações desenvolvidas, e o desempenho tecnológico dos corpos-de-prova (CPs) destas composições. Com base em interpretações técnicas, optou-se por desenvolver uma formulação adicional para examinar os aspectos ambientais e realizar análises econômicas preliminares.

Para interpretação dos resultados, foi estabelecida uma formulação como referência, que serviu de base comparativa junto com as demais. A composição padrão escolhida foi a formulação F.4, que combina 50% de argila plástica (AP), que ocorre em ambiente de várzea e 50% de taguá (T), oriundo de ambiente de encosta.

A escolha desta formulação foi orientada pela sua relevância prática na indústria, onde essa proporção se alinha com as condições industriais reais, embora o material T esteja sendo utilizado de forma moderada. Por refletir, de maneira representativa, as condições usuais do setor, ela se tornou a referência ideal para embasar as análises comparativas com as demais formulações desenvolvidas.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais selecionados foram individualmente caracterizados, com intuito de compreender suas propriedades e o modo como podem interagir e influenciar no desempenho das formulações e seus corpos-de-prova. Portanto, é essencial conhecer primeiro os materiais para prever as reações que podem ocorrer, assim como para orientar as interpretações dos resultados.

6.1.1 Umidade *in natura*

A umidade *in natura* dos materiais foi determinada para estabelecer a quantidade de massa úmida necessária ao desenvolvimento das formulações, na etapa de processamento. Este indicador, apesar de ser de simples obtenção, é muito importante, pois pode afetar diretamente as propriedades físicas dos materiais e o comportamento das misturas.

Desta forma, na Tabela 3, observa-se que a argila plástica (AP), extraída em cava alagada, possui o maior teor de umidade, cerca de 24%, sugerindo elevada plasticidade. Tal característica implica em proporcionar maior trabalhabilidade ao material, entretanto, apresenta

tendência a perder maior quantidade de massa durante a secagem, resultando em maior retração linear.

Tabela 3 - Teor de umidade *in natura* dos materiais estudados.

Materiais	Umidade <i>in natura</i> (%)
Argila Plástica (AP)	24,0
Taguá (T)	11,2
Rejeito Fino do Carvão (R)	18,4

Fonte: Do autor (2024).

Torna-se essencial monitorar o processo de secagem da AP, ou de formulações com predomínio deste material, para evitar a formação de poros, fissuras ou trincas, fenômenos comuns quando há brusca eliminação de água.

Em contraste com a AP, o taguá (T), extraído em áreas de mineração de encosta, apresenta teor de umidade inferior, com 11,2%. Esta característica foi destacada pela necessidade de hidratação na etapa de processamento para a formulação F.2, que é composta exclusivamente por este material. As formulações F.4, F.7 e F.9, que contêm maior proporção de T em relação aos outros materiais, também requereram adição de água. A hidratação foi fundamental para trabalhabilidade, pois a umidade natural de T resulta em baixa plasticidade, o que dificultaria a moldabilidade durante o processo de extrusão.

O rejeito fino de carvão (R), resultante do processo de tratamento mineral de carvão, da qual envolve água para o beneficiamento, possui relativa umidade, apresentando valor intermediário de 18,4%.

Em resumo, tanto o material T quanto o R em condições naturais, tenderiam a exibir retração linear de secagem inferior quando comparados ao material AP, atribuída pela sua composição com menor presença de água.

6.1.2 Caracterização química e mineralógica (FRX/DRX)

Uma das principais técnicas utilizadas para caracterização química dos materiais, é a espectrometria de fluorescência de raios X – FRX. Conhecer os elementos químicos presentes nas argilas contribui para interpretar os resultados ou presumir os fenômenos que podem ocorrer. Além disso, com estas informações é possível corrigir as misturas para melhorar o desempenho ou as propriedades dos produtos acabados. A

Tabela 4 demonstra os resultados da caracterização química dos materiais AP, T e R.

Tabela 4 - Composição química dos materiais obtido por espectrometria de fluorescência de raios X.

Elementos (Óxidos %)	Materiais		
	Argila Plástica (AP)	Taguá (T)	Rejeito Fino (R)
SiO ₂	68,23	61,28	52,67
Al ₂ O ₃	16,11	16,73	20,48
K ₂ O	0,75	3,20	2,55
Na ₂ O	0,05	0,82	0,13
Fe ₂ O ₃	5,07	6,21	3,68
TiO ₂	1,62	0,81	1,02
CaO	0,19	0,13	2,38
MgO	0,35	1,25	0,61
Mn ₂ O ₃	0,01	0,01	0,03
P ₂ O ₅	0,09	0,08	0,04
SO ₃	<0,05	0,08	0,59
PF	7,50	9,39	15,82

PF: perda ao fogo.

Fonte: Do autor (2024).

As análises dos teores de óxidos revelaram algumas semelhanças entre as composições químicas. Nota-se que a presença de sílica (SiO₂) é predominante, seguida pela alumina (Al₂O₃). Juntas, elas formam os aluminosilicatos, que constituem a base estrutural dos argilominerais (Moreno-Maroto; Alonso-Azcárate, 2018).

O material R possui menor quantidade de SiO₂ em comparação com os demais, apresentando 52,67%, contra 68,23% e 61,28% para os materiais AP e T, respectivamente. Em compensação, para o Al₂O₃, o material R apresenta o maior percentual, com 20,48%, enquanto o AP apresenta 16,11% e o T, 16,73%.

Confrontando os valores de SiO₂ em conjunto com Al₂O₃, eles estão enquadrados no intervalo ideal para a fabricação de cerâmica vermelha. Outros estudos correlacionados, que envolveram materiais argilosos que ocorrem na região e que obtiveram resultados satisfatórios para cerâmica vermelha, indicam que o intervalo adequado para sílica e alumina pode variar entre 70 e 85% (Benedet *et al.*, 2024; Zaccaron *et al.*,

2020, 2024; Zaccaron; de Souza Nandi; Bernardin, 2021). Portanto, a soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ neste estudo é de 84,34% para AP, 78,01% para T e 73,15% para R.

A presença de elementos fundentes na composição, como os óxidos alcalinos e alcalino-terrosos (K_2O , Na_2O , CaO e MgO), auxiliam na redução da temperatura de fusão da mistura cerâmica. Isso promove a formação de fase líquida em temperaturas mais baixas, o que favorece o processo de sinterização (Silva *et al.*, 2022).

Os materiais T e R possuem teores mais elevados de óxidos fundentes em comparação com AP. T apresenta 3,20% de K_2O e 0,82% de Na_2O , enquanto R contém 2,55% de K_2O e 0,13% de Na_2O . Além disso, R possui 2,38% de CaO , significativamente maior que AP (0,19%) e T (0,13%). O MgO também está presente em quantidades relevantes para T, apresentando 1,25%, sendo R 0,61% e AP 0,35%.

Relacionando todos os fundentes, o material R é o que possui maior percentual, apresentando um total de 5,67%, seguido por T com 5,4% e AP com 1,34%. Mesmo que o material R advém de descarte de processo produtivo, possui potencial para uso na cerâmica vermelha, quando é analisado os elementos fundentes e os aluminossilicatos.

Verificou-se também a presença óxidos cromóforos (Fe_2O_3 e TiO_2), que possuem influência na coloração das peças cerâmicas. Embora estas substâncias, sobretudo o ferro, provoquem coloração avermelhada (Tiffo *et al.*, 2015), não é considerando um problema, são atributos tradicionais da cerâmica vermelha. Este critério contrasta com os revestimentos cerâmicos, das quais a coloração é vista como um problema estético, desvalorizando os produtos no mercado.

A presença de Fe_2O_3 está variando entre 6,21% para T até 3,68% para R, com valor intermediário de 5,07% para AP. Com relação ao percentual de TiO_2 para o material AP, este apresenta valor de 1,62%, para R 1,02% e menor concentração para T, com 0,81%. Comparando todos os cromóforos nos três materiais, deduz-se que o material R tende a ter menor interferência na coloração, resultando em peças com tonalidades mais claras. Em contraste, o taguá (T) com o maior percentual de cromóforos, tende a apresentar características mais avermelhadas.

Embora o material R possua características tradicionais para a produção de cerâmica vermelha, é importante considerar alguns aspectos ambientais devido à presença de 0,59% de SO_3 . Durante a queima, poderá haver a decomposição de SO_3 e a liberação de óxidos de enxofre (SO_x) que são prejudiciais a qualidade do ar e a saúde humana. Além disso, a presença desta substância pode contribuir para a formação de eflorescência, problema este que afeta a aparência dos tijolos.

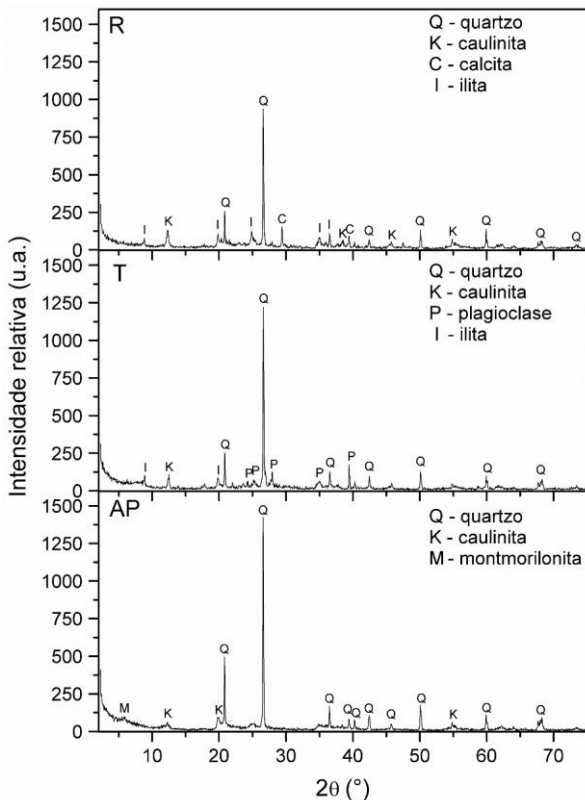
Quanto aos elementos voláteis, o material R também têm destaque e merece atenção especial, apresentando valor de 15,82%, quase o dobro dos demais materiais. Isso sugere, além dos problemas ambientais quanto a emissão, a possibilidade de haver liberação excessiva de elementos voláteis e conseqüente formação de porosidade, fissuras ou trincas, podendo afetar parâmetros tecnológicos como absorção, além de interferir na resistência mecânica e retração.

Em resumo, o material que deseja ser valorizado e reinserido em um novo processo produtivo, ao analisar sua composição química, mostra-se como um bom subproduto devido ao percentual de aluminossilicatos e pela concentração de fundentes. Entretanto, se o objetivo é utilizá-lo como constituinte de cerâmica vermelha, torna-se necessário considerar aspectos que podem prejudicar sua qualidade, como a elevada taxa PF e a presença de SO_3 . Assim, deve-se incorporar o percentual adequado de R para que haja a quantidade ideal fundentes, ao mesmo tempo, equilibrar a liberação de gases, garantindo que a fase líquida dos fundentes preencha adequadamente os poros formados pela liberação destes voláteis.

Os óxidos dos elementos químicos, apontados na análise de FRX, em sua forma mais estável, estão presentes nas fases cristalinas, e podem ser visualizados na Figura 22. O material AP, apresenta quartzo (SiO_2 – cartão ICDD 01-079-1906), e os argilominerais caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – cartão ICDD 00-001-057) e montmorilonita $((\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$. Esses minerais são comumente encontrados nas matérias primas cerâmicas da região de estudo (Saviatto *et al.*, 2023; Zaccaron *et al.*, 2020). O material T, por sua vez, apresentou além do quartzo (SiO_2 – cartão ICDD 01-079-1906), os argilominerais caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – cartão ICDD 00-001-057) e ilita $((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})])$ – cartão ICDD 00-007-0025) além do feldspato plagioclásio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Por fim, material R, apresentou quartzo (SiO_2 – cartão ICDD 01-079-1906), os argilominerais caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – cartão ICDD 00-001-057) e ilita $((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})])$ – cartão ICDD 00-007-0025) e também calcita (CaCO_3 – cartão ICDD 01-072-1937), que é um mineral de carbonato e o polimorfo mais estável do carbonato de cálcio.

O quartzo (em forma de sílica livre) está associado a presença de areia, que tem uma função importante na massa cerâmica quando dosado em teores controlados, atuando como elemento redutor da plasticidade no processo de extrusão, auxiliando no controle dimensional da peça e garantindo a formação de capilares no corpo cerâmico moldado, facilitando assim a secagem (Nandi *et al.*, 2023).

Figura 22 - Composição qualitativa mineralógica dos materiais obtido por difração de raios X.



Fonte: Do autor (2024).

Os argilominerais estão majoritariamente encontrados nos materiais argilosos usados para fabricação de cerâmica vermelha. Estes minerais aferem a plasticidade necessária para moldagem das peças cerâmicas (Singh, 2022).

Os feldspatos desempenham a função multifacetado na fabricação de cerâmica vermelha, atuando como agentes fundentes que melhoram as propriedades físicas, facilitam a vitrificação e contribuem para a eficiência energética (Fuentes *et al.*, 2022).

Por fim, a calcita que está presente no material R, pode ter várias respostas na massa cerâmica, agindo como agente fundente, influenciando a plasticidade, aprimorando propriedades mecânicas e potencialmente causando defeitos de “furo de agulha” na superfície da

peça cerâmicas se usada excessivamente (Sokolář *et al.*, 2012; Traoré *et al.*, 2007).

6.1.3 Distribuição de tamanho de partícula (DTP)

Assim como os demais parâmetros analisados, a obtenção de dados relacionados à distribuição de tamanho de partículas (DTP) é fundamental para definir as características e prever o comportamento de cada material.

Os resultados que apresentam majoritariamente partículas de tamanho próximo a 2 μm ou inferior a este diâmetro, da qual é o padrão dominante das argilas (Hubert *et al.*, 2012), têm a tendência de haja maior empacotamento do composto cerâmico. Isso resulta em características que podem ser positivas ou negativas, a depender do processo em que está sendo avaliado.

Sob o aspecto positivo, a presença do maior percentual de grãos finos favorece a coesão entre partículas e aumenta a área superficial da massa, podendo interferir na sua reatividade (Capes, 1980). Dependendo da composição química, pode contribuir para acelerar a formação de fase líquida dos elementos fundentes e favorecer o processo de sinterização, agindo positivamente na resistência mecânica (Bordia; Kang; Olevsky, 2017).

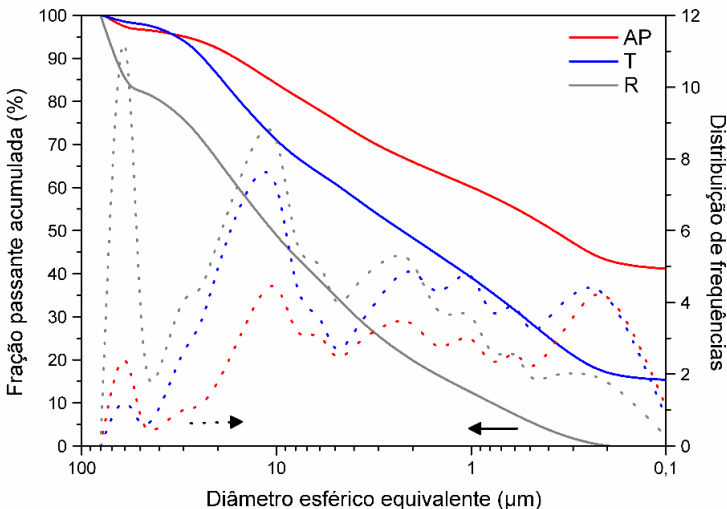
Por outro lado, a compactação excessiva dos grãos afeta de forma negativa no processo de secagem (Crozzetta *et al.*, 2016). Conforme já abordado, grãos finos tendem por adensar a massa, resultando na redução da porosidade ou da sua zona capilar. Esta característica dificulta o escoamento das águas do interior para o exterior das peças, podendo prejudicar o desempenho do produto cerâmico, como a formação de trincas ou fissuras. Pode ainda, sob o aspecto de produtividade, interferir no tempo de secagem, demandando por secagem mais lenta e controlada.

A Figura 23 apresenta o gráfico de distribuição do tamanho de partículas, onde as linhas sólidas representam a distribuição cumulativa e as linhas pontilhadas mostram a segmentação em cada diâmetro específico. De modo complementar, a Tabela 5 fornece os resultados numéricos das frações de 10%, 20%, 50% e 90%.

O material R destaca-se pela distribuição de partículas mais grosseira, com D_{90} em 66,75 μm e D_{50} em 10,57 μm . Essa característica pode aumentar a porosidade dos tijolos e comprometer a coesão da massa cerâmica, prejudicando a resistência mecânica, mas pode contribuir para o processo de secagem. O material AP possui destaque por sua distribuição de partículas mais finas, com apenas 16,16 μm em D_{90} e 0,37% em D_{50} μm . Esta condição pode contribuir para o adensamento da

massa e resultar em melhores propriedades mecânicas, mas por outro lado, prejudicar a secagem dos materiais.

Figura 23 - Distribuição do tamanho de partículas das dos materiais estudados.



Fonte: Do autor (2024).

Tabela 5 - Frações cumulativas (10, 20, 50 e 90%) da distribuição do tamanho de partículas dos materiais estudados.

Diâmetro (%)	Materiais		
	Argila Plástica (AP)	Taguá (T)	Rejeito Fino (R)
D ₉₀ (μm)	16,16	23,81	66,75
D ₅₀ (μm)	0,37	2,26	10,57
D ₂₀ (μm)	0,18	0,27	2,03
D ₁₀ (μm)	0,18	0,18	0,78

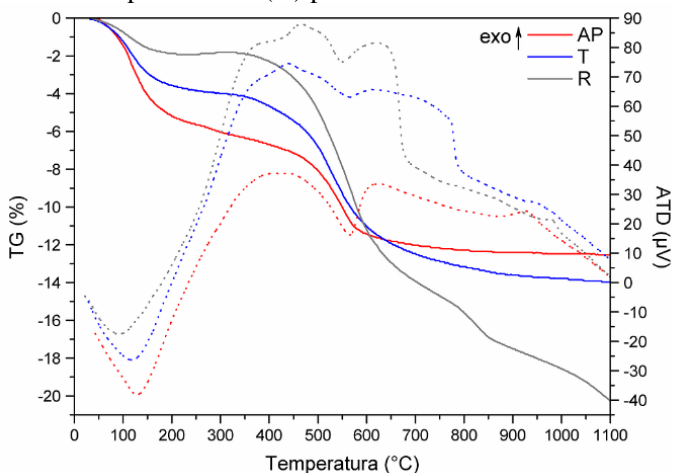
Fonte: Do autor (2024).

A avaliação da granulometria pode ser uma ferramenta importante para o desenvolvimento de formulações, promovendo o controle de grãos ideais a aplicação do processo cerâmico (Händle, 2019).

6.1.4 Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG)

O gráfico da análise térmica diferencial e termogravimétrica (Figura 24) ilustra a variação de temperatura associado às transições de fase à medida que há decomposição térmica. Para tal, é possível observar até ~200 °C uma perda de massa nos materiais, com um evento endotérmico, podendo estar associado a perda de água ou a desidratação de argilas. Posteriormente, e a partir aproximadamente de 400 até cerca dos 800 °C, algumas reações exotérmicas são observadas, que também está acompanhada por uma pequena diminuição na massa e podem estar relacionadas com a decomposição da matéria orgânica na amostra (Cobo-Ceacero *et al.*, 2019).

Figura 24 - ATD/TG das amostras estudadas, com linhas sólidas (—) para TG e linhas pontilhadas (...) para ATD.



Fonte: Do autor (2025).

A desidroxilação dos argilominerais ocorre na sequência, observado por uma perda de massa mais acentuada em todas as amostras, bem como pela reação endotérmica na curva de ATD, que corresponde a 540°C e 560°C podendo estar atribuída à decomposição da ilita e caulinita, respectivamente (Castellano *et al.*, 2024).

A partir dos ~700 °C ocorre uma estabilização mássica para a argila AP, o que é comumente observado em argilas para cerâmica vermelha na região de estudo (Zaccaron *et al.*, 2020). Entretanto, nota-se

que para as amostras T e R, a perda de massa é constante, sem estabilização.

No caso do material T, existe ligeira perda de massa mesmo depois dos 700 °C (até cerca dos 800 °C), que pode estar relacionada com a queima de alguma matéria orgânica ainda existente na amostra (Elias *et al.*, 2024).

Em R, a constante perda de massa após 700 °C até ao fim do ensaio, é atribuída à elevada presença de matéria orgânica, principalmente carbono residual, que gradualmente foi volatilizado durante o processo de aquecimento (Rebello *et al.*, 2024), corroborando na hipótese de que a existência de material carbonoso, pode fornecer energia ao processo de queima. Ainda em relação à amostra R, entorno de 800 e 850 °C verificou-se uma perda de massa mais acentuada, observada unicamente nesta amostra, que pode estar ligada a descarbonatização da calcita (Soares *et al.*, 2014), cuja presença está confirmada no resíduo estudado.

Finalmente, um pico exotérmico sem perda de massa relacionado à reorganização estrutural de uma fase espinélio (cristalização da mulita tipo I), é observado em torno de 970 °C (Comin *et al.*, 2024).

6.1.5 Análise elementar (CHON-S)

A identificação dos elementos combustíveis são indicadores importante para avaliar neste estudo, tanto a capacidade energética de cada material, quanto os impactos ambientais durante a etapa de queima. A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio dos elementos combustíveis para os três materiais.

Observa-se a maior presença de carbono no material R, com 15,44%, enquanto no material T, 1,35%. No material AP, o teor de carbono não foi detectado. O percentual de carbono encontrado no material R indica que poderá haver maior liberação de calor durante a etapa de queima, o que pode facilitar a produção de cerâmica vermelha em temperaturas mais baixas.

Em contrapartida, o mesmo material R apresentou teor de enxofre relativamente alto, com 1,37%. Essa concentração pode resultar na emissão de gases poluentes, como o dióxido de enxofre (SO₂), o que representaria riscos ambientais. O material T apresentou razoável concentração de enxofre, com 0,68% e o AP, a menor concentração, com 0,06%.

Tabela 6 - Ensaio dos elementos combustíveis no rejeito fino (R).

Elementos (Combustíveis %)	Materiais		
	Argila Plástica (AP)	Taguá (T)	Rejeito Fino (R)
Enxofre Total	0,06	0,68	1,37
Teor de Carbono	ND	1,35	15,44
Teor de Cinzas	95,01	91,51	76,78
Teor de Hidrogênio	1,17	1,07	1,78
Teor de Nitrogênio	0,15	0,23	0,44
Teor de Oxigênio	4,89	5,16	4,19
Umidade Higroscópica	3,09	1,40	1,47

ND: Não detectado.

Fonte: Do autor (2024).

Quanto ao resultado de cinzas, ou materiais inorgânicos, que neste caso compõe as substâncias que não volatilizam no experimento, relativo a composição mineralógica, apresentaram 95,01% para o material AP e 91,51% para o T. O material R, devido ao seu grande percentual de voláteis, naturalmente apontou o teor de cinzas mais baixo entre os três materiais, com 76,78%

6.1.6 Sais solúveis

De modo geral, os sais solúveis podem causar problemas estéticos nas peças cerâmicas ou, dependendo da concentração, até problemas ambientais. A Tabela 7 apresenta os valores de sais solúveis dos três materiais.

Tabela 7 - Ensaio dos sais solúveis dos materiais estudados.

Elementos (SS %)	Materiais		
	Argila Plástica (AP)	Taguá (T)	Rejeito Fino (R)
Na ⁺¹	0,007	0,013	0,034
K ⁺¹	0,003	0,038	0,016
Mg ⁺²	0,001	0,088	0,006
Ca ⁺²	0,007	0,064	0,045
Total	0,018	0,203	0,101

Fonte: Do autor (2024).

Os resultados demonstram que o material T apresenta o maior teor, com 0,203%, seguido pelo material R, com 0,101%, e pela AP, que apresentou o menor teor, com apenas 0,018%. A presença de sais, especialmente no material T, eleva o potencial de migração desses íons durante a queima, podendo resultar na formação de eflorescências. Além disso, caso esses materiais entrem em contato com a água, há risco de solubilização dos elementos, que podem ser lixiviados ou carregados para o solo ou recursos hídricos, impactando a qualidade ambiental do entorno. Portanto, é fundamental monitorar e controlar a quantidade de material na composição para evitar tais efeitos.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

Foram desenvolvidas diversas formulações a partir dos três materiais que compõem o estudo e, delas, foram estudadas o percentual de resíduo bruto, a plasticidade e a dilatometria. Esta medida permite investigar como as diferentes composições influenciam nas propriedades cerâmicas, oferecendo subsídios adicionais para a interpretação dos resultados.

6.2.1 Resíduo bruto

O ensaio de resíduo bruto caracteriza-se por sua simplicidade experimental, não exigindo tempo demasiado ou elevados recursos financeiros. Mesmo assim, a obtenção destes dados fornecem informações relevantes para a interpretação dos fenômenos processuais, ou para a análise de desempenho dos produtos cerâmicos.

Basicamente, o resíduo bruto é constituído por impurezas, em sua grande maioria, por sílica (quartzo livre) ou outros minerais grosseiros. Este componente, devido à sua baixa reatividade à umidade, contribui para a permeabilidade das águas do interior das peças para o exterior, mostrando-se, em proporções razoáveis, ser um importante agente na etapa de secagem.

Embora a presença do resíduo bruto seja benéfica na massa cerâmica, é importante controlar a sua quantidade. O excesso pode levar a problemas estruturais como porosidade e fragilidade, devido à formação de espaços vazios causada pela liberação de água e à redução da coesão entre as partículas.

De acordo Zaccaron *et al.*, (2024) o resíduo bruto influencia os resultados de retração, absorção e resistência. Além disso, também exerce impacto sobre outras condições na indústria, como a velocidade de

extrusão, a secagem propriamente, a queima, regulagem da boquilha e desgastes internos, reforçando a importância de tal experimento para controles da qualidade do produto e operacional.

Na hipótese da massa cerâmica com déficit de resíduo e com partículas de granulometria pequena, esta possuirá estrutura interna mais densa ou empacotada, o que afetará, além da secagem, a velocidade de extrusão e, como consequência, poderá reduzir a produtividade. Já na condições em que haja a quantidade ideal de resíduo bruto, a vazão na extrusão poderá ser maior porque a estrutura interna da massa é menos compacta, mas para isso, deverá haver controle na distribuição granulométrica para não perder em resistência mecânica.

Alguns estudos que envolvem a secagem rápida, tais como o de Nandi *et al.*, (2024), abordam como parâmetros relevantes o resíduo bruto na mesma importância da DTP. A Tabela 8 demonstra os resultados de resíduo bruto encontrados em cada formulação desenvolvida.

Para Crozetta *et al.*, (2016) a análise da granulometria aplicado ao resíduo bruto, pode afetar diretamente a plasticidade, e com isso, é extremamente necessário o controle dessa propriedade nas formulações cerâmicas.

Tabela 8 - Valores de resíduo bruto para as dez formulações desenvolvidas.

Formulações.	Resíduo Bruto (%)
F.1	6,06
F.2	2,32
F.3	33,14
F.4	3,97
F.5	13,37
F.6	11,48
F.7	8,83
F.8	6,86
F.9	4,95
F.10	16,83

Fonte: Do autor (2024).

A análise dos dados evidencia que a formulação F.3, composta por 100% de R, apresentou maior percentual de resíduo bruto, atingindo 33,14%. Este resultado indica que essa formulação tende a exibir maior porosidade e fragilidade, mas pode ser vantajosa nas etapas de secagem. Em contraste, a formulação F.2, composta por 100% de T, destaca-se com

o menor resíduo bruto, apenas 2,32%. Devido ao menor tamanho das partículas, essa condição pode resultar no adensamento excessivo, impactando positivamente a resistência mecânica, mas dificultando os processos de secagem.

À medida que as composições variam de F.4 a F.10, os resultados de resíduo bruto foram proporcionais ao predominando de determinado material. Formulações com alto percentual de R apresentaram maior resíduo bruto, enquanto aquelas com maior percentual de T, exibiram menores valores.

A formulação F.8, composta por 66,6% de AP, 16,7% de T e 16,7% de R, apresentou resíduo bruto de 6,86%, demonstrando um equilíbrio entre os componentes. Este resultado sugere que a predominância de AP, combinada com menores proporções de T e R, poderá obter resultados vantajosos quanto as propriedades mecânicas ou estruturais das peças, assim como no processo de secagem.

6.2.2 Plasticidade

A plasticidade de materiais argilosos constitui-se em um importante indicador, pois mostra a capacidade desses materiais de suportar a aplicação de pressão durante processos de moldagem, sem riscos de fissuras. Esse comportamento é essencial para o processamento de cerâmica por extrusão (Andrade; Al-qureshi; Hotza, 2011).

O índice de plasticidade das argilas estão relacionados a outros parâmetros que interferem diretamente nesta propriedade, dentre elas a composição mineralógica, o tamanho das partículas ou a presença de impurezas (Abdelmalek *et al.*, 2017). A morfologia das argilas é estruturada em lamelas devido à estrutura cristalina dos argilominerais, que deslizam umas sobre as outras na presença de água, resultando na possibilidade de moldagem da argila. No entanto, quando há um excesso de partículas de areia ou minerais inertes, a capacidade de fluidez é interrompida, uma vez que essas partículas não interagem com a água. O resultado é o maior fluxo de água para o exterior das peças, reduzindo a retenção de água e a capacidade plástica.

A obtenção dos valores relacionados à plasticidade estão apresentados na Tabela 9 e foram baseados no índice de plasticidade (IP), atribuído por Atterberg. Este indicador relaciona por subtração o limite de liquidez (LL), que resulta no teor de umidade máximo que uma argila pode atingir até que se transforme em um líquido, e o limite de plasticidade (PL), sendo o menor teor de umidade até que a argila perde a capacidade de moldagem e se torna um material quebradiço.

Os resultados demonstram que a formulação F.1, constituída 100% de AP, obteve o maior resultado, com 28,66%, indicado ser uma argila altamente plástica. Já a F.2 e F.3, compostas por 100% de T e R, respectivamente, apresentaram resultados de 4,56% e 8,42%. O baixo índice de F.3 pode estar associado ao resultado de resíduo bruto, da qual apresentou o maior resultado neste material e, para a F.2, pode estar vinculado a presença de minerais não reativos à água, como a presença de feldspatos do grupo dos plagioclásio. Quanto a F.1, este apresenta a composição química e mineralógica ideal para a formação de plasticidade, com elevados teores de argilominerais.

Tabela 9 - Índices de plasticidade de Atterberg das dez formulações desenvolvidas.

Form.	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
F.1	58,34	29,68	28,66
F.2	24,29	19,74	4,56
F.3	28,53	20,12	8,42
F.4	46,83	26,37	20,46
F.5	39,68	22,88	16,80
F.6	32,02	21,81	10,21
F.7	42,43	20,45	21,99
F.8	48,31	24,27	24,04
F.9	41,67	26,92	14,75
F.10	30,44	21,82	8,62

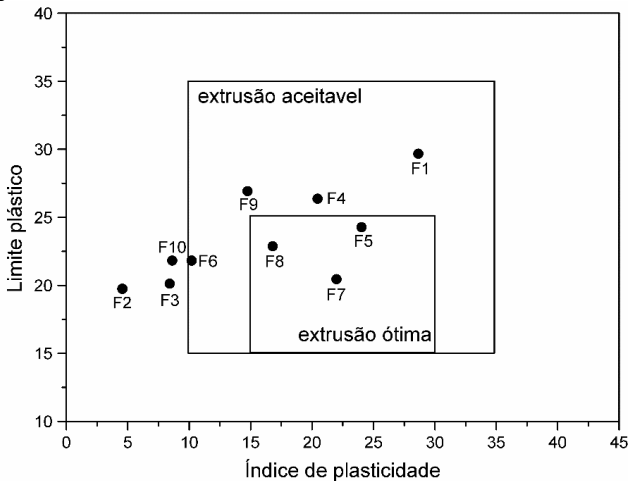
Fonte: Do autor (2024).

Os valores de F.4 até F.10 são compatíveis com o predomínio de determinados materiais. Por exemplo, a composição F.8, composta por 66,6% de AP, apresentou IP de 24,04%, indicando alta plasticidade. Da mesma forma, a composição F.10, predominada por R e T, atingiu baixa plasticidade, com IP de 8,62%.

Os valores obtidos com relação ao índice de plasticidade, foram plotados no gráfico de superfície resposta para determinar o índice de trabalhabilidade (Figura 25), estabelecido por Bain, (1987).

As formulações F.5, F.7 e F.8 enquadraram-se em um nível ótimo de extrusão, enquanto as formulações F.1, F.4, F.6 e F.9 apresentaram um nível de extrusão aceitável. Já as formulações F.2, F.3 e F.10 ficaram nas margens da zona aceitável.

Figura 25 - Representação gráfica do índice de trabalhabilidade das dez formulações desenvolvidas nas zonas aceitáveis e ótimas de extrusão.



Fonte: Do autor (2024).

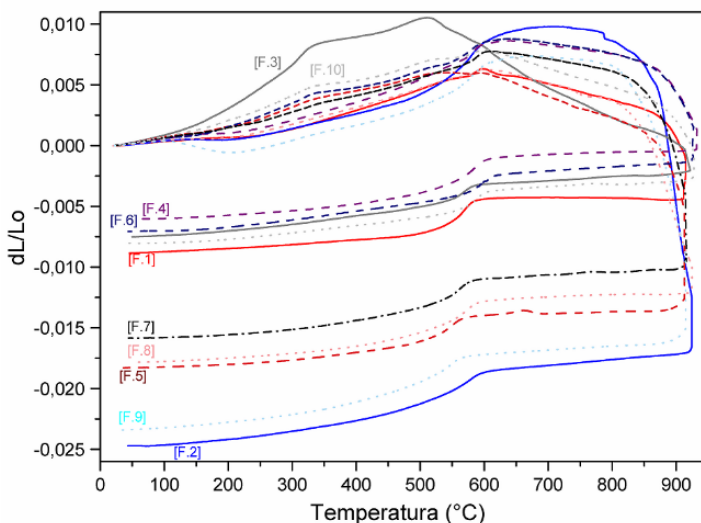
6.2.3 Dilatometria

A análise dilatométrica das formulações (Figura 26), ilustram a expansão de todas as amostras com intervalo entre 500 °C e 600 °C, como consequência da transformação alotrópica do quartzo- α \rightarrow quartzo- β , por meio de uma mudança reversível na estrutura cristalina (Húlan *et al.*, 2020; Schackow; Correia; Effting, 2020). Essa inversão pode levar a rachaduras na cerâmica caso o resfriamento ocorrer abruptamente (de Oliveira Guimarães *et al.*, 2022), portanto, nesta etapa deve-se ter maior controle operacional no forno (Velasco *et al.*, 2015). A partir de 850~900 °C, ocorreu sinterização intensiva, iniciando a contração da amostra, chegando a máxima retração após o resfriamento.

Para a formulação F.3, composta 100% pelo material R, o comportamento observado foi distinto dos demais. Houve uma expansão inicial mais acentuada, que pode estar associada a várias circunstâncias, como o aumento da pressão interna na amostra ocasionada pela formação de gases no interior do corpo cerâmico, e até mesmo pela expansão devido à presença de calcita (Kłosek-Wawrzyn; Małolepszy; Murzyn, 2013; Serra *et al.*, 2013; Vasić *et al.*, 2021). A partir de aproximadamente 520 °C, a expansão cessa, iniciando uma leve retração, que se estende até cerca de 900 °C. Nesse ponto, o gráfico evidencia o início de uma contração intensa.

Dentre os materiais individuais (F.1, F.2 e F.3), a composição F.3 obteve a menor retração total, ilustrando estabilização dimensional mais acentuada. Em seguida, F.2, composto 100% de material T, apresentou a retração mais pronunciada. A menor retração pode estar relacionada com elevada presença de alumina, sílica livre ou partículas grosseiras, conforme indicado na caracterização dos materiais. Por outro lado, a retração mais acentuada de F.2 pode ser atribuída à presença de feldspatos, que atuam como fundentes e que promovem a formação de fase líquida, intensificando a retração do corpo cerâmico.

Figura 26 - Curvas dilatométricas das dez formulações desenvolvidas com ciclo térmico completo (aquecimento e resfriamento) até 950 °C.

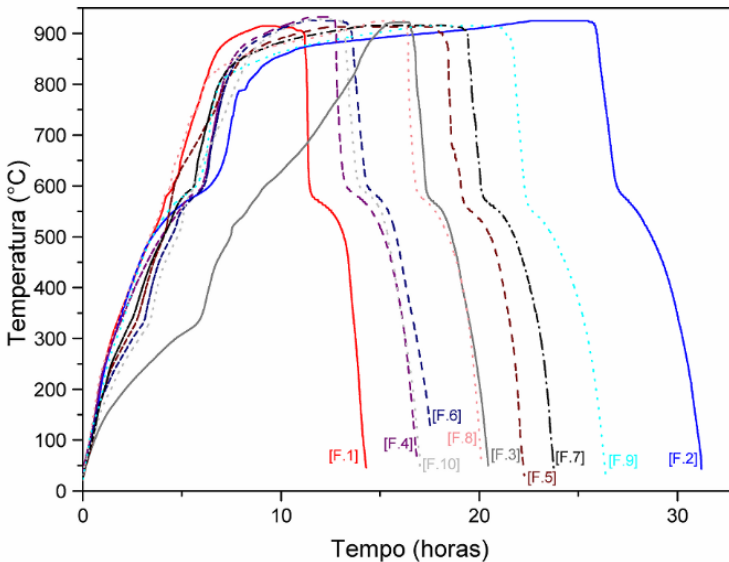


Fonte: Do autor (2025).

Com base na curva dilatométrica, obteve-se a curva de queima ideal das amostras estudadas, considerando para o seu cálculo, que a razão entre a variação da dimensão linear (dL) e a variação do tempo (dt) se mantém sempre constante, ou seja, $dL/dt = \text{Constante (k)}$ (Figura 27). Esta metodologia permite garantir que a taxa de variação dimensional (expansão e retração da amostra), ao longo de toda curva de queima, seja sempre a mesma. Ainda, a aplicação da taxa de variação constante foi realizada em todas as três fases do processo de queima em forno para cerâmica vermelha, as quais incluem: pré-aquecimento, zona de queima e resfriamento (Vasić *et al.*, 2017).

Da análise das curvas de queima obtidas por este método, (Figura 27), verificou-se que F.1, apresenta o ciclo mais rápido, com cerca de 14 horas de frio a frio, ou seja, apresenta a taxa de variação dimensional mais baixa entre todas as formulações. Essa formulação constitui-se de 100% de AP, que é a matéria-prima base mais utilizada no setor de cerâmica vermelha na região.

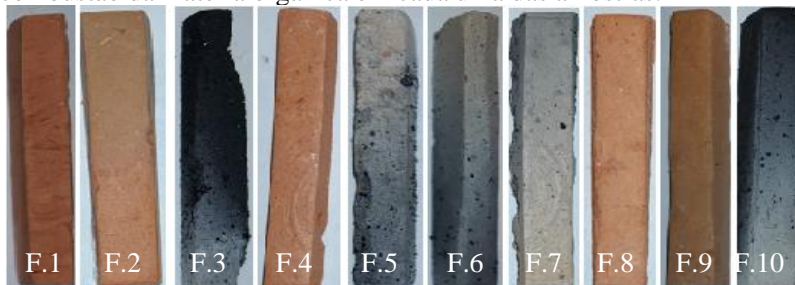
Figura 27 - Curvas de queima das dez formulações desenvolvidas, obtidas a partir das curvas dilatométricas e admitindo uma razão $dL/dt = \text{Constante (k)}$, usando para e todas as curvas $k = 1$.



Fonte: Do autor (2025).

Nota-se que a F.3 apresenta a obrigatoriedade de um ciclo mais lento no aquecimento, evidenciando que há necessidade de intervalos maiores na queima para que seja alcançada a combustão completa do combustível fornecido pelo material R. É possível ver nos corpos-de-prova da Figura 28 que ainda há material carbonoso a queimar (F.3, F.5, F.6 e F.10). No entanto, ao atingir a temperatura máxima do teste (950 °C), exige-se menor tempo no patamar. Esse fator se evidencia por meio da análise termogravimétrica (Figura 24), indicando que não atingiu a estabilidade da massa da amostra até ao final do ensaio.

Figura 28 - Fotografias dos corpos-de-prova após o ensaio de dilatometria, que permitem avaliar em detalhe os diferentes graus de combustão da matéria orgânica em cada uma das amostras.



Fonte: Do autor (2025).

A formulação F.2 segue um comportamento semelhante as demais no aquecimento, sem grandes diferenças nas expansões térmica. Todavia, no patamar observa-se um tempo maior devido à formação de uma fase vítrea mais intensa e conseqüentemente a uma variação dimensional maior (o que obriga a um patamar mais extenso na curva de queima). Esse comportamento exige um ciclo total de queima mais longo, comparativamente às outras formulações, sendo superior a 30 horas (admitindo uma razão $dL/dt = 1$).

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Conforme discutido anteriormente, foi necessário fixar uma das formulações como parâmetro de referência para permitir a comparação dos resultados tecnológicos. A escolha foi fundamentada na composição que se assemelha as matérias-primas utilizadas na indústria da cerâmica vermelha. Diante desta perspectiva, a escolhida para representar o padrão industrial foi a F.4, composta por 50% de argila plástica (AP) e 50% de taguá (T).

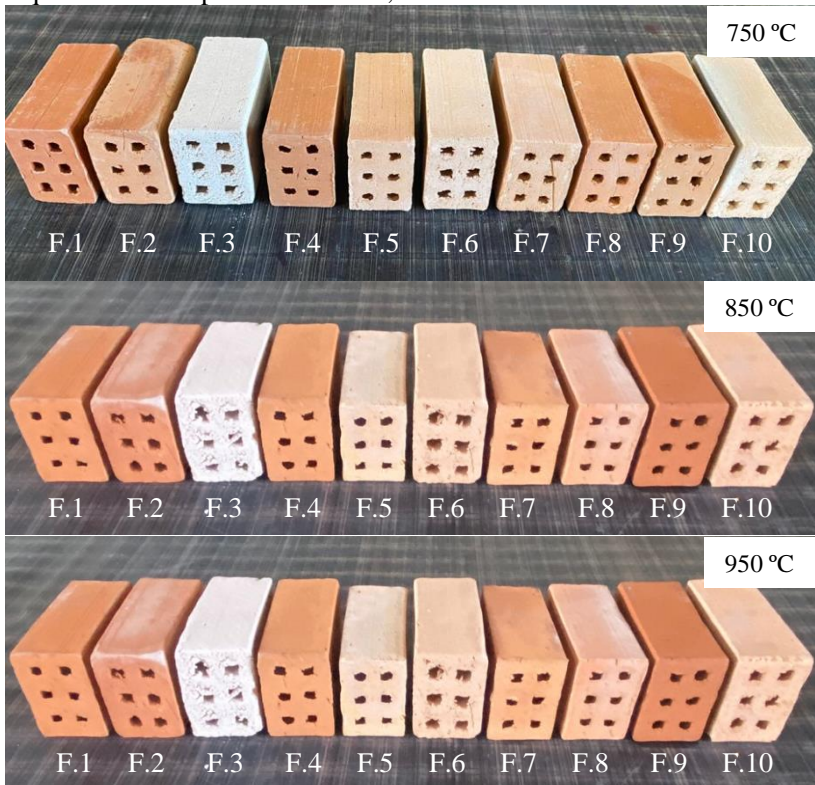
Como método de validação da qualidade tecnológica, utilizou-se a norma técnica NBR 15270-2, apresentada pela ABNT. Tal norma é específica para produtos produzidos pela indústria da cerâmica vermelha, porém, seus métodos de ensaios, parâmetros e valores de qualidade podem ser replicados em escala laboratorial, no entanto que são bases para investigações científicas.

Além dos ensaios essenciais de retração linear total (RTL.T), absorção de água (AA) e resistência mecânica (RM), especificados nesta norma, foram realizadas análises complementares que contribuem para a

interpretação dos fenômenos e resultados. Entre estas análises, incluíram-se a umidade (UM), retração linear de secagem (RTL.S), retração linear de queima (RTL.Q) e perda ao fogo (PF).

A seguir estão demonstradas as imagens dos CPs após a etapa de queima (Figura 29) nas três condições térmicas, assim como as tabelas contendo todos os resultados tecnológicos ora proposto. A Tabela 10 refere-se aos ensaios de UM e RTL.S, enquanto a Tabela 11 aos ensaios de RTL.Q, PF, AA e RM, sob as condições térmicas de 750 °C, 850 °C e 950 °C, respectivamente.

Figura 29 - Detalhe dos CPs das diferentes formulações após o processo de queima nas temperaturas de 750, 850 e 950 °C.



Fonte: Do autor (2024).

Em resumo, os resultados apresentados nas tabelas demonstram compatibilidade com os princípios da cerâmica vermelha, mesmo ao

adicionar rejeito fino de carvão. Ao associar, por exemplo, parâmetros como UM e RTL.S (Tabela 10), estes seguem a tendências esperada. De modo geral, formulações com maior percentual de umidade tendem a demonstrar maior desidratação dos capilares, que resultam em maior retração de secagem.

Tabela 10 - Resultados da caracterização tecnológica de umidade e retração linear de secagem.

Form.	UM (%)	RTL.S (%)
F.1	22,23 ± 0,13	7,61 ± 0,63
F.2	19,11 ± 0,16	4,94 ± 0,89
F.3	17,89 ± 0,12	3,23 ± 0,41
F.4	17,84 ± 0,28	5,64 ± 0,37
F.5	20,33 ± 0,38	7,69 ± 0,52
F.6	18,31 ± 0,14	3,59 ± 0,58
F.7	18,45 ± 0,19	5,87 ± 0,37
F.8	20,06 ± 0,12	6,46 ± 0,38
F.9	17,54 ± 0,27	5,22 ± 0,67
F.10	17,52 ± 0,2	4,05 ± 0,40

Fonte: Do autor (2024).

Considerando outros indicadores, em geral, as variações nos valores de AA podem estar associadas ao fenômeno de PF, devido à liberação de gases e à consequente formação de poros. Em relação à RM, as formulações que apresentam melhor desempenho foram aquelas com baixa taxa de AA, pois tendem a ter menor volume de poros e maior adensamento da massa.

É prudente destacar que esses resultados também dependem da combinação de outros fatores, como as características específicas de cada material, incluindo resíduo bruto, distribuição do tamanho das partículas, análise química, mineralógica, entre outros.

Analisando a Tabela 11, que demonstram os resultados tecnológicos de RTL.Q, PF, AA e RM, cada qual com sua temperatura de queima, nota-se que os valores variam conforme o aumento térmico, também obedecendo ao padrão da cerâmica vermelha. À medida que a temperatura aumenta, as amostras têm maior probabilidade de perder massa ou formar fase líquida. Esse processo é proporcional ao adensamento da massa, que, por sua vez, resulta em aumento nos valores de RTL.T. Esse fenômeno também tem impacto positivo sobre os parâmetros de AA e RM.

Tabela 11 - Resultados de caracterização tecnológica de retração linear de queima, perda ao fogo, absorção de água e resistência mecânica para as diferentes temperaturas de queima.

Temp. (°C)	Form.	RTL.Q (%)	P.F (%)	AA (%)	R.M (MPa)
750	F.1	0,46 ± 0,48	6,73 ± 0,4	13,63 ± 0,43	2,28 ± 0,48
	F.2	-0,15 ± 0,22	7,70 ± 0,44	15,68 ± 0,26	1,00 ± 0,23
	F.3	0,32 ± 0,34	19,78 ± 3,0	24,57 ± 1,86	0,24 ± 0,06
	F.4	0,38 ± 0,34	7,34 ± 0,62	12,64 ± 0,47	2,23 ± 0,36
	F.5	0,64 ± 0,31	13,97 ± 1,0	15,71 ± 0,52	2,22 ± 0,3
	F.6	-0,16 ± 0,18	13,56 ± 1,2	19,93 ± 0,59	0,89 ± 0,36
	F.7	-0,03 ± 0,15	10,02 ± 0,54	13,44 ± 0,32	2,46 ± 0,43
	F.8	0,06 ± 0,13	9,02 ± 0,48	13,20 ± 0,49	3,04 ± 0,56
	F.9	-0,14 ± 0,18	9,87 ± 0,56	14,28 ± 0,39	2,01 ± 0,64
	F.10	-0,04 ± 0,2	14,02 ± 1,62	18,23 ± 0,74	1,72 ± 0,52
850	F.1	0,58 ± 0,42	7,33 ± 0,12	13,45 ± 0,18	3,31 ± 0,47
	F.2	-0,09 ± 0,22	8,69 ± 0,42	15,50 ± 0,24	1,76 ± 0,79
	F.3	0,41 ± 0,25	21,42 ± 2,1	25,66 ± 1,04	0,50 ± 0,17
	F.4	0,11 ± 0,28	8,46 ± 0,27	12,36 ± 0,37	3,53 ± 0,7
	F.5	1,21 ± 0,59	15,99 ± 0,8	15,35 ± 0,47	3,52 ± 0,51
	F.6	0,52 ± 0,55	15,04 ± 0,73	19,21 ± 0,72	1,77 ± 0,67
	F.7	0,37 ± 0,48	13,13 ± 0,48	14,13 ± 1,59	3,78 ± 0,86
	F.8	0,20 ± 0,27	9,82 ± 0,19	12,57 ± 0,44	4,46 ± 0,93
	F.9	0,08 ± 0,38	10,82 ± 0,3	13,62 ± 0,6	3,39 ± 0,98
	F.10	0,15 ± 0,37	16,76 ± 0,74	18,74 ± 0,57	2,14 ± 0,52
950	F.1	1,70 ± 0,74	7,63 ± 0,19	12,97 ± 0,72	4,00 ± 0,6
	F.2	2,06 ± 1,07	9,25 ± 0,23	13,42 ± 1,26	3,58 ± 0,8
	F.3	1,62 ± 0,66	23,26 ± 1,1	25,46 ± 1,12	0,84 ± 0,19
	F.4	1,83 ± 0,73	8,87 ± 0,2	10,87 ± 0,94	5,48 ± 0,74
	F.5	2,24 ± 0,8	16,92 ± 0,34	14,66 ± 0,97	4,30 ± 0,39
	F.6	2,86 ± 1,39	16,18 ± 0,42	16,59 ± 2,01	2,49 ± 1,09
	F.7	2,06 ± 0,96	13,64 ± 0,13	12,36 ± 1,52	4,94 ± 0,99
	F.8	1,21 ± 0,56	10,47 ± 0,14	11,30 ± 1,03	5,37 ± 0,85
	F.9	2,03 ± 1,14	11,58 ± 0,52	11,54 ± 1,86	5,93 ± 0,94
	F.10	2,11 ± 0,93	18,13 ± 0,45	16,86 ± 1,42	3,17 ± 0,86

Fonte: Do autor (2024).

Algumas formulações merecem destaque devido as suas características específicas, sobretudo a F.3 composta 100% por R. O aspecto visual que as peças assumiram possuem características compatíveis quando observada a composição química; isso posto, o predomínio da tonalidade branca pode estar relacionado com o baixo percentual do elemento ferro. Além disso, o carbono presente no material R, quando liberado durante a queima pode alterar a atmosfera do forno,

evitando que o oxigênio possa oxidar elementos como o ferro, não formando fases que aferem a cor avermelhada, deixando as peças mais claras.

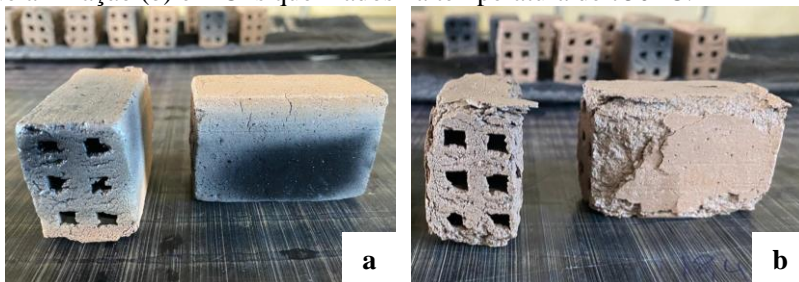
A medida que houve decréscimo de R nas outras formulações e, acréscimo de AP ou T, as peças adquiriram tonalidade avermelhada, muito provavelmente pelo aumento da concentração de ferro presentes nestes outros dois materiais, associado também a sua oxidação.

Ainda com relação a F.3, foi detectado em sua composição maior presença de elementos voláteis, com destaque para o elemento carbono, com 15,44%, enquanto a AP não foi detectado esta substância e a T, com 1,35%. Esta condição resultou em duas características: a presença de coração negro nas faces dos CPs (Figura 30a) e também constatada na análise dilatométrica, que indica a combustão incompleta dos elementos orgânicos, e a tendência à fragilidade, principalmente quando submetidas a queima em menor temperatura, evidenciada pela esfoliação de alguns CPs queimados a 750 °C, (Figura 30b).

Reforçando a tese, outras duas formulações também apresentaram coração negro: a F.6 e a F.10. Esta característica se deve ao predomínio da concentração de material R nas composições, com 50% e 66% respectivamente, demonstrado pela Figura 31 nas três faixas térmicas.

À medida que estas formulações foram submetidas a queimas em temperaturas maiores, houve redução de coração negro, indicando maior probabilidade de haver combustão completa dos elementos orgânicos. Da mesma maneira, o aumento da temperatura diminuiu a condição de fragilidade das formulações, resultando em peças mais integras.

Figura 30 - Amostras que detalhem a presença de coração negro (a) e delaminação (b) em CPs queimados na temperatura de 750 °C.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 31 - Detalhe dos CPs indicando a presença de coração negro nas formulações F.3, F.6 e F.10, sob as temperaturas 750 °C, 850 °C e 950 °C.



Fonte: Do autor (2024).

6.3.1 Retração linear (RTL)

Conforme já relatado, o processo de secagem está correlacionado com a desidratação dos capilares das peças, enquanto a queima, associado ao processo de sinterização dos elementos fundentes e a liberação de voláteis, e ambos resultam em alterações dimensionais.

Apesar dos parâmetros de retração linear de secagem (RTL.S) e retração linear de queima (RTL.Q) serem fatores de qualidade cerâmico e exigido pela ABNT, não há estabelecido em norma valores limites que prevejam as modificações estruturais das peças. Contudo, na literatura apresentada por Dondi, (2006), foi estabelecido valores aceitáveis e ótimos para a RTL.S e RTL.Q, sendo que: para RTL.S, os valores aceitáveis variam entre 3 e 10 cm/m, enquanto os valores ótimos estão entre 5 e 8 cm/m. Para RTL.Q, os valores aceitáveis estão entre 1,5 e 3 cm/m, e os valores ótimos inferiores a 1,5 cm/m.

RTL.S: Os resultados apresentados na Tabela 10 revelam que a F.1, composta por 100% de AP, em sintonia com as formulações F.5 e F.8, que contêm maior percentual deste material, apresentaram os maiores índices de umidade, variando entre 22,23% e 20,06%. A alta umidade reflete na maior RTL.S devido à elevada desidratação, comprovando que essas formulações registraram os maiores valores, com intervalos de 7,69% e 6,46%.

Segundo Oliveira, (2011), esses percentuais indicam argilas com alta plasticidade, proporcionando boas condições de trabalhabilidade durante o processo de extrusão. Durante os experimentos, as peças apresentaram acabamento superior e mais uniforme quando a composição predominante foi a AP, no entanto que as formulações F.5 e F.8 obtiveram resultados compatível com a zona de extrusão ótima e, a F.1, com extrusão aceitável.

Os fatores que influenciam o teor de umidade podem estar correlacionados com a distribuição do tamanho das partículas (DTP) ou resíduo bruto (sílica livre). Materiais com granulometria menor possuem maior área superficial, o que aumenta a capacidade de armazenamento de água entre os poros. Essas constatações convergem ao associar a F.1 ao indicador da DTP e resíduo bruto, evidenciando a presença de partículas finas e, sobretudo a melhor distribuição granulométrica, que resultou na maior umidade e, como consequência, no maior índice de RTL.S.

Observou-se também a tendência natural de ocorrer redução na RTL.S à medida que as formulações apresentaram queda nas taxas de umidade ou aumento das partículas, especialmente para as composições onde predominou o material R.

Nesta perspectiva, a formulação F.3, composta por 100% de R, demonstrou a menor taxa de RTL.S, com média de 3,23%. Esta composição está entre as que possuem menor teor de umidade e com partículas mais grosseiras. As composições F.6, F.9 e F.10, da qual predominam materiais como R e T, também apresentaram menor retração em função da baixa hidratação.

Com base nos resultados, em resumo, é possível aferir que a F.1 apresentou maior plasticidade e com melhor distribuição granulométrica, resultando no maior teor de umidade e índice de RTL.S. Todavia, a F.3 demonstrou menores índices de retração e maior granulometria, sugerindo que esta condição auxilia na estabilidade dimensional.

RTL.Q: Os resultados apresentados na Tabela 11 revelam que a redução das dimensões das peças, envolvendo a etapa de queima para as temperaturas de 750°C e 850°C, é mais representativa para a F.5, que contém 50% de AP e R, assim como para a F.1, com 100% de AP. Os

resultados demonstraram redução de 0,64% e 1,21% para a F.5, submetida às queimas de 750°C e 850°C. Já a F.1 apresentou reduções de 0,46% queimada a 750°C e 0,58% para 850°C.

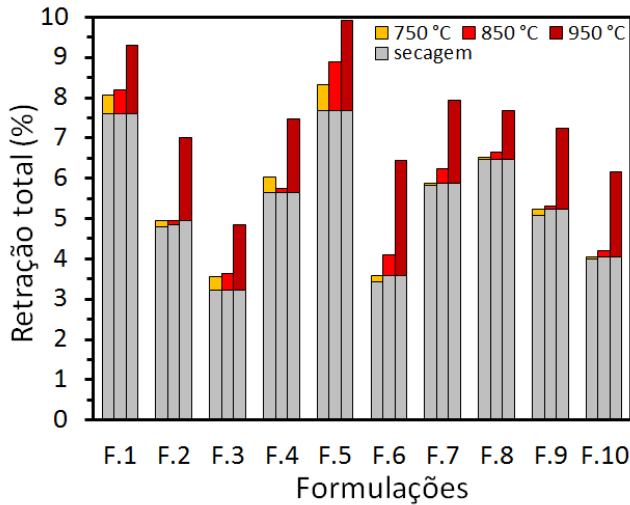
A F.2, assim como a F.6, composta por uma quantidade considerável de elementos fundentes, possui comportamento diferente das demais formulações. Quando submetidas a baixas temperaturas, os CPs demonstraram dilatação (-0,15% e -0,16%). No entanto, quando queimadas a 950°C, essas duas formulações exibiram as maiores retrações entre todas as amostras testadas, com 2,06% e 2,86%, que também foram aferidas pela análise dilatométrica. Esse comportamento pode estar associado à formação de fase líquida dos elementos fundentes presentes no material T, que se torna mais pronunciada a temperaturas elevadas, resultando em maior densificação das peças.

Com base nos resultados, é possível aferir que a RTL.Q ocorre sob duas condições: em baixas temperaturas a redução das dimensões pode ser atribuída à liberação dos elementos voláteis e das águas presentes nas estruturas cristalinas, enquanto em temperaturas elevadas, o fenômeno de sinterização se torna predominante, resultando no adensamento das peças.

RTL.T: O gráfico da Figura 32 ilustra a retração total das formulações estudadas, que correspondem a retração de secagem, devido a perda de água, e a retração de queima, pela densificação das peças. Nota-se que a presença do material R auxiliou no controle dimensional, em especial na secagem, e o material T, em temperaturas entre 750 e 850 °C teve uma leve expansão, porém na temperatura de 950 °C, obteve percentuais elevados de retração, da mesma forma que foi observado no ensaio de dilatometria.

Foi considerado neste estudo, como parâmetro de referência de qualidade a RTL.T. Este parâmetro integra tanto a redução das dimensões para a etapa de secagem, quanto na queima.

Figura 32 - Retração térmica linear total de todas as formulações sob as diferentes faixas de temperaturas de queima.



Fonte: Do autor (2024).

A análise de variância (Tabela 12) para o ensaio de RTL.T apresentou confiabilidade estatística superior a 95% (valor- $p < 0,05$) sob as três condições térmicas, exceto para a temperatura de 950 °C no modelo cúbico especial. Como fator de escolha para representar os gráficos de superfície resposta, além do valor- p , foi priorizado o maior coeficiente de determinação (R^2), indicando o quão bem o modelo se ajusta aos dados.

Desta forma, o modelo escolhido para os três gradientes térmicos foi o modelo cúbico, da qual apresentou confiabilidade estatística superior a 95% (valor- $p < 0,05$) e maior valor de R^2 .

Os gráficos de superfície respostas (Figura 33) demonstram o comportamento da redução das dimensões das peças nos 3 níveis de temperatura. Os resultados estatísticos revelam a região que mais sofreria com a redução nas dimensões, sendo a formulação que envolvesse a composição com 70% de AP e 30% de R, aproximando-se da F.5 que é 50% de AP e R. Ao contrário, a que apresentou maior estabilidade dimensional foi a F.3, composta por 100% de R. As Equações 1, 2 e 3, ilustram os ajustes relativos aos modelos selecionados para retração linear total.

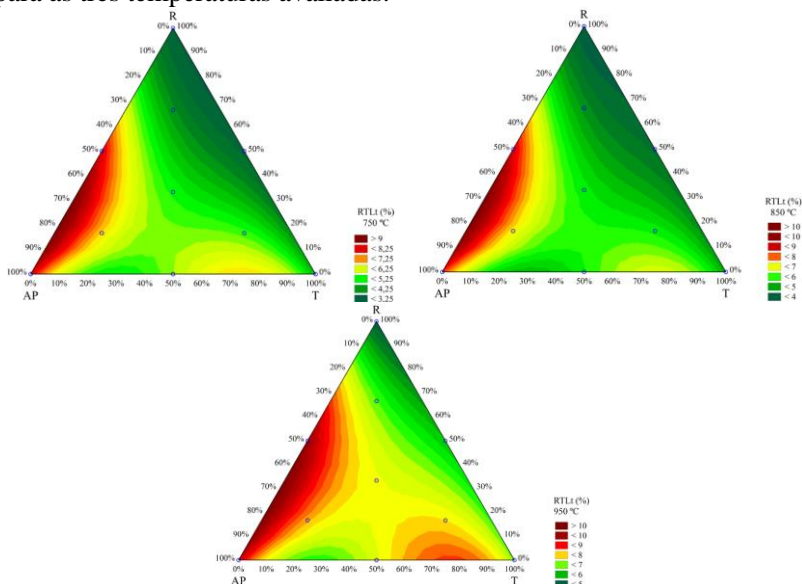
Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA) para retração linear total, para as três temperaturas avaliadas.

Temp. (°C)	Modelo	F	p	R ²
750	Linear	228,63	<0,01	0,69
	Quadrático	49,65	<0,01	0,82
	Cúbico especial	14,72	<0,01	0,84
	Cúbico	34,07	<0,01	0,88
850	Linear	161,58	<0,01	0,62
	Quadrático	61,37	<0,01	0,81
	Cúbico especial	17,57	<0,01	0,82
	Cúbico	28,53	<0,01	0,86
950	Linear	73,73	<0,01	0,43
	Quadrático	33,51	<0,01	0,62
	Cúbico especial	3,27	0,07	0,63
	Cúbico	12,59	<0,01	0,67

No qual: F = valor-F (significância estatística); p = valor-p (confiabilidade); R² = coeficiente de determinação (ajuste). Em vermelho os modelos com confiabilidade $\geq 95\%$.

Fonte: Do autor (2024).

Figura 33 - Superfície resposta para a análise de retração linear total, para as três temperaturas avaliadas.



Fonte: Do autor (2024).

$$RTL.T_{750} = 8,16 \times AP + 4,48 \times T + 3,25 \times R - 2,28 \times AP \times T + 9,80 \times AP \times R - 1,89 \times T \times R - 19,99 \times AP \times T \times R - 18,61 \times AP \times T \times (AP - T) + 11,61 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (1)$$

$$RTL.T_{850} = 8,17 \times AP + 4,86 \times T + 3,80 \times R - 3,02 \times AP \times T + 11,00 \times AP \times R - 0,55 \times T \times R - 21,92 \times AP \times T \times R - 16,82 \times AP \times T \times (AP - T) + 13,00 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (2)$$

$$RTL.T_{950} = 9,32 \times AP + 6,91 \times T + 4,80 \times R - 2,75 \times AP \times T + 11,40 \times AP \times R + 0,76 \times T \times R - 13,80 \times AP \times T \times R - 17,01 \times AP \times T \times (AP - T) + 2,60 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (3)$$

Onde:

RTL.T = Retração linear total (diferentes temperaturas);

AP = Argila plástica;

T = Taguá;

R = Rejeito fino.

6.3.2 Absorção de água (AA)

A absorção de água (AA) é um parâmetro técnico proposto pela NBR 15270-2, (ABNT, 2017) que define limites de qualidade mínimos e máximos, não podendo ser inferior a 8% ou superar 25%. Elevados índices de AA podem estar associado a grande presença de poros, enquanto índices baixos podem indicar adensamento da massa cerâmica, interferindo de forma negativa ou positiva em outras propriedades, como a resistência mecânica.

A porosidade, portanto, é um fator determinante para os valores relacionados a AA. A formação de poros pode estar associada ao tamanho das partículas. Outra condição que interfere e tem forte impacto sobre sua formação está relacionada ao processo de fabricação cerâmico, que libera água na secagem e elementos voláteis durante a queima, resultando na criação destes espaços vazios.

As formulações que predominam o material R, que possuem grande quantidade de elementos voláteis, acompanharam os valores de PF e, como consequência, obtiveram os maiores índices de AA para todas as três condições térmicas. Outra condição que interfere nos resultados de AA é o alto percentual de resíduo bruto (sílica livre). Esse material tende a diminuir o empacotamento da massa cerâmica, havendo a formação de poros maiores. Reforçando a tese, as formulações que predominaram o

material R, com alto teor de elementos voláteis e partículas mais grosseiras, apresentaram maiores valores de AA.

A F.3, com 100% de R, sob a temperatura de 850 e 950 °C registrou resultado fora dos critérios de qualidade técnica, com valores superiores a 25% de AA. Esta formulação também obteve o maior valor de PF. Ao contrário, a F.8, com 16,7% de R, demonstrou um dos melhores resultado de AA para as três condições térmicas, à medida que apontou baixos valores para PF. Estas constatações reforçam a hipótese de que os valores de PF interferem, sobremaneira, nos resultados de AA.

As demais formulações, sob as três temperaturas apresentaram valores de AA compatíveis com o que determina a norma, enquadrando-as sob os critérios de qualidade tecnológica.

Outra observação importante a ser destacada é a tendência de melhora dos índices de AA à medida que a temperatura aumenta. Esta característica pode estar associada a outros fenômenos que ocorrem durante o processo de queima. Tal fenômeno pode ser justificado pela maior probabilidade de formação de fase líquida com o aumento da temperatura e o conseqüente processo de sinterização, que permite o fechamento dos poros formados pela liberação dos voláteis.

A formulação F.9 que contém 66,6% de T e elevado percentual de substâncias fundentes, e menores percentuais de AP (argila estruturante) e R (voláteis), ambas com 16,7%, ilustra bem estas suposições. Quando submetidas a temperatura de 750 °C, obteve resultado comparativo intermediário. No entanto, sob condições de queima mais elevadas, a formulação F.9 destacou-se entre as demais, demonstrando que há maior probabilidade de formação de fase líquida com temperaturas mais elevadas, o que interferiu positivamente na AA.

O melhor índice de AA foi observado na formulação F.4, considerada padrão, com melhorias progressivas à medida que a temperatura aumentou: 12,64% para queima a 750 °C, 12,36% a 850 °C e 10,87% a 950 °C.

Apesar do desempenho superior da formulação F.4, é importante destacar as formulações F.7 e F.8, que incorporam 33,3% e 16,7% de R, respectivamente. Como o objetivo do estudo não é apenas identificar a composição cerâmica com o melhor desempenho, mas também ponderar os aspectos econômicos e ambientais. Nesse contexto, as formulações F.7 e F.8 se destacaram, apresentando resultados de 13,44% e 13,20% de AA, respectivamente, sob a menor condição de queima, que é a 750 °C. Esses valores estão enquadrados nos padrões de qualidade, demonstrando que é possível alcançar bom desempenho tecnológico enquanto se promove as vantagens ambientais e econômicas.

Em relação a análise estatística, para o parâmetro de absorção de água (AA), optou-se pelo modelo cúbico para as temperaturas de 750 °C e 850 °C devido aos maiores valores de R^2 , (0,95 e 0,96, respectivamente). Já para a temperatura de 950 °C, optou-se pelo modelo cúbico especial, considerando que, apesar de ambos os modelos apresentarem (R^2) de 0,87, o modelo cúbico especial possui um valor de (p) mais significativo ($p < 0,01$). A Tabela 13 demonstra os resultados respectivo a análise de variância, enquanto a Figura 34 o gráfico de superfície resposta.

Tabela 13 - Análise de variância (ANOVA) para absorção de água, para as três temperaturas avaliadas.

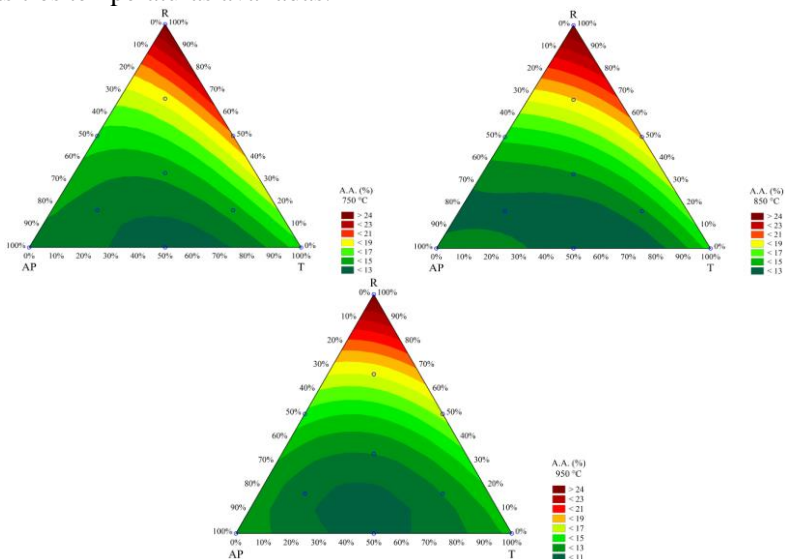
Temp. (°C)	Modelo	F	p	R^2
750	Linear	365,68	<0,01	0,79
	Quadrático	166,30	<0,01	0,94
	Cúbico especial	27,93	<0,01	0,94
	Cúbico	11,30	<0,01	0,95
850	Linear	348,27	<0,01	0,78
	Quadrático	219,75	<0,01	0,95
	Cúbico especial	19,21	<0,01	0,95
	Cúbico	8,33	<0,01	0,96
950	Linear	200,12	<0,01	0,67
	Quadrático	98,40	<0,01	0,87
	Cúbico especial	6,88	<0,01	0,87
	Cúbico	0,69	0,50	0,87

No qual: F = valor-F (significância estatística); p = valor-p (confiabilidade); R^2 = coeficiente de determinação (ajuste). Em vermelho os modelos com confiabilidade $\geq 95\%$.

Fonte: Do autor (2024).

Ao analisar os gráficos de superfície resposta, de modo geral, está demonstrado que as composições que apresentam os melhores desempenhos é que predomina AP, com menor percentual de R e T, indicando uma estrutura mais densa e menos porosa, mostradas pelas tonalidades em verde. Já as regiões mais críticas foram encontradas nas formulações que predominam o material R, como F.3 e F.6 a 750°C, devido à menor sinterização e maior porosidade, indicada pela região em vermelho. As Equações 4, 5 e 6, ilustram os ajustes para os modelos selecionados relativo à absorção de água nas diferentes temperaturas de análise.

Figura 34 - Superfície resposta para a análise de absorção de água, para as três temperaturas avaliadas.



Fonte: Do autor (2024).

$$AA_{750} = 13,59 \times AP + 15,64 \times T + 24,51 \times R - 8,24 \times AP \times T - 13,68 \times AP \times R - 0,91 \times T \times R - 28,24 \times AP \times T \times R + 5,91 \times AP \times T \times (AP - T) + 6,35 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (4)$$

$$AA_{850} = 13,43 \times AP + 15,47 \times T + 24,51 \times R - 8,24 \times AP \times T - 13,68 \times AP \times R - 0,91 \times T \times R - 28,28 \times AP \times T \times R + 5,92 \times AP \times T \times (AP - T) + 6,36 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (5)$$

$$AA_{950} = 13,01 \times AP + 13,31T + 24,82 \times R - 9,46 \times AP \times T - 17,05 \times AP \times R - 10,55 \times T \times R - 25,51 \times AP \times T \times R \quad (6)$$

Onde:

AA = Absorção de água (diferentes temperaturas);

AP = Argila plástica;

T = Taguá;

R = Rejeito fino.

6.3.3 Resistência mecânica (RM)

A avaliação dos resultados tecnológicos envolvendo a resistência mecânica (RM) indicou compatibilidade com os resultados de absorção de água (AA). Altos índices de AA resultaram em baixa RM, enquanto baixos resultados de AA refletiram em peças mais íntegras e resistentes. A literatura traz que a presença de umidade interfere na resistência das peças (Sathiparan & Rumeskumar, 2018).

De forma complementar, os resultados também estão em conformidade com as propriedades de cada material. Materiais com alto teor de voláteis ou excesso de resíduo bruto interferiram negativamente na resistência mecânica. Ao contrário, a presença de minerais estruturantes contribui para a estabilidade estrutural e os elementos fundentes, resultam na sinterização, elevando a resistência.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 11, observa-se que a F.3, constituída por 100% de rejeito fino (R), demonstrou o menor desempenho entre as formulações estudadas, obtendo resultados abaixo do estabelecido em norma. Os valores, portando, foram de 0,24 MPa para a temperatura de 750 °C, 0,50 MPa para 850 °C e 0,84 MPa para 950 °C. Por norma, o mínimo é de 1,5 MPa.

Este efeito pode estar relacionado, justamente pela quantidade de partículas grosseiras, demonstrada nos ensaios de resíduo bruto e DTP, assim como pela liberação de elementos voláteis, observadas pelos ensaios de combustíveis. Tais variáveis podem ter contribuído para a formação de porosidade e, estas micro-cavidades, por vezes, podem não ser preenchidas pelos elementos fundentes, causando zonas de fraqueza.

Assim como no ensaio de AA, a formulação que obteve os melhores desempenhos para a RM foi a F.8 nas duas primeiras faixas térmicas, composta por 66,6% de AP e 16,7% de T e R. Os resultados apontaram 3,04 MPa para a temperatura a 750 °C e 4,46 MPa para a 850 °C. O desempenho pode estar relacionado à alta proporção de AP, que atua como argila estruturante devido à presença de argilominerais como caulinita e montmorilonita. Esses componentes fornecem estrutura densa, com boa plasticidade e menos porosa para a matriz cerâmica. A associação com argilas que trazem os elementos fundentes, encontradas nos materiais T e R, podem permitir melhor equilíbrio entre propriedades estruturantes e fundentes, tornando-as capazes de suportarem maiores tensões mecânicas.

À medida que as temperaturas foram elevadas, como a 950 °C, a sinterização tornou-se mais marcante, resultando em ganho de resistência para todas as dez formulações. Nesta condição, o destaque foi a F.2 que

contém grande percentual de elementos fundentes e quantidade razoável de voláteis. Para a temperatura de 750 °C, o resultado alcançado foi de 1,00 MPa, abaixo do limite estabelecido em norma. À medida que a temperatura aumentou para 950 °C, houve aumento exponencial, chegando a 3,5 MPa. Esse comportamento pode estar atribuído a maior probabilidade de ocorrer a densificação das partículas, favorecidas pelos elementos fundentes que entram em fase líquida nesta condição térmica mais elevada.

Outra formulação que exhibe o mesmo comportamento é a F.9, que predomina a quantidade de material T, com 66,6% e quantidades razoáveis de AP e R, com 16,7%. Esta composição quando submetida a queima a 950 °C, foi a que demonstrou maior resultado, obtendo valor de 5,95 MPa, enquanto apresentou resultado intermediário sob baixa temperatura, com 2,01 MPa.

Considerando outros aspectos, como os ambientais e econômicos, que são objetivos a serem alcançados no estudo, a composição F.8 quando submetida a queima na temperatura de 750 °C pode ser considerada ideal em comparação com as demais, sobretudo pela F.4 que representa a composição padrão da cerâmica vermelha, sob a temperatura de 850 °C, mesmo que o resultado seja ligeiramente inferior. O resultado, portanto, foi de 3,04 MPa para a F.8 com temperatura de 750 °C e a F.4 a 850 °C, obteve 3,53 MPa. A queima com 100 °C a menos permite economia significativa de energia, reduzindo os custos operacionais, além de promover a sustentabilidade ao incorporar resíduos do beneficiamento do carvão.

Em relação a análise estatística, para o parâmetro de RM, na temperatura de 750 °C, o modelo selecionado foi o cúbico especial devido ao maior R^2 , indicando 0,78 e, com significância estatística ($p < 0,01$). Para as temperaturas de 850 °C e 950 °C, selecionou-se o modelo cúbico, pois o coeficiente de determinação (R^2) foram os mais elevados (0,74 e 0,78, respectivamente).

A Tabela 14 demonstra os resultados respectivo a análise de variância, enquanto a Figura 35 o gráfico de superfície resposta, que de modo geral, está demonstrando que as composições onde predominam o material R tendem a exibirem resultados com menor desempenho, assim como para o material T em baixa temperatura. A medida que há a presença de material AP, a resistência torna-se mais pronunciada. Em baixa temperatura, o gráfico indica que a região de trabalho ideal é composta por 45 à 70% de AP e 10 até 35% de T e R. As Equações 7, 8 e 9, ilustram os ajuste para os modelos selecionados relativo a resistência mecânica, para cada uma das temperaturas avaliadas.

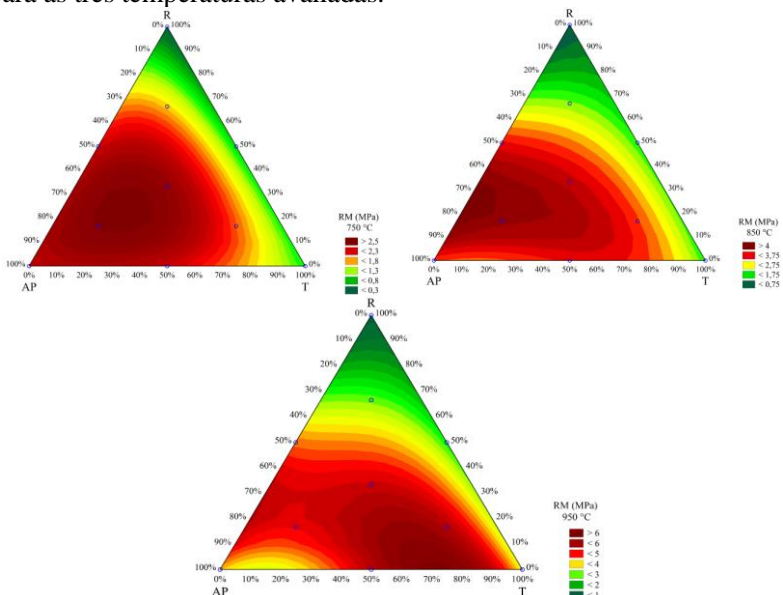
Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para resistência mecânica, para as três temperaturas avaliadas.

Temp. (°C)	Modelo	F	p	R ²
750	Linear	62,13	<0,01	0,49
	Quadrático	41,86	<0,01	0,75
	Cúbico especial	18,80	<0,01	0,78
	Cúbico	0,64	0,53	0,78
850	Linear	51,53	<0,01	0,45
	Quadrático	37,02	<0,01	0,71
	Cúbico especial	5,71	0,02	0,72
	Cúbico	4,74	0,01	0,74
950	Linear	52,67	<0,01	0,45
	Quadrático	40,77	<0,01	0,72
	Cúbico especial	6,30	0,01	0,74
	Cúbico	10,24	<0,01	0,78

No qual: F = valor-F (significância estatística); p = valor-p (confiabilidade); R² = coeficiente de determinação (ajuste). Em vermelho os modelos com confiabilidade $\geq 95\%$.

Fonte: Do autor (2024).

Figura 35 - Superfície resposta para a análise de resistência mecânica, para as três temperaturas avaliadas.



Fonte: Do autor (2024).

$$RM_{750} = 2,33 \times AP + 1,01 \times T + 0,24 \times R + 2,49 \times AP \times T + 3,92 \times AP \times R + 1,12 \times T \times R + 16,76 \times AP \times T \times R \quad (7)$$

$$RM_{850} = 3,33 \times AP + 1,78 \times T + 0,51 \times R + 4,02 \times AP \times T + 6,50 \times AP \times R + 2,61 \times T \times R + 15,39 \times AP \times T \times R - 5,16 \times AP \times T \times (AP - T) + 0,74 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (8)$$

$$RM_{950} = 4,04 \times AP + 3,63 \times T + 0,88 \times R + 6,96 \times AP \times T + 7,72 \times AP \times R + 1,30 \times T \times R + 19,55 \times AP \times T \times R - 16,57 \times AP \times T \times (AP - T) + 9,62 \times AP \times R \times (AP - R) \quad (9)$$

Onde:

RM = Resistência Mecânica (diferentes temperaturas);

AP = Argila plástica;

T = Taguá;

R = Rejeito fino.

Em temperaturas elevadas, a região ideal migra para composições onde predominam o material T, com certa quantidade de AP e R, muito provavelmente em função da presença dos elementos fundentes que desempenham o papel de agentes de vitrificação, promovendo a formação de uma matriz cerâmica mais coesa e densa, o que aumenta a resistência mecânica das peças.

6.3.4 Desenvolvimento da formulação ideal (F.11)

Baseado nos resultados tecnológicos, associado as propostas ambientais e econômicas, optou-se por atribuir a região ideal de trabalho para reproduzir os testes. Neste aspecto, foi desenvolvido a formulação F.11 constituída por 60% de argila plástica (AP), 30% de taguá (T) e 10% de rejeito fino de carvão (R).

Embora a região centroide do gráfico tenha identificado, estatisticamente, que a composição ótima seria de 55% AP, 20% T e 25% R para baixa temperatura, a decisão de preparar uma nova formulação, ajustando os valores para uma percentagem menor de R, mas ainda dentro da região ideal, foi baseada em critérios ambientais. Por tratar-se de material advindo do processo de beneficiamento do carvão, recebeu-se aplicar rejeito em excesso e este material transferir substâncias reativas ou contaminantes para o produto acabado.

Dentre as dez formulações analisadas, a F.8 foi escolhida como modelo de comparação na temperatura de 750 °C, pois apresentou o melhor desempenho tecnológico e está alinhada com os objetivos do estudo, que é reduzir a temperatura de queima. A Tabela 15 indica os resultados para a F.11 e F.8 sob as três condições térmicas.

Tabela 15 - Resultados tecnológicos para a F.11 e F.8 sob as temperaturas 750, 850 e 950 °C.

F.11			
Parâmetros	750 °C	850 °C	950 °C
UM (%)	19,73 ± 0,12		
RTL.S (%)	6,9 ± 0,36		
RTL.Q (%)	-0,14 ± 0,16	0,19 ± 0,14	1,15 ± 0,43
RTL.T (%)	6,67 ± 0,38	6,86 ± 0,41	8,18 ± 0,44
PF (%)	7,51 ± 0,63	8,9 ± 0,3	9,53 ± 0,1
AA (%)	12,53 ± 0,58	13,09 ± 0,46	11,71 ± 0,92
RM (MPa)	2,21 ± 0,52	4,17 ± 0,5	5,74 ± 0,63
F.8			
Parâmetros	750 °C	850 °C	950 °C
UM (%)	20,06 ± 0,12		
RTL.S (%)	6,46 ± 0,38		
RTL.Q (%)	0,06 ± 0,13	0,20 ± 0,27	1,21 ± 0,56
RTL.T (%)	6,40 ± 0,34	6,75 ± 0,32	7,70 ± 0,4
PF (%)	9,02 ± 0,48	9,82 ± 0,19	10,47 ± 0,14
AA (%)	13,20 ± 0,49	12,57 ± 0,44	11,30 ± 1,03
RM (MPa)	3,04 ± 0,56	4,46 ± 0,93	5,37 ± 0,85

Fonte: Do autor (2024).

Para a F.8, os valores de AA e RM em menor temperatura foram de 13,20% e 3,04 MPa, respectivamente. Já para a F.11, os valores de AA e RM foram de 12,53% e 2,21 MPa, respectivamente.

Esses resultados indicam que, embora a F.11 apresente desempenho ligeiramente inferior em termos de RM em comparação com a F.8, esta diferença não é demasiadamente excessiva. Considerando a questão econômica, a escolha da temperatura de 750 °C para a formulação F.11 pode ser justificada pela redução nos custos de energia associados ao tratamento térmico, sem comprometer sobremaneira as propriedades mecânicas e físicas do material. Portanto, a formulação F.11 a 750 °C se mostra a opção econômica adequada quando o objetivo é reduzir os custos de produção.

6.4 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

Sob o ponto de vista da validação ambiental, foram realizados ensaios de corrosividade, reatividade, toxicidade, lixiviação e solubilização. O intuito destas análises foi observar se as amostras possuem periculosidade ou a capacidade de transferir substâncias para os extratos. Esses ensaios tornam-se relevantes devido ao desenvolvimento de composições que contêm incremento de rejeito fino de carvão, o denominado material R e que, eventualmente, pode contaminar os CPs.

Para verificar se o material R possui influência negativa, foi necessário escolher uma das formulações que contém este material e compará-la com outra que não possui tal incremento. Nesse sentido, foi utilizado como parâmetro de referência a nova formulação desenvolvida, que corresponde a F.11 com 10% de R, operando a 750 °C, em conjunto com a composição considerada tradicional para a cerâmica vermelha, a F.4, sob a temperatura de 850 °C.

O critério de escolha para as investigações ambientais associou a composição considerada ideal, especialmente pela proposta de redução nos custos operacionais e pela garantia de um produto com bom desempenho, comparando-as com os padrões e produtos atualmente fabricados pelo setor cerâmico.

Os resultados de caracterização de resíduos sólidos estão apresentados nas tabelas: Tabela 16 para corrosividade, Tabela 17 para reatividade, Tabela 18 para toxicidade, Tabela 19 extratos lixiviados e Tabela 20 para extratos solubilizados.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de corrosividade para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.

Análise	Resultado F.4 - 850 °C	Resultado F.11 - 750 °C	Valor recomendado
pH em água (1:1)	6,07	5,81	2,0 a 12,4

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 17 - Resultados do ensaio de reatividade para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.

Análise	Resultado F.4 - 850 °C (mg/kg)	Resultado F.11 - 750 °C (mg/kg)	Valor recomendado
Sulfeto	0,2	0,34	500

Fonte: Do autor (2024).

Tabela 18 - Resultado do ensaio de toxicidade para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C..

Análise	Resultado FT F.4 - 850 °C	Resultado FT F.11 - 750 °C	Máximo toxicidade aguda
Ensaio de toxicidade aguda com <i>Daphnia magna</i>	2	1	8 (12,5%)

Fonte: Do autor (2024).

Para ambas as amostras, os ensaios de corrosividade, reatividade e toxicidade apresentaram resultados: não corrosivo, não reativo e não tóxico.

O ensaio de corrosividade apontou para a F.4 - 850 °C valor de pH de 6,07, enquanto para a F.11 - 750 °C, resultado sensivelmente inferior, com 5,81. As amostras estão enquadradas no intervalo recomendado pela norma técnica, (2,0 até 12,4).

Tabela 19 - Resultados do ensaio de lixiviação para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.

Análise	Resultado F.4 - 850 °C (mg/L)	Resultado F.11 - 750 °C (mg/L)	Valor máximo permitido
Arsênio	0,003	0,009	1,0
Bário	0,113	0,091	70,0
Cádmio	0,001	<0,001	0,5
Chumbo	0,007	0,009	1,0
Cromo total	0,005	0,004	5,0
Fluoreto total	0,06	0,12	150,0
Prata	0,003	0,004	0,1
Selênio	0,014	0,025	5,0
Mercúrio	<0,0002	<0,0002	0,1

Fonte: Do autor (2024).

O ensaio de reatividade apontou para a F.4 - 850 °C valor de concentração de sulfeto de 0,2 mg/kg, enquanto para a F.11 - 750 °C, resultado sensivelmente superior, com 0,34 mg/kg. As amostras estão abaixo do valor máximo recomendado pela norma técnica, (500 mg/kg).

Quanto ao ensaio de toxicidade que envolve o organismo *Daphnia magna*, indicou fator de toxicidade 2 para a amostra F.4 - 850 °C e,

valor de 1 para F.11 - 750 °C. Embora contenha 10% de incremento de R na amostra F.11, o fator de toxicidade apresentou resultado inferior, demonstrando maior segurança na aplicação para este quesito.

Os resultados dos ensaios lixiviação apresentaram conformidade com os requisitos legais para ambas as amostras, com valores enquadrados nos limites máximos permitidos, de acordo com o Anexo F da norma técnica.

Diante das análises, as amostras não apresentaram periculosidade, sendo classificados como resíduos não perigoso - classe II, considerando ser fatores importante ao estudo, justificando o potencial uso da composição F.11 na indústria.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de solubilização para os corpos-de-prova de F.4 a 850 °C e F.11 a 750 °C.

Análise	Resultado F.4 - 850 °C (mg/L)	Resultado F.11 - 750 °C (mg/L)	Valor máximo permitido
Alumínio	0,007	0,036	0,200
Arsênio	0,009	0,003	0,010
Bário	0,054	0,032	0,700
Cádmio	0,001	0,001	0,005
Chumbo	0,004	0,007	0,010
Cloretos	<0,010	<0,010	250,00
Cobre	0,003	0,003	2,0
Cromo total	<0,010	<0,010	0,050
Ferro	0,008	0,016	0,300
Fluoreto	0,37	0,14	1,5
Manganês	0,009	0,113	0,100
Nitrato	1,355	1,565	10,0
Prata	0,002	0,003	0,050
Selênio	0,007	0,022	0,010
Sódio	4,603	2,645	200,0

Em vermelho, indica os elementos acima do valor máximo permitido.

Fonte: Do autor (2024).

Relativo as análises realizadas no extrato solubilizado para a formulação F.4 - 850 °C, não apresentaram concentrações acima do máximo permitido do Anexo G da norma técnica, caracterizando o material como inerte - classe II B. Ao contrário, para a amostra F.11 - 750 °C, os elementos manganês e selênio apresentaram concentrações acima

do máximo permitido (grifados em vermelho na Tabela 20). Os valores foram de 0,113 mg/l para manganês e 0,022 mg/l para selênio, enquanto a norma determina valores abaixo de 0,100 mg/l e 0,010 mg/l, respectivamente. Nesta conjectura, o material ficou enquadrado como não inerte - classe II A.

Apesar da formulação F.11 - 750 °C solubilizar manganês e selênio em concentrações ligeiramente acima do permitido, ainda é considerado como não perigoso, ao comparar estes resultados junto a NBR 10004. Isso indica que, ambientalmente, a formulação F.11 pode ser alternativa usual e sustentável na aplicação industrial, pois não causaria impactos ambientais significativos.

6.5 CARACTERIZAÇÃO ECONÔMICA

Os efeitos econômicos levantados, considerando o incremento de material R, em conjunto com argilas para fabricação de cerâmica vermelha, podem ser vantajosos tanto para o setor cerâmico quanto para o setor carbonífero.

Considerando os aspectos relacionados à cerâmica, os benefícios podem estar atrelados à economia na aquisição de matéria-prima e, também, no processo de produção, especialmente na etapa de tratamento térmico. A utilização do material R pode reduzir o consumo de combustíveis energéticos, pois suas propriedades podem atenuar a performance durante a etapa de queima.

No setor carbonífero, a economia pode estar vinculada ao manejo deste material. Após a etapa de beneficiamento, o rejeito é carregado, transportado e disposto em aterro industrial. Na hipótese de utilização na cerâmica, esses custos seriam eliminados do processo.

Antes de iniciar os cálculos de viabilidade econômica, é essencial definir algumas variáveis baseadas em hipóteses reais. Para estas avaliações, semelhante as interpretações ambientais, foram estabelecidas duas formulações para comparar os resultados: uma que incluísse a adição de material R e outra isenta desse material, semelhante à massa padrão da cerâmica vermelha. As composições escolhidas foram, portanto, a F.4 composta por 50% de AP e T, e a F.11, desenvolvida como massa ideal para aplicação industrial, com base nos resultados tecnológicos e ambientais, contendo 60% de AP, 30% de T e 10% de R.

Também foi necessário definir a média de produção das empresas do setor de cerâmica vermelha, que é de aproximadamente 500.000 tijolos/empresa. Cada tijolo, com dimensões de 9x14x19 cm, possui massa úmida média de 2,1 kg. Isso implica que, para atender à produção

de uma única empresa, são necessárias 1.050 toneladas de argila. Outro aspecto a ser considerado é que o material R será fornecido sem custo para a cerâmica vermelha, portanto, será por meio de provisão gratuita.

Quanto ao volume de argila comercializado pela COOPEMI, em média mensal, a produção varia entorno de 41.000,00 toneladas. Na prática, esta quantidade de argila compõe a extração e comercialização global da COOPEMI, em diversas jazidas, que possuem argilas com diferentes características. No entanto, para o estudo, foi adotado um modelo simplificado, considerando a combinação de duas argilas específicas, a AP e T. Neste aspecto, optou-se por diluir toda a produção da COOPEMI, considerando que as extrações e fornecimentos ocorressem somente nestas duas jazidas.

A média mensal da geração de rejeito fino (R), proveniente do processo de descarte do beneficiamento de carvão da Carbonífera Rio Deserto, na mina 101, corresponde 10.630,00 toneladas. Para maior clareza, as informações relativas à produção de argila e rejeito fino estão resumidas no Quadro 3.

Quadro 3 - Volume de material produzido pelo setor da cerâmica vermelha e setor carbonífero.

Argilas (COOPEMI)	41.000,00 toneladas/mês
Rejeito fino (Rio Deserto)	10.630,00 toneladas/mês

Fonte: COOPEMI.

6.5.1 Aquisição dos materiais

Atualmente as empresas cerâmicas obtêm matéria-prima de três maneiras. A primeira, que abrange a maioria, é a aquisição direta da cooperativa de mineração - COOPEMI. A segunda é a compra através de mineradoras diversas. Por fim, algumas empresas cerâmicas possuem jazidas próprias e extraem argilas diretamente de suas áreas. Em virtude de ser mais representativo ao setor, para efeito de cálculo, será considerada a condição de aquisição pela cooperativa.

As informações relacionadas aos valores unitários de cada matéria-prima, tanto para o material AP quanto para o T, foram fornecidas pela COOPEMI. Já os custos de transporte foram obtidos a partir de informações dos próprios ceramistas, através do SINDICER, que consideram as variações de frete conforme a distância percorrida. Os valores de venda das argilas estão apresentados no Quadro 4, assim como os custos médios com transporte, na Tabela 21.

Quadro 4 - Variáveis com aquisição das argilas plástica (AP) e taguá (T).

Custo AP (R\$/t)	6,40
Custo T (R\$/t)	8,90

Fonte: COOPEMI (2024).

Tabela 21 - Variáveis com transporte por km rodado.

R\$/(0-10km)	R\$/(0-20km)	R\$/(0-30km)	R\$/(0-40km)
140,00	160,00	180,00	200,00

Fonte: SINDICER (2024).

Utilizando os parâmetros produtivos sugeridos para uma empresa, baseado na média do setor e considerando as variáveis na aquisição de argila pela cooperativa, foi calculado os custos de aquisição dos materiais, comparando a F.4 com a F.11. Os valores estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Custos para a aquisição dos materiais com base nas formulações F.4 e F.11.

Necessidade de argila (empresa/mês)		1.050 t/mês		
Formulação		Massa necessária (t/mês)	Custo (R\$/t)	Valor (R\$)
F.4	50% AP	525,00	6,40	3.360,00
	50% T	525,00	8,90	4.672,50
	Total			8.032,50
F.11	60% AP	630,00	6,40	4.032,00
	30% T	315,00	8,90	2.803,50
	10% R	105,00	0,00	0,00
	Total			6.835,50

Fonte: Do autor (2024).

Considerando as variáveis sugeridas, bem como a produção de 500.000 tijolos/mês para uma única empresa, os custos com a aquisição de argila para obedecer a F.4 é de R\$ 8.032,50, enquanto para a formulação desenvolvida, a F.11 é de R\$ 6.835,50.

Para os custos relacionados ao transporte, é necessário considerar o tipo de caminhão utilizado e a capacidade de carga. Os caminhões frequentemente utilizados no setor de cerâmica vermelha é o basculante, com capacidade média de 22 t/carga.

Neste sentido, para atender a necessidade de produção, será necessário para a F.4, 24 cargas para AP e 24 para T. Já para a F.11, as

cargas necessárias são: 29 para AP, 14 para T e 5 para R. Ainda, para os custos com relação ao transporte, com base na distância percorrida, foi atribuído para AP e T o custo de R\$ 160,00 por carga, visto que a viagem de ida e volta, corresponde à média de 20 km. Para o R, o valor de atribuído será de R\$ 200,00, pois a distância média é de 35 km. Os valores relacionados aos custos com transporte estão demonstrado na Tabela 23.

Tabela 23 - Custo com transporte de material com base nas formulações F.4 e F.11.

Capacidade de carga (1 caminhão)		22 toneladas		
	Massa necessária (t/mês)	Carga necessária (viagem/mês)	Custo (R\$/viagem)	Valor (R\$)
F.4	525,00 AP	24	160,00	3.840,00
	525,00 T	24	160,00	3.840,00
	Total			7.680,00
F.11	630,00 AP	29	160,00	4.640,00
	315,00 T	14	160,00	2.240,00
	105,00 R	5	200,00	1.000,00
	Total			7.880,00

Fonte: Do autor (2024).

Considerando as variáveis sugeridas para uma empresa, os custos relacionados ao transporte para produzir tijolos com a F.4 foi calculado em R\$ 7.680,00, enquanto para a F.11 houve sutil aumento, quase que nulo, passando para R\$ 7.880,00.

Compilando os valores relacionados aos custos para a obtenção dos materiais assim como o de transporte, a F.11, com incremento de rejeito, oferece economia razoável em comparação com a F.4. Os valores estão expressos na Tabela 24.

Tabela 24 - Custo global para produzir a F.4 e F.11.

Formulação	Custo aquisição (R\$/mês)	Custo transporte (R\$/mês)	Custo total (R\$/mês)
F.4	8.032,50	7.680,00	15.712,50
F.11	6.835,50	7.880,00	14.715,50
Economia			997,00

Fonte: Do autor (2024).

Na hipótese de uma empresa operar no seu sistema fabril com a inclusão do material R, considerando os custos com a obtenção dos materiais, gera economia de R\$ 997,00 ao mês. Este valor torna-se ainda mais atrativo ao relacionar os componentes ambientais, pois utiliza os recursos de modo sustentável através da economia circular, promovendo a valorização de rejeitos e poupando o uso de matéria-prima, o que torna a extração de argila racional.

6.5.2 Processo Produtivo

As empresas relacionadas a cerâmica vermelha de Morro da Fumaça utilizam vários tipos de fornos para promover a queima de seus produtos. Basicamente os fornos podem ser atribuídos como do tipo contínuo ou do tipo intermitente. As variáveis que interferem a escolha de utilização destes fornos estão correlacionadas, basicamente, a capacidade produtiva, os custos com investimento, eficiência energética e padrão de qualidade dos produtos. Os combustíveis energéticos utilizados são materiais lenhosos, principalmente constituídos por lenha, cepilho ou pó de serra.

Para efeito de comparação entre a composição F.4 submetida a queima de 850 °C e a F.11 a 750 °C, foram adotadas as variáveis de uma empresa com produção média já sugerida, da qual utiliza forno túnel, um tipo de forno intermitente, e como combustível, a queima de lenha. Os parâmetros técnicos apresentados foram obtidos a partir de conhecimento prático do setor, com base em experiências diárias, fornecida pelo SINDICER.

Tabela 25 - Viabilidade econômica para a produção da composição padrão, F.4 na temperatura de 850 °C, junto com a formulação ideal, a F.11 na temperatura de 750 °C.

Formulação	Produção (mês)	Necessidade de lenha (m ³ /milheiro)	Custo lenha (R\$/ m ³)	Custo (produção mensal)
F.4 (850 °C)	500.000	1	70,00	35.000,00
F.11 (750 °C)	500.000	0,8	70,00	28.000,0
Economia				7.000,00

Fonte: Do autor (2024).

Os custos unitários com aquisição de lenha é de 70,00 R\$/m³. Para alcançar a temperatura de 850 °C, é necessário o abastecimento de 1 m³

para produzir 1.000 tijolos. Conforme experiências adquiridas, para produzir a mesma quantidade de peças a uma temperatura de 750 °C, há a necessidade de 0,8 m³/milheiro, resultando na redução de 20%. Os valores relacionados à viabilidade econômica estão apresentados na Tabela 25.

Os resultados demonstraram que a formulação ideal desenvolvida, contendo 10% de rejeito fino de carvão, gera economia produtiva na etapa de queima de R\$ 7.000,00. Os ensaios químicos apontaram que existem material combustível nos rejeitos, e os ensaios tecnológicos comprovaram que, mesmo havendo redução de 100 °C, obteve-se um produto enquadrado junto as normas técnicas.

6.5.3 Relação econômica entre F.4 e F.11

A composição F.11, oferece vantagens econômica em comparação com a composição padrão F.4. A seguir está demonstrado a Tabela 26 que compila os cálculos de viabilidade econômica do setor da cerâmica vermelha.

Tabela 26 - Resultado econômico proporcionado no setor da cerâmica vermelha, com a utilização da composição F.11.

Atividade	Custo total (R\$/mês)
Obtenção de material	997,00
Produção (queima)	7.000,00
Economia Total	7. 997,00

Fonte: Do autor (2024).

Ao permitir a queima a 750 °C, em contraste com os 850 °C habitualmente praticado pelo setor, a F.11 gera uma economia de R\$ 7.000,00 na produção e reduz os custos com a obtenção dos materiais em R\$ 794,50, totalizando uma redução mensal de R\$ 7. 997,00.

6.5.4 Manejo de Rejeito

Tradicionalmente, os custos associados ao descarte de rejeitos representam uma parcela significativa para as empresas, além de todos os problemas e desafios ambientais associados. Para a Carbonífera Rio Deserto, na mina 101, o custo com o manejo de rejeito fino de carvão (R) é de 16,63 R\$/tonelada, da qual considera as etapas de carregamento, transporte e disposição. Ao incluir os tributos, este valor aumenta para

20,82 R\$/tonelada. A Tabela 27 demonstra as despesas com o manejo do material R.

Tabela 27 - Despesas com o manejo de rejeito fino de carvão de forma legal.

Material	Custo unitário (R\$/tonelada)	Volume gerado (tonelada/mês)	Custo total (R\$/mês)
R	20,82	10.630,00	221.316,60

Fonte: Carbonífera Rio Deserto (2024).

Considerando a produção mensal, as despesas da operação relacionadas ao manejo do rejeito fino é de 221.316,60 R\$/mês. Na hipótese de incorporação deste material na cerâmica vermelha, a empresa suprimiria estes custos, resultando em uma evidente economia. Além disso, ao adotar práticas de economia circular, a empresa promoveria a valorização de rejeitos, utilizando-os de forma sustentável e minimizando impactos ambientais. Essa prática não só ampliaria a vida útil do depósito de rejeitos da empresa, da qual origina em outras vantagens econômicas, mas também contribuiria para a sustentabilidade ambiental.

7 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que é possível valorizar a fração residual fina do rejeito de carvão, o denominado material R, junto com duas argilas para a produção de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça/SC, a argila plástica (AP) e o taguá (T). A incorporação deste material tem potencial para ser uma fonte mineral alternativa muito promissora, e as vantagens estendem-se desde os aspectos relacionados ao desempenho do produto, até indicadores ambientais e econômicos, obedecendo a sistemática CPQvA.

O resíduo apresenta características que são sinérgicas a aplicação em cerâmica vermelha, como a presença de argilominerais – caulinita e illita, e teores dos óxidos químicos, semelhantes aos materiais argilosos. Alguns fatores como elevado percentual de perda ao fogo, destacado pela presença de materiais carbonosos e enxofre, assim como outros minerais, podem ser fatores negativos para a aplicação industrial, entretanto, por meio da dosagem equilibrada, pode haver a estabilização dos contaminantes.

O desenvolvimento de formulações, variando os percentuais entre os três materiais, sob o método de delineamento de misturas, o qual interpola os resultados e permite identificar, de forma estatística, as regiões ótimas de trabalho, gerou resultados que indicam as proporções ideais para cada componente. Essas formulações ainda foram submetidas a três condições térmicas (750, 850 e 950 °C), ampliando o escopo comparativo.

De modo geral, isso é, para a três temperaturas, identificou-se que o processo de cerâmica vermelha admite até certo limite de adição de material R, da qual melhora a sua qualidade, refletindo em propriedades como absorção de água (AA), resistência mecânica (RM) e até mesmo o aspecto visual. No entanto, ao ultrapassar este limite, o desempenho das amostras começaram a decair, havendo a necessidade de equilíbrio entre os percentuais para cada material.

Em números, ao averiguar os gráficos de superfície resposta, por exemplo em baixa temperatura, é possível identificar que o material R apresenta bom desempenho quando há incremento na ordem de 10 até 35%, na mesma proporção que o material T e com o predomínio de material AP, variando entre 45 até 70%. Para temperaturas intermediárias, que representa a aplicação industrial, as proporções migram ainda mais para um maior predomínio de AP, enquanto em alta temperatura há prevalência de T, devido principalmente à quantidade de elementos fundentes presentes.

Algumas propriedades caracterizadas no material R podem ter impactado os resultados. A presença de carbono em excesso pode agir como combustível interno no forno, liberando calor adicional e auxiliando na formação de fase vítrea das peças. A presença de elementos fundentes também pode ter contribuído para a formação de fase líquida e sinterização. Ao contrário, a qualidade das peças pode ter sido comprometida devido à formação de maior porosidade, em virtude da maior presença de resíduo bruto e pelo excesso de gás liberado.

A medida que o incremento de material R superou 35%, houve queda na qualidade das amostras. Ao observar os resultados de AA, que é um indicador de qualidade e demonstra alta porosidade, à medida que evolui o incremento de material R, os valores de AA também se acentuaram. Formulações sem adição de rejeito, a exemplo da F.4, apresentou AA com 10,87% em temperatura mais elevada e 12,64% em menor temperatura. Para a F.7, com acréscimo de 33,3% de material R, a variação foi de 12,36% até 13,44%. Contudo, ao adicionar 66,6% de R, representada pela F.10, houve aumento significativa da absorção de água, com resultados de 16,86% até 18,23%. Com relação a amostra com 100% de R, representada pela F.3, em todas as temperaturas demonstraram resultado de AA < 25%.

Ao analisar o comportamento respectivo RM, os valores são compatíveis quando confrontados com a AA. A medida que há maior volume de poros nas peças, há também maior tendência à fragilidade. Os resultados relacionados a formulação padrão foi RM de 2,23 MPa para menor temperatura e 5,48 MPa para a maior temperatura. Com relação a F.7, os resultados apresentaram valores semelhantes, com 2,46 MPa até 4,95 MPa. Ao verificar amostras com razoável incremento de material R, isso é, com 16,6% para a F.8, o desempenho das peças apresentaram resultados com maior qualidade, obtendo, em menor temperatura 3,04 MPa e 5,37 MPa para a maior condição térmica.

Os resultados indicam que o material R, na proporção adequada, melhora as características tecnológicas do produto, especialmente para AA e RM. Além disso, os desempenhos foram melhores com o aumento da temperatura, mostrando que reações químicas mais eficientes ocorrem em temperaturas elevadas, como observado na dilatométrica. Esse efeito é potencializado pela presença de elementos fundentes, como K_2O e CaO , que facilitam a fusão, e pelo preenchimento dos espaços formados pelos gases liberados ou pelos espaçamentos entre partículas.

Entretanto, a propostas do estudo não é essencialmente melhorar a qualidade tecnológica do produto, mas sim valorizar o rejeito fino de carvão, com objetivo de obter qualidade similar ao que é praticado

usualmente na indústria, sob uma condição de queima que envolva menor temperatura. Esta pesquisa, contudo, oferece resultados valiosos, identificando que é possível obter vantagens econômicas sem desequilíbrio mecânico dos produtos.

Ao comparar o resultado de RM da F.4 submetida a queima de 850 °C, junto com a F.8, a 750 °C, ou seja, com temperatura de 100 °C menor, os resultados foram praticamente os mesmos. Para a F.4 a 850 °C o valor de RM foi de 3,53 MPa, enquanto para F.8 a 750 °C, obteve 3,04 MPa.

Baseado nestes critérios, nas interpretações tecnológicas e suas análises estatísticas, foi desenvolvido nova composição, considerada a ideal, com adição menor de material R, representando 10%. Esta reprodução objetivou avançar com as pesquisas considerando aspectos ambientais e econômicos.

Embora o material R seja um rejeito de processo e, teoricamente, um contaminante, sua inclusão junto com argilas para cerâmica não apresentou periculosidade. As amostras foram classificadas como resíduos não perigosos - classe II, o que é um fator importante para o estudo e justifica o potencial uso da composição F.11 na indústria. Quanto ao extrato lixiviado, este sim apresentou concentração ligeiramente acima do permitindo, classificando-o como inerte - classe II B, mas ainda é considerado como não perigoso conforme a NBR 10004, podendo ser uma alternativa ambientalmente sustentável na aplicação industrial.

Do ponto de vista econômico, a introdução de 10% de material R permite alcançar as propriedades tecnológicas desejadas em temperaturas mais baixas, reduzindo os custos de queima em comparação com a formulação padrão. Para uma produção de 500.000 tijolos por mês, isso representaria uma economia de 7.000,00 R\$ quando queimados a 750 °C. Além disso, a viabilidade econômica se estende à obtenção dos materiais, gerando economia mensal de R\$ 997,00. No setor carbonífero, destinar os rejeitos, considerando exclusivamente os finos de carvão, para a cerâmica vermelha no formato de economia circular, evita despesas mensais de R\$ 221.316,60.

Por fim, foi comprovado que a valorização do material R atende aos requisitos essenciais da sistemática CPQvA, viabilizando sua aplicação industrial subsequente. Materiais atualmente descartados como contaminantes podem ser incorporados de forma eficiente por meio da economia circular, em outras atividades produtivas, gerando benefícios significativos ao produto final, como a melhoria do desempenho e a redução dos custos de produção.

REFERÊNCIAS

- ABDELMALEK, Baghdad *et al.* Mineralogical characterization of Neogene clay areas from the Jijel basin for ceramic purposes (NE Algeria -Africa). **Applied Clay Science**, v. 136, p. 176–183, 2017.
- ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT. **NBR 15270-1: Componentes Cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.
- ABNT. **NBR 15270-2: Componentes Cerâmicos Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.
- ABNT. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- ABNT. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- 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 10005: Procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT. **NBR 10006: Procedimento para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ACORDI, Juliana. **Desenvolvimento e Caracterização de Produtos Cimentícios a Partir de Resíduos de Madeira: Cinza Volantes e Cinza Grelha**. 2017. 145 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, 2017.
- ALVAREZ, F.B. **Cerâmicas: Secado**. Oviedo, España: 2013.
- 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.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Varderley Moacyr. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. **Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica**, São Paulo, p. 13, 2002.

ASSIS, Adriana Helfenberger Coletto. **Análise ambiental e gestão de resíduos**. 1ª. ed. Curitiba, PR: Editora Intersaberes, 2020.

ASTM. **D5373-21: Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke**. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2021.

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

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

BARBOSA, Dafne Lanfermann. **Aplicação do Rejeito do Beneficiamento do Carvão de Moatize (Moçambique) como Sólido Sorvente na Remoção de Cromo (VI)**. 2017. 91 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2017.

BENEDET, Grasielle Amoriso *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, 2024.

BENEDET, Grasielle Amoriso *et al.* Economic analysis of the use of rice husk ash in the production of clay ceramics. **Cerâmica (São Paulo)**, v. 69, n. 392, p. 293–299, 2023.

BENEDET, Grasielle Amoriso *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, 2023.

BORDIA, Rajendra K.; KANG, Suk-Joong L.; OLEVSKY, Eugene A. Current understanding and future research directions at the onset of the next century of sintering science and technology. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 6, p. 2314–2352, 2017.

BRASIL. **Lei 12.305**. 2010. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 11 dez. 2023.

BURMISTER, Donald M. Principles and techniques of soil identification. **Soils**, p. 402–433, 1949.

CALLISTER JR, Willian D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia dos Materiais, Uma Introdução**. 9ª. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

CAMPOS, Mari Lucia *et al.* Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral Soil impacts caused by coal mining and coal mine waste. **Revista de Ciências Agroveterinárias. Lages**, n. 9, p. 198–205, 2010.

CAPES, C. E. **Particle size enlargement**. Ottawa, Canadá: Elsevier, 1980.

CASAGRANDE, Graziela Serafim *et al.* Análise da viabilidade técnica e ambiental da adição de resíduos provenientes de termoeletrica e beneficiamento de carvão em massa de cerâmica vermelha. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 3, p. e20230066, 2023.

CASAGRANDE, Graziela Serafim. **Estudo da incorporação de resíduos provenientes de termoeletrica e beneficiamento do carvão mineral em massa para produção de adoquim cerâmico**. 2017. 89 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, 2017.

CASTELLANO, Javier *et al.* On the use of Afyon clay in Ukrainian clay-free compositions for porcelain tile manufacture. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 63, n. 5, p. 356–367, 2024.

COBO-CEACERO, Carlos Javier *et al.* Use of marble sludge waste in the manufacture of eco-friendly materials: applying the principles of the Circular Economy. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 35, p. 35399–35410, 2019.

COMIN, André Biava *et al.* Characterization and processing of kaolin from southern Brazil for potential strategic application in the porcelain stoneware tiles manufacturing. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 148, p. 105157, 2024.

CROZETTA, Jacquelinei Ribeiro *et al.* Influência da Granulometria na Plasticidade e Retração de Secagem das Argilas. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 1, p. 21–29, 2016.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. 1ª. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2017.

DA LUZ, Adão Benvindo; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios**. 6ª Ediçãoed. Rio de Janeiro, RJ: CETEM/MCTIC, 2018.

DA SILVA, Douglas Borges. **Estudo Da Utilização Do Resíduo Proveniente Do Beneficiamento Do Carvão Mineral Como Matéria-Prima Alternativa Na Fabricação De Blocos De Vedação**. 2013. 90 f. - Centro Universitário Barriga Verde - UNIBAVE, Cocal do Sul, SC, 2013.

DA SILVA, Carlos Henrique Gomes. **Por uma Estratégia de Efetividade ao Direito Fundamental ao Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado à Luz do Desenvolvimento Sustentável e da Agenda ESG: Da Definição à Operacionalização do Compliance Ambiental**. 2021. 178 f. - Universidade Federal de Alagoas, Maceio, Al, 2021.

DE MELO, Diógenes Aires. **Aterros de resíduos: o uso de ferramentas de avaliação como apoio decisório para a reabilitação ambiental – teoria e prática**. 1ª. ed. Curitiba, PR: Editora Appris, 2020.

DE OLIVEIRA GUIMARÃES, Carlos Alberto *et al.* Heating rate effect during sintering on the technological properties of Brazilian red ceramics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 11–12, p. 8125–8135, 2022.

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**. São Carlos, SP: 2012.

DONDI, Michele. Caracterização Tecnológica dos Materiais Argilosos: Métodos Experimentais e Interpretação dos Dados. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, p. 36–40, 2006.

EKINS, P *et al.* **The Circular Economy: What, Why, How and Where**. Paris: OECD, 2019.

ELIAS, Rodrigo *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, 2024.

ENGIE. **ENGIE conclui venda do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda para a FRAM capital.**, 2021. Disponível em: <https://www.engie.com.br/imprensa/press-release/engie-conclui-venda-do-complexo-termeletrico-jorge-lacerda-para-a-fram-capital/>. Acesso em: 29 nov. 2023.

FALLAVENA, Vera L. V. *et al.* Caracterização detalhada de material de referência certificado de carvão brasileiro. **Química Nova**, v. 36, n. 6, p. 859–864, 2013.

FARACO, Morgana Nuernberg Sartor. **Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina**. 2022. 136 f. - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2022.

FUERTES, V. *et al.* Engineered feldspar-based ceramics: A review of their potential in ceramic industry. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 42, n. 2, p. 307–326, 2022.

GEREMIAS, Márcio Luiz. **Características das Argilas da Bacia do Paraná, no Sul de Santa Catarina, para uso na fabricação de pisos cerâmicos**. 2003. 90 f. - EPUSP, São Paulo, SP, 2003.

GOMES, Ana Cláudia Franca. **Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração**. 2017. 84 f. - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

HÄNDLE, Frank. **The Art of Ceramic Extrusion**. Cham: Springer International Publishing, 2019.

HUBERT, F. *et al.* Unraveling complex <2 m clay mineralogy from soils using X-ray diffraction profile modeling on particle-size sub-fractions: Implications for soil pedogenesis and reactivity. **American Mineralogist**, v. 97, n. 2–3, p. 384–398, 2012.

HÚLAN, Tomáš *et al.* The Influence of Fly Ash on Mechanical Properties of Clay-Based Ceramics. **Minerals**, v. 10, n. 10, p. 930, 2020.

HUMMES, Rodrigo André. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral em equipamentos de grandes dimensões**. 2007. 187 f. - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2007.

INOCENTE, Jordana Mariot *et al.* Estudo de recuperação de resíduos vítreos na formulação de cerâmica vermelha. **Cerâmica industrial**, v. 23, n. 3, p. 34–39, 2018.

KŁOSEK-WAWRZYN, Ewelina; MAŁOLEPSZY, Jan; MURZYN, Paweł. Sintering Behavior of Kaolin with Calcite. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 572–582, 2013.

MAIA DE SOUZA, Danielle *et al.* Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 70–82, 2016.

MARSIGLI, Marco; DONDI, Michele. Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura. **L'industria dei**

Laterizi, v. 46, p. 214–222, 1997.

MENEZES, R. R. *et al.* Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, p. 37–49, 2006.

MILIOLI, Geraldo; DOS SANTOS, Robson; CITADINI-ZANETTE, Vanilde. **Mineração de Carvão, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável no Sul de Santa Catarina - Uma Abordagem Interdisciplinar**. Curitiba, PR: Juruá Editora, 2009.

MORENO-MAROTO, José Manuel; ALONSO-AZCÁRATE, Jacinto. 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, 2018.

NANDI, Vitor de Souza *et al.* Estudo do Comportamento Energético em Forno Túnel de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5, p. 30–39, 2015.

NANDI, V.S. *et al.* Fast-drying of red ceramics: A new evaluating approach based on the combined use of optical dilatometry and thermogravimetric analysis. **Ceramics International**, v. 50, n. 17, p. 31198–31210, 2024.

NANDI, Vitor de Souza *et al.* Plastic behaviour of clay materials for the manufacture of fast-drying red ceramics. **Clay Minerals**, v. 58, n. 1, p. 26–37, 2023.

OECD. **OECD Annual Report 2001**. Paris, France: OECD, 2001. (OECD Annual Report).

OLIVEIRA, Amando A. **Tecnologia em Cerâmica**. 1ª. ed. Criciúma/SC: Lara, 2011.

ONU. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 11 dez. 2023.

PACTWA, Katarzyna; WOŹNIAK, Justyna; DUDEK, Michał. Sustainable Social and Environmental Evaluation of Post-Industrial Facilities in a Closed Loop Perspective in Coal-Mining Areas in Poland. **Sustainability**, Wroclaw, Poland, v. 13, n. 1, p. 167, 2020.

PAGNAN, Sérgio *et al.* Fornecimento sustentável de argilas para APL de cerâmica vermelha. In: SILVA, Cristina Ferreira Correia *et al.* (org.). **Prêmio Melhores Práticas em APL de Base Mineral: Coletânea 2010-2022**. 1ª. ed. Brasília, DF: IFPI/ CT RedeAPLmineral, 2023. p. 82–91.

PHONPHUAK, Nonthaphong; KANYAKAM, Siwadol; CHINDAPRASIRT, Prinya. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3057–3062, 2016.

QUINTANA, Núria Rosa Gagliardi; BUENO, Osmar de Carvalho; DE MELO, Wanderley José. Custo de Transporte do Lodo de Esgoto para Viabilidade no Uso Agrícola. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 27, n. 3, p. 90–96, 2012.

RAUPP-PEREIRA, Fabiano. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. 256 f. - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2006.

REBELO, Wagner Benedet. **Estudo para a Incorporação de Rejeito Fino de Carvão Mineral na Massa da Cerâmica Vermelha**. 2022. 28 f. - Centro Universitário UniSATC, Criciúma, SC, 2022.

REBELO, Wagner Benedet *et al.* Valorization of the Residual Fraction of Coal Tailings: A Mineral Circularity Strategy for the Clay Ceramic Industry in the Carboniferous Region of Santa Catarina, Southern Brazil. **Materials**, v. 17, n. 9, p. 2131, 2024.

REBELO, Wagner Benedet; ZACCARON, Alexandre. 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, p. 1–9, 2020.

RIBEIRO, Manuel Joaquim Peixoto Marques. **Valorização de resíduos industriais e formulação de novas composições cerâmicas: reactividade e comportamento térmico e eléctrico**. 2004. 223 f. - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2004.

SAVIATO, Emily. **Aproveitamento de Argilas de Áreas de Lavra Ambiciosa na Massa de Cerâmica Vermelha no Sul de Santa Catarina**. 2022. 77 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, 2022.

SAVIATTO, Emily *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, 2023.

SCHACKOW, A.; CORREIA, S. L.; EFFTING, C. Influence of microstructural and morphological properties of raw natural clays on the reactivity of clay brick wastes in a cementitious blend matrix. **Cerâmica**, v. 66, n. 378, p. 154–163, 2020.

- SERRA, M. F. *et al.* Firing transformations of an argentinean calcareous commercial clay. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 254–261, 2013.
- SILVA, K. R. *et al.* A review on the production of porous ceramics using organic and inorganic industrial waste. **Cerâmica**, v. 68, n. 387, p. 270–284, 2022.
- SILVA, Amanda Luzia da. **Caracterização Mineralógica por Difração de Raio X e Determinação de Terras Raras por ICP-MS de Rochas da Região Sul da Bahia**. 2013. 114 f. - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- SILVA, J.P.S. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista espaço da Sophia**, v. 8, p. 1–13, 2007.
- SINGH, Nakshatra Bahadur. Clays and Clay Minerals in the Construction Industry. **Minerals**, v. 12, n. 3, p. 301, 2022.
- SMANIOTTO, André Luiz Amorim. **Aplicação de sedimentadores de fluxo vertical na separação sólido-líquido de água de processo em usinas de beneficiamento de carvão mineral na região sul de Santa Catarina**. 2017. 100 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- SOARES, R. A. L. *et al.* Efeito da Adição de Calcita Oriunda de Jazida de Argila em Massa de Cerâmica de Revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 3, p. 27–32, 2014.
- SOARES, Paulo Sergio Moreira; SANTOS, Maria Dionísia Costa dos; POSSA, Mario Valente. **Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro, RJ: CETEM/MCT, 2008.
- SOKOLÁŘ, Radomír *et al.* Mechanical properties of ceramic bodies based on calcite waste. **Ceramics International**, v. 38, n. 8, p. 6607–6612, 2012.
- SOUSA, Jonathan Maciel de. **Impactos da mineração no estado do Pará - Brasil: Panorama histórico e perspectivas futuras**. 2022. 57 f. - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, Araxá, MG, 2022.
- SOUZA, Danielle Maia De *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 165–173, 2015.
- TIFFO, Emmanuel *et al.* Red ceramics produced from mixtures of kaolinite clay and waste glass. **Brazilian Journal of Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 4, 2015.

TRAORÉ, K. *et al.* Influence of calcite on the microstructure and mechanical properties of pottery ceramics obtained from a kaolinite-rich clay from Burkina Faso. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 2–3, p. 1677–1681,

VASIĆ, Milica Vidak *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, 2021.

VASIĆ, M.V. *et al.* The study of thermal behavior of montmorillonite and hydromica brick clays in predicting tunnel kiln firing curve. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 872–879, 2017.

VELASCO, Pedro M. *et al.* Development of sustainable fired clay bricks by adding kindling from vine shoot: Study of thermal and mechanical properties. **Applied Clay Science**, v. 107, p. 156–164, 2015.

VIEIRA, Ângela Walterkemper. **Comparação entre método para determinação da absorção de água em placas cerâmicas de revestimento – porcelanato**. 2016. 151 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, 2016.

VIGÂNICO, Eunice Maria. **Produção de sulfato ferroso a partir de rejeitos de carvão**. 2009. 100 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2009.

VOGT, Regina; JAHN, Alexander. Raw material enthalpy of heavy clay raw materials (Part 2). **Zi Brick and Tile Industry International**, v. 5, p. 6–15, 2021.

WANG, Sen *et al.* Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 66, p. 105802, 2023.

WEETMAN, Catherine. **Economia Circular - conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa**. São Paulo, SP: Autêntica Business, 2019.

WWF. **O que são os “negócios verdes”?** 2010. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/desenvolvimentosustentavel/>. Acesso em: 26 jul. 2023.

XAVIER, Alfredo Augusto Pereira. **Avaliação do Acúmulo e Emissão de Carbono do Solo sob Sistema Produtivos de Pastagem**. 2014. 101 f. - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.

ZACCARON, Alexandre *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, 2020.

ZACCARON, Alexandre *et al.* Efeito da adição de resíduo de vidro em massa de cerâmica de alvenaria. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 4, p. e-12496, 2019.

ZACCARON, Alexandre *et al.* Estudo da Utilização do Resíduo Proveniente do Beneficiamento do Carvão Mineral como Matéria-Prima Alternativa na Fabricação de Blocos de Vedação. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 2, p. 14–21, 2015.

ZACCARON, Alexandre. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha**. 2018. 202 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, Criciúma, SC, 2018.

ZACCARON, Alexandre *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, 2024.

ZACCARON, Alexandre; DE SOUZA NANDI, Vítor; BERNARDIN, Adriano Michael. Fast drying for the manufacturing of clay ceramics using natural clays. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101877, 2021.