



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA BORBA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA: efeitos da
calcinação e moagem**

Recife

2023

CAMILA BORBA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA:
efeitos da calcinação e moagem**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

R696a Rodrigues, Camila Borba.
 UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
 ÁGUA COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA
 VERMELHA: efeitos da calcinação e moagem / Camila Borba Rodrigues,
 2023.
 164 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
 Inclui referências e apêndices.

 1. Engenharia Civil. 2. Lodo de ETA. 3. Cerâmica vermelha. 4. Matéria
 Prima alternativa. 5. Destinação adequada de resíduos. 6. Construção
 Sustentável. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 164

CAMILA BORBA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA:
efeitos da calcinação e moagem**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em 06/07/2023

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Maria Isabel Morais Torres (examinadora externa)
Universidade de Coimbra

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Janaíde Cavalcante Rocha (examinadora externa)
Universidade Federal de Santa Catarina

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Aline Figueirêdo da Nóbrega (examinadora externa)
Universidade Federal de Campina Grande

participação por videoconferência

Prof.^a Dr.^a Yêda Vieira Póvoas (examinadora externa)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Eudes de Arimatéa Rocha (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por seu amor, cuidado e orientação. Aos meus pais, Francisco e Betânia, pela educação, valores e exemplos de vida que me deram. Ao meu marido, Ivson, pelo amor, paciência e compreensão nos momentos de estudo e dedicação exclusiva ao trabalho. Ao meu filho Levi, que chegará em breve, pela motivação para prosseguir.

Agradeço aos meu orientador, Prof. Arnaldo Carneiro, pela formação acadêmica e pelos ensinamentos que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço aos professores Tiago Rolim e Silvio Romero de Melo Ferreira pelas contribuições para esta pesquisa. Agradeço aos membros da banca, Prof.^a. Maria Isabel, Prof.^a. Janaíde Cavalcante, Prof.^a. Aline Figueiredo, Prof.^a Yêda Póvoas e Prof. Eudes Rocha pela dedicação na avaliação e contribuições para este trabalho.

Agradeço também aos colegas de curso, Eudes Rocha, Victor Estolano, André Patriota, Pablo Gois, Kátia Monteiro e Thiago Muniz pelos debates, discussões e trocas de experiências ao longo desses anos de estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC;

Aos colegas da Diretoria de Planos e Projetos da UFPE, em especial à Isabel Pinto, Macirleide Duarte, Antônio Rinaldo, Izabela Medeiros, Ítalo Lobo, Ronaldo Ribeiro, Ana Carolina, Adriana Braz, Hugo Vale e Rubens França.

À Compesa e a Olaria Bom Jesus por cederem os materiais para esta pesquisa;

Ao LabTag, ao LDN, ao LSI, ao LTM, ao NegLabise e aos seus respectivos responsáveis por disponibilizarem a infraestrutura dos laboratórios para a realização dos experimentos;

À FACEPE pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

A indústria da construção civil busca cada vez mais alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a produção de materiais de construção. Nesse contexto, o lodo de estação de tratamento de água (ETA) surge como uma potencial matéria-prima alternativa à argila na produção de cerâmica vermelha em virtude de suas semelhanças químicas e mineralógicas. Entretanto, o desempenho das cerâmicas produzidas com misturas de lodo e argila tem ficado aquém das cerâmicas comuns e diversos autores atribuem esta característica ao tamanho das partículas e o alto teor de matéria orgânica presentes no lodo. Diante desse cenário, a pesquisa investigou a influência da calcinação e moagem do lodo de ETA usado em misturas binárias de lodo e argila na qualidade do material cerâmico. Para isso, foram coletadas amostras de lodo e argila na Região Metropolitana do Recife (RMR) e realizadas análises físicas, químicas e mineralógicas para produção de misturas binárias em diferentes proporções e condições de beneficiamento. Diante destas categorias, estudou-se ainda dois tipos de argilas com substituições de 0, 5, 10 e 20% de lodo. Os corpos de prova foram moldados e caracterizados quanto às suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas. Verificou-se que as propriedades das cerâmicas são afetadas pela incorporação do lodo de ETA, tendendo a aumentar sua retração e absorção de água em todas as amostras e a reduzir sua resistência mecânica quando usados teores acima de 10% de lodo. O estudo demonstrou que a calcinação e a moagem têm pouca influência sobre as propriedades das cerâmicas, sendo mais importante o tipo de argila e o teor de lodo usado, devendo-se dar prioridade ao uso do lodo bruto, uma vez que não há gasto energético adicional para o seu beneficiamento. Por fim, deve-se buscar o equilíbrio entre a composição granulométrica e teor de fundentes dos materiais, de modo evitar mudanças significativas na composição de cerâmicas produzidas com lodo de ETA.

Palavras-chave: lodo de ETA; cerâmica vermelha; matéria prima alternativa; destinação adequada de resíduo; construção sustentável.

ABSTRACT

The civil construction industry is increasingly seeking sustainable and economically viable alternatives for the production of construction materials. In this context, water treatment plant sludge (WTPS) emerges as a potential alternative raw material to clay in the production of red ceramics due to their chemical and mineralogical similarities. However, the performance of ceramics produced with mixtures of sludge and clay has fallen short compared to common ceramics, and several authors attribute this characteristic to the particle size and high organic matter content present in the sludge. Given this scenario, the research investigated the influence of calcination and grinding of WTPS used in binary mixtures of sludge and clay on the quality of the ceramic material. For this purpose, samples of sludge and clay were collected in the Metropolitan Region of Recife (RMR), and physical, chemical, and mineralogical analyses were carried out to produce binary mixtures in different proportions and beneficiation conditions. Within these categories, two types of clays were also studied with substitutions of 0, 5, 10, and 20% of sludge. Test specimens were molded and characterized for their physical, mechanical, chemical, and mineralogical properties. It was found that the properties of the ceramics are affected by the incorporation of WTPS, tending to increase their shrinkage and water absorption in all samples and reducing their mechanical strength when using sludge content above 10%. The study demonstrated that calcination and grinding have little influence on the properties of the ceramics, with the type of clay and the sludge content being more important. Priority should be given to using the raw sludge, as there is no additional energy expenditure for its beneficiation. Finally, it is essential to seek a balance between the particle size distribution and flux content of the materials to avoid significant changes in the composition of ceramics produced with WTPS

Keywords: WTPS; red ceramics; alternative raw material; proper waste disposal; sustainable construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Percentual de produção de cerâmica vermelha por regiões do Brasil	22
Figura 2	– Principais regiões produtoras de cerâmica vermelha no estado de Pernambuco	23
Figura 3	– Área de extração de argila no município de Paudalho – PE	24
Figura 4	– Diagrama Winkler	33
Figura 5	– Diagrama de secagem de Bourry para componentes de argila	35
Figura 6	– Horizontes do solo de Dobrodo e suas cores correspondentes no sistema Munssel	40
Figura 7	– Micrografia de uma cerâmica porosa após sinterização a 1500 °C. (a, a’): 90% de caulim, 5% de Na ₂ CO ₃ e 5% de CaCO ₃ ; (b,b’): 70% de caulim, 15% de Na ₂ CO ₃ e 15% de CaCO ₃ ; (c, c’): 50% de caulim, 25% de Na ₂ CO ₃ e 25% de CaCO ₃ ; (d, d’): 30% de caulim, 35% de Na ₂ CO ₃ e 35% de CaCO ₃	44
Figura 8	– Diagrama de Fluxo típico de uma estação de tratamento de água convencional	51
Figura 9	– Relação entre métodos de secagem e teores de sólidos resultantes	53
Figura 10	– Destinação final do lodo de ETA por região do Brasil	54
Figura 11	– Resíduo após sua remoção (a), trituração em máquina tipo pedra moinho (b) e triturado (c)	65
Figura 12	– Relação entre teor de lodo com e resistência das amostras estudadas por diversos autores	68
Figura 13	- Derivatograma do lodo de ETA usado por Kizinievič et al. (2017)	72
Figura 14	– Microestrutura de corpos cerâmicos após calcinação a 1000 °C: (a, b) corpo cerâmico de referência; (c, d) corpo cerâmico produzido com 40% de lodo de ETA em substituição à argila; (e, f) corpo cerâmico produzido com 60% de lodo de ETA em substituição à argila	73
Figura 15	– Relação entre perda ao fogo e resistência de cerâmicas produzidas com lodo	74
Figura 16	– Corpos cerâmicos confeccionados apenas com lodo, sinterizados à 950 °C	75
Figura 17	– Relação entre teor de lodo e resistência mecânicas de cerâmicas produzidas com lodo de ETA estudados por diversos autores	78

Figura 18	– Fluxograma do plano experimental	85
Figura 19	– Amostras das argilas secas ao ar: a) C1, b) C2	87
Figura 20	– Destorroamento da argila em almofariz com auxílio de mão de gral	87
Figura 21	– Amostras de argila após destorroamento: a) C1, b) C2	87
Figura 22	– Aparência do lodo da ETA Pirapama após secagem: a) Ao ar; b) Em estufa a 105 °C	89
Figura 23	– Lodo da ETA Botafogo: a) Lodo antes da secagem; b) aparência do lodo após a secagem em estufa a 105 °C	89
Figura 24	– Amostras de lodo de ETA submetidas a destorroamento manual até fração passante na peneira ABNT n° 80: a) ETA Pirapama, b) ETA Botafogo	90
Figura 25	– Aspecto granular da amostra do lodo coletado na ETA Botafogo durante a preparação para o ensaio de limite de liquidez	90
Figura 26	– Calcinação do lodo na mufla: a) lodo saído da mufla; b) detalhe do surgimento de partículas pretas na amostra	92
Figura 27	– Distribuição granulométrica dos solos	93
Figura 28	– Distribuição granulométrica da amostra do lodo da ETA Pirapama	94
Figura 29	– Distribuição granulométrica da amostra do lodo da ETA Botafogo	94
Figura 30	– Formação de película sobre a amostra de lodo coletado na ETA Pirapama durante a preparação para o ensaio de limite de liquidez	95
Figura 31	– Padrões de difração das matérias primas. Legenda: A, Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$); An, Anortita ($((\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8)$); K, Caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$); Mu, Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$); P, Pargasita ($\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$); Q, Quartzito (SiO_2)	98
Figura 32	– Diagrama Winkler com formulações em estudo	99
Figura 33	– Fluxograma de elaboração das misturas lodo × solo	100
Figura 34	– Molde metálico para produção dos corpos de prova: a) molde montado; b) molde em 3 partes	102
Figura 35	– Séries de corpos de prova produzidos com C1 após secagem em estufa	104
Figura 36	– Séries de corpos de prova produzidos com C2 após secagem em estufa	105
Figura 37	– Séries de corpos de prova produzidos com C1 após calcinação	106

Figura 38	– Séries de corpos de prova produzidos com C2 após calcinação	107
Figura 39	– Ensaio de tensão de ruptura à flexão	109
Figura 40	– Composição química majoritária e mineralógica das séries produzidas com C1	111
Figura 41	– Composição química majoritária e mineralógica das séries produzidas com C2	112
Figura 42	– Difratomogramas de séries produzidas com C1. Legenda: Q, Quartzo (SiO ₂); A, Albita (NaAlSi ₃ O ₈); L, Labradorita (Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈ ; H, Hematita (Fe ₂ O ₃)	113
Figura 43	– Difratomogramas das séries produzidas com C2. Legenda: Q, Quartzo (SiO ₂); H, Hematita (Fe ₂ O ₃); Mi, Microclínio (KAlSi ₃ O ₈); A, Albita (Na(AlSi ₃ O ₈))	114
Figura 44	– Imagens de MEV obtidos na superfície de fratura nos corpos de prova sinterizados a 950 °C: (a) C1 ×350, (b) C1 ×1000, (c) C1-S 10% ×350, (d) C1-S 10% ×1000, (e) C2 ×350, (f) C2 ×1000, (g) C2-S180F 20% ×350, e (h) C2-S180F 20% ×1000	115
Figura 45	– Espectro de EDS das amostras: a) 1 – C1-S 10%; b) 2 – C2; e c) 3 – C2-S180F 20%	116
Figura 46	– Perda de massa após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1	118
Figura 47	– Perda de massa após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2	118
Figura 48	– Massa específica após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1	120
Figura 49	– Massa específica após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2	120
Figura 50	– Retração linear após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1	123
Figura 51	– Retração linear após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2	123
Figura 52	– Absorção de água à após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1	126
Figura 53	– Absorção de água à após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2	126

Figura 54	– Relação entre massa específica e absorção de água das séries estudadas	127
Figura 55	– Tensão de ruptura à flexão após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1	129
Figura 56	– Relação entre faixas de tamanho de grão e resistência à flexão dos corpos de prova produzidos com C1	130
Figura 57	– Comparação dos efeitos do beneficiamento do lodo na resistência à tração na flexão nas cerâmicas produzidas com C1	132
Figura 58	– Tensão de ruptura à flexão após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2	133
Figura 59	– Relação entre faixas de tamanho de grão e resistência à flexão dos corpos de prova produzidos com C2	134
Figura 60	– Comparação dos efeitos do beneficiamento do lodo na resistência à tração na flexão nas cerâmicas produzidas com C2	135
Figura 61	– Relação entre a resistência e as demais propriedades físicas dos corpos de prova	138
Figura 62	– Esquema de tratamento de água na ETA Pirapama	158
Figura 63	– Sistema de tratamento de efluentes na ETEF Pirapama	159
Figura 64	– ETEF Pirapama: (a) vista da lagoa de decantação; (b) recipiente de coleta	160
Figura 65	– Esquema de tratamento de água na ETA Botafogo	161
Figura 66	– Sistema de tratamento de efluentes na ETEF Botafogo	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação do solo segundo diâmetro de partículas	34
Tabela 2	– Transformações que ocorrem nos corpos cerâmicos em função da temperatura	38
Tabela 3	– Cores dos corpos de prova segundo a temperatura usada na calcinação segundo Santos (1989)	40
Tabela 4	– Índices e variação do abastecimento urbano de água por região do Brasil entre os anos de 2018, 2019 e 2020	49
Tabela 5	– Beneficiamento do lodo pós coleta na ETA	67
Tabela 6	– Composição química de lodos estudados por diversos autores	70
Tabela 7	– Composição mineralógica de lodos de ETA estudados por diversos autores	76
Tabela 8	– Ensaio de caracterização das matérias primas	93
Tabela 9	– Classificação granulométrica das amostras dos lodos de ETA de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995)	95
Tabela 10	– Limites de Atterberg das amostras de argila e lodo	96
Tabela 11	– Composição química das matérias primas obtidas por FRX	96
Tabela 12	– Composição das misturas entre argila e lodo de ETA	100
Tabela 13	– Limites de plasticidade para séries produzidas com C1	101
Tabela 14	– Limites de plasticidade para séries produzidas com C2	101
Tabela 15	– Teor de água inicial de moldagem dos corpos de prova das séries produzidas com C1	103
Tabela 16	– Teor de água inicial de moldagem dos corpos de prova das séries produzidas com C2	103
Tabela 17	– Massa inicial média dos corpos de prova das séries produzidas com C1	103
Tabela 18	– Massa inicial média dos corpos de prova das séries produzidas com C2	103
Tabela 19	– Quantidades de corpos de prova usados nos ensaios de caracterização	105
Tabela 20	– Resultados do modelo de regressão linear para a massa específica	122

Tabela 21	– Resultados do modelo de regressão linear para a retração linear após calcinação	125
Tabela 22	– Resultados do modelo de regressão linear para a absorção de água	128
Tabela 23	– Resultados do modelo de regressão linear para a resistência à tração na flexão	137
Tabela 24	– Massa específica – estatística de regressão	163
Tabela 25	– Massa específica – tabela de análise de variâncias (ANOVA)	163
Tabela 26	– Retração – estatística de regressão	163
Tabela 27	– Retração – tabela de análise de variâncias (ANOVA)	163
Tabela 28	– Absorção – estatística de regressão	164
Tabela 29	– Absorção – tabela de análise de variâncias (ANOVA)	164
Tabela 30	– Resistência – estatística de regressão	164
Tabela 31	– Resistência – tabela de análise de variâncias (ANOVA)	164

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	ARGILAS USADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.1	A INDÚSTRIA DA CERÂMICA VERMELHA	21
2.2	PROPRIEDADES DE ARGILAS EMPREGADAS NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA	25
2.2.1	Composição química e mineralógica	26
2.2.2	Plasticidade	29
2.2.3	Composição granulométrica	31
2.2.4	Teor de orgânicos	34
2.3	PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA	34
2.3.1	Processos térmicos	35
2.3.1.1	Sinterização	36
2.3.1.2	Cor	39
2.3.2	Retração	41
2.3.3	Absorção de água	42
2.3.4	Resistência à flexão	45
2.4	CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 2	46
3	TRATAMENTO DE ÁGUA POTÁVEL E GESTÃO DE RESÍDUOS EM ETA	48
3.1	TRATAMENTO DE ÁGUA	50
3.2	RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	52
3.2.1	Disposição final dos lodos	54
3.3	CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 3	55
4	CERÂMICA VERMELHA PRODUZIDA COM LODO DE ETA	57
4.1	CERÂMICAS PRODUZIDAS COM LODO DE ETA	57
4.2	INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO LODO NAS CARACTERÍSTICAS DA CERÂMICA	65

4.2.1	Composição granulométrica	65
4.2.2	Composição química e mineralógica	69
4.2.3	Características de cerâmicas produzidas com lodo de ETA	77
4.3	CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 4	82
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
5.1	JUSTIFICATIVA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS	85
5.3	OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	86
5.3.1	Argilas	86
5.3.2	Preparação das amostras de argila	86
5.3.3	Lodo de estação de tratamento de água	88
5.3.3.1	Estação de tratamento de água de Pirapama	88
5.3.3.2	Estação de tratamento de água de Botafogo	88
5.3.3.3	Preparação das amostras de lodo	89
5.3.4	Ensaio de caracterização	93
5.3.4.1	Composição granulométrica	93
5.3.4.2	Limites de Atterberg	95
5.3.4.3	Composição química por fluorescência de Raios-X	96
5.3.4.4	Composição mineralógica por difração de Raios-X	97
5.4	MISTURAS BINÁRIAS LODO × ARGILA	98
5.4.1	Ensaio de caracterização das misturas	100
5.4.2	Produção dos corpos de prova	101
5.4.3	Calcinação dos corpos de prova	105
5.4.3.1	Perda relativa de massa após calcinação	107
5.4.3.2	Massa específica aparente	108
5.4.3.3	Retração após calcinação	108
5.4.3.4	Absorção de água	108

5.4.3.5	Tensão de ruptura à flexão dos corpos de prova calcinados	108
5.4.3.6	Composição mineralógica e microestrutura dos corpos de prova calcinados	109
5.4.4	Análise dos resultados	110
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
6.1	PROPRIEDADES QUÍMICAS, MINERALÓGICAS E MICROESTRUTURAIS	111
6.2	Propriedades tecnológicas após calcinação	117
6.2.1	Perda relativa de massa após calcinação	117
6.2.2	Massa específica	119
6.2.3	Retração linear após calcinação	122
6.2.4	Absorção de água	125
6.2.5	Tensão de ruptura à flexão após calcinação	128
7	CONCLUSÕES	139
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	141
	REFERÊNCIAS	142
	APÊNDICE A – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE PIRAPAMA	158
	APÊNDICE B – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE BOTAFOGO	161
	APÊNDICE C – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR	163

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental tem incentivado a sociedade a buscar destinos apropriados para os resíduos sólidos, uma vez que seu descarte incorreto pode gerar diversos impactos ambientais. Os aterros sanitários são locais seguros para destinação dos resíduos, mas, tendo em vista sua vida útil limitada associada ao seu custo, é importante que se encontrem alternativas para a destinação de resíduos que poderiam ser reaproveitados ou reciclados, reduzindo a dependência dos aterros (ALFAIA; COSTA; CAMPOS, 2017).

O reaproveitamento e a reciclagem fazem parte de uma hierarquia de gerenciamento de resíduos que têm como objetivo otimizar o uso de recursos e evitar o descarte incorreto de rejeitos que possam oferecer risco à saúde pública (HYMAN; TURNER; CARPINTERO, 2013). Assim, a reutilização tem relação com o aproveitamento de itens ou partes destes que ainda podem ser úteis, enquanto a reciclagem aproveita os resíduos como recursos, sendo necessário algum tipo de processamento para sua reintrodução na cadeia produtiva (UNEP, 2010).

Ilhan e Yobas (2019) estimam que, cerca de 50% da matéria prima extraída mundialmente é transformada e empregada na produção de insumos para a construção civil. Além disso, também afirmam que o setor é responsável por cerca de 22% dos resíduos gerados atualmente, defendendo que a quantidade de matéria prima usada pode e deve ser reduzida. Ao longo dos anos se desenvolveram diversos trabalhos, muitos deles com sucesso, com o objetivo de aproveitar ou beneficiar resíduos de modo a serem adicionados aos materiais de construção convencionais ou até mesmo substituí-los (GUTT; NIXON, 1979).

A reutilização dos resíduos industriais na construção civil pode não só ajudar a reduzir os custos e prejuízos ambientais relativos ao seu tratamento e disposição final, como também a mitigar os impactos ambientais resultantes da extração de matéria prima da natureza. Segundo Monteiro e Vieira (2014) existem cerca de 3,7 bilhões de toneladas de argila disponível nas jazidas, que devem se esgotar nos próximos vinte anos se houver continuidade do consumo.

Atualmente, há potencial para a incorporação de lodos provenientes de estações de tratamento de água e efluentes, cinzas de usinas hidrelétricas, areias de fundição, refugos

de mineração, escórias de fornos, resíduos de serragem de rochas ornamentais, entre outros em matrizes cerâmicas, produção de cimento e fabricação de artefatos empregados na construção civil (LUCAS; BENATTI, 2008). Dentre os resíduos que têm se tornado preocupantes, não só no Brasil, mas internacionalmente, pode-se destacar o lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA).

O lodo de ETA é resíduo gerado no tratamento para tornar a água potável. Em geral, o lodo possui as características da água bruta, como seus componentes minerais e orgânicos, e resíduos dos agentes químicos usados para remover as impurezas da água, como coagulantes (BABATUNDE; ZHAO, 2007). A destinação inadequada desse resíduo em corpos hídricos, por exemplo, pode provocar o crescimento de algas e a morte de peixes (GEORGE *et al.*, 1995; MORTULA *et al.*, 2009; YUAN *et al.*, 2017). Além disso, estudos mostram que alguns gêneros de bactérias presentes no lodo geram metabólitos prejudiciais ao homem capazes de provocar doenças de pele, doenças digestivas e neurológicas em humanos de forma grave e até fatal (XU *et al.*, 2018).

Estima-se que só no Estado de Pernambuco, 75% do lodo seja descartado em corpos hídricos, havendo, portanto, uma clara demanda por uma destinação adequada (MOTTA SOBRINHO *et al.*, 2019)

A organização mundial de saúde alerta que, no geral, o crescimento populacional será a força motriz para uma maior demanda por recursos hídricos (OMS, 2009), o que por consequência, também deve resultar em uma maior geração de lodo de ETA nos próximos anos.

A semelhança entre a composição química do lodo e da argila é o ponto de partida para a substituição da matéria prima convencional em massas cerâmicas. Os óxidos SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , são majoritários em ambos os materiais, com variações sensíveis nos percentuais (GOMES *et al.*, 2019). Monteiro *et al.* (2008) consideram que essa semelhança de composição pode reduzir a tensão residual gerada por materiais diferentes na calcinação, etapa do processo produtivo de materiais cerâmicos, mitigando assim o aparecimento de fissuras que prejudicam a qualidade das peças.

Contudo, a utilização do lodo no processo de produção de cerâmica vermelha ainda enfrenta diversas dificuldades. Em primeiro lugar, o lodo não é um material homogêneo e constante, isto é, sua composição não só varia de um lugar para o outro, como também

varia em relação aos meses do ano (TEIXEIRA *et al.*, 2004). Além disso, cabe destacar que o próprio material argiloso apresenta peculiaridades em virtude da jazida de extração. Outrossim, a quantidade de água empregada e o processo produtivo são condições que podem provocar heterogeneidades no produto final.

Nessa perspectiva, algumas características das cerâmicas produzidas com argila e lodo levaram à limitação do percentual de lodo na mistura. Tartari *et al.* (2011) afirmam que o tamanho dos grãos do lodo, semelhante à areia, afeta a qualidade das peças produzidas, dificultando a coesão entre as partículas. Kizinievic *et al.* (2017) associa a fragilidade das peças cerâmicas ao alto teor de matéria orgânica presente no lodo, provocando a formação de vazios após a sinterização.

De modo geral, a incorporação de lodo de ETA em corpos cerâmicos afeta negativamente suas propriedades, causando aumento da absorção de água e redução da resistência mecânica, provocados por trincas e deformações nas peças. Logo, como forma de dirimir estes efeitos, alguns autores recomendam o uso de no máximo 5% de lodo em substituição à argila (MEDEIROS *et al.*, 2014). Outros sugerem que este limite pode ser estendido à 15% e alguns, cujos lodos apresentam características diferenciadas como alto teor de alumínio ou perda ao fogo inferior à da argila, afirmam que o uso de até 30% não causa prejuízos às peças cerâmicas a ponto de desqualificá-las em seu uso (BENLALLA *et al.*, 2015; MORENO, 2012; OLIVEIRA; HOLANDA, 2008; TANTAWY; MOHAMED, 2017; TARTARI *et al.*, 2011; TEIXEIRA *et al.*, 2006).

Desta forma, o desafio tem sido encontrar um material alternativo para substituição parcial da argila, de modo a proporcionar resultados constantes na fabricação de material cerâmico. As variáveis a serem controladas na produção deste tipo de material são muitas mesmo para a produção de cerâmica contendo apenas argila, e aumentam sua dificuldade quando se incorporam resíduos a esta.

A hipótese é que, ao melhorar as propriedades do lodo, reduzindo o tamanho dos seus grãos e o teor de matéria orgânica que o compõe, haja redução dos defeitos provocados pela sinterização e consequentemente incremento de resistência mecânica das cerâmicas produzidas com misturas binárias. Até então, não existem estudos que correlacionem estes dois métodos de beneficiamento e a combinação entre eles com a propriedades físicas e mecânicas destes materiais.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é estudar a influência do beneficiamento do lodo de ETA, sua moagem e calcinação, quando usado como substituto parcial da argila para produção de material cerâmico, visando assim, a otimização do uso deste resíduo resultando em economia de recursos e destinação adequada de rejeitos.

Desta forma, pretende-se:

- Caracterizar o lodo de ETA, identificando as propriedades químicas, físicas e mineralógicas e particularidades que possibilitem sua incorporação à solos usados para produção de cerâmica.
- Investigar a influência do tamanho de grão e da matéria orgânica do lodo, e da combinação entre estes, nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas da cerâmica produzida;
- Avaliar as características tecnológicas e microestruturais das cerâmicas produzidas correlacionando com a forma de beneficiamento empregada.

Para tal, foram coletadas amostras de lodo de estação de tratamento de água, na Região Metropolitana do Recife, e amostras de solos usuais para a produção de cerâmica no Estado de Pernambuco. Estes materiais foram caracterizados para verificação de suas propriedades químicas físicas e mineralógicas e seus dados confrontados com dados de autores que produziram misturas de lodo e solo. Com base na bibliografia, foram proporcionadas misturas de modo a moldarem-se corpos de prova que foram submetidos a ensaios mecânicos, físicos, químicos e mineralógicos. Assim, foram analisados os produtos formados na calcinação e a influência de cada fator nas propriedades do corpo cerâmico.

Desta forma, pretende-se colaborar com a sustentabilidade da indústria cerâmica, dando ao lodo de ETA um uso adequado, bem como reduzindo a extração de matéria prima para a produção de cerâmica, minimizando o impacto ambiental provocado pela construção civil. Assim, a presente pesquisa discute a temática e estrutura-se em sete capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo desta tese destina-se a uma breve introdução ao tema, justificando os motivos para o estudo do lodo de ETA como substituição da argila na produção de material cerâmico.

O segundo capítulo descreve o que é a argila bem como suas propriedades que são relevantes para a produção cerâmica, contextualizando a produção de cerâmica vermelha no Estado de Pernambuco. São abordados processos de produção determinantes na qualidade do material, usado como material de construção civil e as características necessárias ao seu bom desempenho.

No terceiro capítulo, o tratamento de água é estudado, a fim de se conhecer o processo que resulta na geração do lodo, identificando-se as características, etapas e produtos empregados que influem nas propriedades do lodo de ETA.

Já no quarto capítulo, são revisados trabalhos que empregam lodo de ETA como material alternativo a fim de produzir materiais de construção. São abordados os fatores influentes no processo como composição granulométrica, teor de orgânicos, composição química e mineralógica, além de variáveis da produção que são fundamentais na qualidade do produto formado.

No quinto capítulo são apresentados os materiais e métodos usados na pesquisa, sendo descritos os locais e formas de obtenção da matéria prima usada e a preparação desta para os experimentos, justificadas pela revisão bibliográfica. São ainda mencionados como foram reconhecidas as propriedades da matéria prima, com descrição dos métodos e normas, e como foram determinados os percentuais e métodos de ensaio para determinação da qualidade do produto final a fim de haver comparações entre resultados.

O sexto capítulo descreve os resultados obtidos com a análise e comparação entre as propriedades dos corpos de prova de modo a se reconhecer quais os principais fatores influentes e de que forma eles atuaram na produção dos resultados, uns em relação aos outros.

No sétimo e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas dos experimentos, onde se pretendeu demonstrar como o trabalho contribuiu para o desenvolvimento de material cerâmico com incorporação do lodo de ETA.

2 ARGILAS USADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As argilas são materiais de granulação fina que adquirem características plásticas quando misturadas com água, ficam rígidas após secagem e ganham resistência após calcinação, sendo formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (SANTOS, 1989).

Como são encontradas em abundância na superfície terrestre, as argilas podem adquirir características que as diferem umas das outras, geralmente, relacionadas às suas condições geológicas de formação (SHACKELFORD; DOREMUS, 2008). O transporte de sedimentos de rochas e deposição em leitos de rios faz com que a argila adquira impurezas, como óxidos de ferro e titânio que são responsáveis por sua cor (HEINRICH ; GOMES, 2014).

Para o uso da argila na produção de cerâmica vermelha, algumas propriedades da matéria prima são desejáveis, tais como: boa plasticidade, boa resistência mecânica tanto durante a conformação da peça quanto após a calcinação, contração moderada, permeabilidade suficiente de modo a não causar trincas e uma boa sinterização e cor adequada ao produto (MELLO *et al.*, 2011) . Estas características podem ser obtidas por meio da mistura entre dois ou mais tipos de argila, tornando seu estudo complexo devido ao grande número de variáveis (TEIXEIRA, 2006).

2.1 A INDÚSTRIA DA CERÂMICA VERMELHA

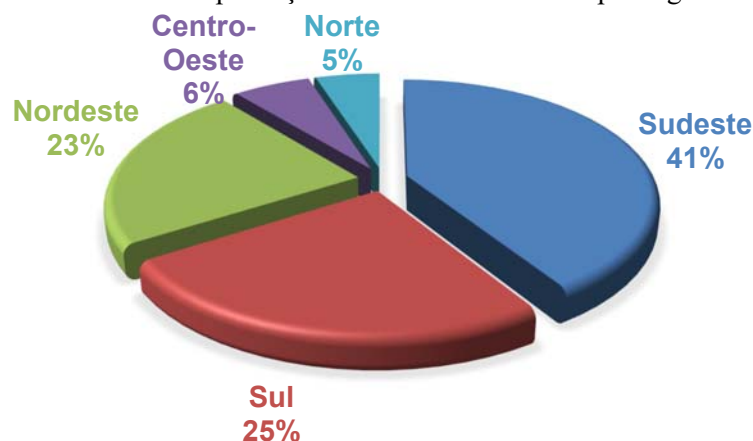
A indústria da cerâmica vermelha compreende os materiais compostos por argilas que resultam em produtos de cor avermelhada após a calcinação, amplamente usados na Construção Civil em forma de blocos, tijolos, telhas, lajes, entre outros. Ainda hoje, este setor é o principal fornecedor de material para alvenaria e lajes no Brasil, tendo a argila como sua principal matéria prima (MME, 2019).

O processo de produção de telhas e blocos no Brasil pode ser considerado, de certa forma, artesanal, uma vez que nos últimos anos não se tem empregado muitos esforços, por parte dos produtores, em inovações tecnológicas para o setor. Isto se deve principalmente ao baixo valor agregado do produto, que resulta em baixa qualidade e baixa eficiência do processo (BRAGA; SANTOS; SALES, 2016).

Dados do Ministério de Minas e Energia – MME (2019) demonstram que são produzidas no país cerca de 140 milhões de toneladas de cerâmica vermelha, sendo 47.100 tem como

destino a exportação. As principais regiões produtoras de cerâmica vermelha se situam nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste, sendo representadas em sua maioria por empresas de pequeno porte (ABDI, 2016) (Figura 1). Na região Nordeste, a produção se localiza principalmente nos estados do Ceará, Bahia e Pernambuco, sendo a região responsável mais de 20% do consumo de cerâmica vermelha do país (BANCO DO NORDESTE, 2010).

Figura 1 – Percentual de produção de cerâmica vermelha por regiões do Brasil



Fonte: ABDI (2016).

O principal fator de influência na localização das indústrias de cerâmica vermelha é sua proximidade com a jazida, uma vez que interfere no custo do transporte. Maiores distâncias só são vantajosas caso haja materiais de qualidade excepcional que justifiquem custos adicionais (BANCO DO NORDESTE, 2010).

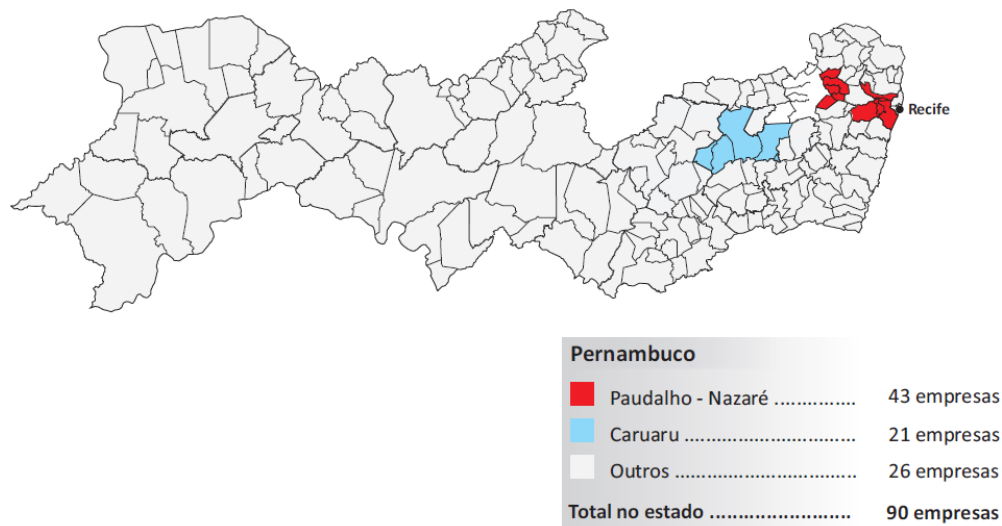
Em 2014, em Pernambuco, mais de 1 milhão de toneladas de argila foram extraídas para consumo, somando cerca de 5 milhões de Reais, o que representa 1,2% do valor total da produção mineral comercializada no país (DNPM, 2017).

A maior parte dos produtores de cerâmica vermelha do Estado de Pernambuco, se concentram no Agreste e na Zona da Mata, no entorno das cidades de Caruaru, com produção de cerca de 14.000 milheiro/mês e Paudalho – Nazaré da Mata, com produção de 43.000 milheiros/mês (Figura 2) (HENRIQUES JÚNIOR; RODRIGUES, 2017).

A maior parte das empresas de cerâmica do município de Paudalho não têm jazidas próprias, recebendo argilas de jazidas localizadas em Limoeiro, Nazaré da Mata e Vicência. Cerca de 90% da argila utilizada é secundária, uma vez que esta região é cortada

pelo rio Capibaribe, facilitando a formação de depósitos, sendo este material destinado, em sua maior parte, para a produção de tijolos de 8 furos (ALMEIDA, 2010).

Figura 2 – Principais regiões produtoras de cerâmica vermelha no estado de Pernambuco



Fonte: Henriques Júnior e Rodrigues (2017).

Os solos da região de Paudalho-Nazaré são caracterizados principalmente como Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos e Latossolos Amarelos. Os argissolos Vermelho-Amarelos, se apresentam em camadas facilmente distinguíveis, muito profundas, argilosas, com a presença de hematita, a qual confere ao solo uma coloração avermelhada. Os Latossolos encontrados na região são solos minerais, provenientes da Formação Barreiras, com perfis relativamente homogêneos, com predomínio de textura argilosa e média (EMBRAPA, 2006).

Apesar de abundantes, os depósitos de argila são limitados, sendo necessário que sejam explorados de forma racional a despeito da grande demanda de material. Diversos problemas ambientais estão associados à extração inadequada de argila, tais como: perda da biodiversidade, contaminação visual, desmatamento, erosão de margens de rios provocados pela retirada da mata ciliar, compactação do solo, alterações na topografia entre outros (Figura 3) (ALMEIDA *et al.*, 2021; KUASOSKI *et al.*, 2020).

Guimarães *et al.* (2018) realizaram um estudo sobre o atendimento de requisitos ambientais por parte de indústrias de cerâmica vermelha. Das 11 indústrias avaliadas, apenas 1 aproveitava algum tipo de resíduo no processo de produção dos blocos. As indústrias de cerâmica vermelha apresentaram uma média de 72,25% de atendimento às

legislações e requisitos no meio ambiente. Apesar dos esforços em pesquisas, poucos são os investimentos no setor produtivo.

Figura 3 – Área de extração de argila no município de Paudalho – PE



Fonte: Santos (2018).

Paz, Holanda e El-Deir (2015), realizaram um estudo com uma indústria localizada no município de Paudalho, um dos principais polos produtores de cerâmica vermelha no Estado de Pernambuco. Em seu estudo, os autores destacaram que as indústrias se posicionam em locais próximos às jazidas para evitar custos com transporte. Uma vez que o custo do material é baixo, um longo deslocamento da jazida para a indústria, inviabiliza economicamente a produção. A vida útil da jazida é em torno de 20 anos e o estoque é mantido em fábrica em torno de 2 a 3 anos. Outros fatores relevantes para a escolha da locação da olaria são a proximidade da mão de obra e do mercado consumidor, além dos incentivos fiscais e fornecedores de equipamentos (PAZ; HOLANDA; EL-DEIR, 2015).

A indústria da cerâmica vermelha é responsável por um consumo relevante de recursos naturais e energéticos associados a uma alta geração de resíduos e desperdícios (SILVA; SILVA, 2017). Holanda e Silva (2011) concluíram que, desde a exploração na jazida à etapa de obra, há uma perda total de mais de 20% da produção de cerâmica em Pernambuco, causando um grande impacto ambiental. Além destes, existem ainda danos ao meio ambiente provocados pela emissão de gases tóxicos na atmosfera durante a produção da cerâmica. Atualmente a produção implica num gasto energético de $2,38.10^9$ kWh e a emissão de $2,59 \times 10^{10}$ kg de CO₂ ao ano MME – Ministério de Minas e Energia (2019).

Estudos voltados para a sustentabilidade do setor indicam que os esforços para reduzir os impactos ambientais estão principalmente na mudança de matéria prima ou insumos, a partir do uso de resíduos industriais como substituto parcial de argilas e areia empregados na produção (SILVA; SILVA, 2017).

No Brasil, cerca de 90% da energia empregada na indústria cerâmica provém de biomassa, sendo a lenha a mais utilizada no Nordeste. Mais de 95% da energia empregada na produção de cerâmicas se refere à etapa de calcinação, sendo importante a eficiência deste processo a fim de que se reduza o impacto provocado (HENRIQUES JÚNIOR E RODRIGUES, 2017).

Uma das formas de reduzir o impacto provocado durante a calcinação é por meio da redução da temperatura de sinterização das peças, o que pode ser facilitado com o uso de elementos fundentes. A presença destes materiais faz com que se atinjam as propriedades desejadas à menores temperaturas, reduzindo o custo de produção (MELLO *et al.*, 2011). Detalhes sobre estes elementos serão descritos nos itens seguintes.

2.2 PROPRIEDADES DE ARGILAS EMPREGADAS NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

A indústria da cerâmica vermelha utiliza mais de um tipo de argila em suas composições de modo a conferir as propriedades desejáveis após a calcinação. Este processo é realizado de forma empírica, sem critérios sólidos, baseados em experiências de tentativa e erro, o que dificulta a manutenção da qualidade e a repetibilidade do processo (MORENO, 2012).

As indústrias buscam nas formulações das massas cerâmicas, equilíbrio entre um componente plástico, a argila, um fundente e um enchimento, que geralmente é o quartzo. Esses componentes devem conferir a granulometria adequada e a plasticidade desejada à mistura (BACCELLI JÚNIOR, 2010).

Além de argila e quartzo, podem ser adicionados outros materiais à composição das cerâmicas com objetivo conferir as propriedades desejadas de forma controlada e eficaz. A seguir, além das características naturais das argilas, serão estudadas as propriedades conferidas por meio de adições.

Apesar dos estudos envolvendo o uso de resíduos para a produção de cerâmica, ainda há pouco interesse da indústria em torná-los uma prática. As dificuldades envolvem a pouca

constância das propriedades dos resíduos, sua disponibilidade imprevisível, os custos de transporte e os custos envolvidos na preparação do resíduo para sua mistura à massa cerâmica (HOSSAIN; ROY, 2020).

As propriedades das argilas usadas em corpos cerâmicos têm grande influência nos corpos cerâmicos formados, tanto crus quanto após a calcinação. Dentre estas propriedades podem-se destacar sua plasticidade, composição granulométrica e seu teor de orgânicos.

2.2.1 Composição química e mineralógica

A composição química da argila exerce uma forte influência sobre as suas propriedades. Se por um lado, sua plasticidade é importante para a conformação das peças cerâmicas, por outro, é fundamental a presença de minerais que assegurem insolubilidade, solidez e resistência mecânica mesmo em temperaturas mais baixas.

Grim (1962) ressalta ainda que, a mesma composição química pode apresentar diferentes características na cerâmica produzida. As propriedades cerâmicas são determinadas por sua composição mineralógica e pela presença de minerais não argílicos, matéria orgânica e sais solúveis.

A principal forma de melhorar a qualidade de corpos cerâmicos é interferindo na composição química e mineralógica da matéria-prima. Por meio de cálculos estequiométricos pode-se ajustar os percentuais da composição química por meio de adições e provocar formações de fases mineralógicas e alterações de estrutura e morfologia. Por exemplo, a produção de cerâmica porosa, tem como objetivo reduzir a condutividade térmica do material, contribuindo para a produção de materiais isolantes (SOUSA; SALOMÃO; ARANTES, 2017).

Rouabhia, Nemamcha e Moumeni (2018) realizaram um experimento para produção de cerâmica porosa, utilizando argila caulinítica e duas adições (CaCO_3 e Na_2CO_3). A calcinação a 1200°C da mistura com 70% de caulim, 15% de CaCO_3 e 15% de Na_2CO_3 proporcionou formação de uma cerâmica de textura porosa, porém resistente, formada principalmente de fases como mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Contudo, o uso de adições em cerâmica nem sempre tem resultados positivos. O uso de resíduos em formulações cerâmicas tem viés ambiental, mas pode causar alterações na microestrutura de forma negativa, dependendo do material e das condições de formação.

As argilas são majoritariamente compostas de óxidos de ferro, alumínio e silício, podendo ainda conter sódio, magnésio, cálcio, titânio, entre outros, a depender de sua origem. Os componentes majoritários das argilas estão descritos nos itens seguintes, bem como sua influência nas propriedades cerâmicas.

- SiO_2

O SiO_2 que constitui os grãos de argila, é proveniente de silicatos e da sílica livre. A sílica é o maior componente químico das argilas, uma vez que está presente em todos os argilominerais, no quartzo, feldspatos entre outros (LUZ; LINS, 2008).

Vasconcelos da Silva *et al.* (2020) afirmam que a sílica livre em argilas é responsável pela redução da plasticidade e da retração linear. Quando associada a agentes fundentes (FeO , CaO , MgO , Na_2O e K_2O), eleva o ponto de fusão em relação às argilas com sílica combinada. Contudo, se há baixa porcentagem de fundentes, a presença de sílica livre reduz a refratariedade, além de produzir efeitos nocivos em função da mudança de fase cristalina da sílica com a temperatura.

Gencel *et al.* (2021) usou pó de vidro em 3, 6, 9, e 12% em massa, em substituição à lodo de tratamento de água para produção de blocos calcinados a 1000 °C. O pó de vidro é constituído de cerca de 60% de SiO_2 , tendo como outros componentes majoritários K_2O (11,67%) e Na_2O (14,86%). Os autores observaram a redução de porosidade e absorção, e aumento da resistência dos corpos de prova com o aumento do percentual de vidro na composição, devido à maior formação de fase vítrea.

- Al_2O_3

A alumina está presente em diversos argilominerais, como por exemplo a caulinita. O seu percentual em determinado solo indica o teor de minerais argílicos presentes (LUZ; LINS, 2008). Um dos principais minerais componentes de cerâmicas, a Mulita 3:2 ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), é um composto estável em condições atmosféricas normais, em temperaturas acima de 1200 °C, formado de um sistema Al_2O_3 - SiO_2 em um arranjo ortorrombico (LIMA *et al.*, 2022).

Gonçalves *et al.* (2017) utilizaram um resíduo proveniente de calcinação de hidróxido de alumínio, moído até a fração menor que 0,075 mm e calcinado a 600 °C, como substituto parcial de argilas para produção de corpos de prova cerâmicos calcinados de 900 a 1400 °C. O percentual do resíduo de alumina variou de 21,32 a 32,61% em função de cálculos

estequiométricos para formação de mulita de acordo com a composição química das três argilas estudadas. O estudo demonstrou que a taxa alumínio/sílica e o teor de agentes fundentes interferem na dimensão dos cristais de mulita, sendo que, quanto maior a taxa $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, maiores os cristais. O teor de óxido de ferro também contribuiu para o aumento desses cristais, resultando em menor porosidade e maior resistência quando comparado às amostras com menor relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ e menor teor de Fe_2O_3 .

Não apenas a mineralogia de compostos isolados, mas também a combinação entre estes favorece ou prejudica determinadas propriedades dos corpos cerâmicos. O SiO_2 e Al_2O_3 são responsáveis pela estrutura da cerâmica, mas os agentes fundentes, ou de fluxo, tais como Na_2O e K_2O facilitam a formação de fases vítreas. Os componentes que são eliminados durante a calcinação ou geram gases, como CaCO_3 e o percentual de matéria orgânica favorecem o aumento da quantidade de poros (SUTCU *et al.*, 2022).

- Fe_2O_3 e FeO

O óxido de ferro é o principal elemento responsável pela cor avermelhada da cerâmica (LUZ; LINS, 2008). Argilas com altos teores de ferro, acima de 5,5%, influenciam a formação de compostos ferrosos independentes, apresentando picos de hematita (Fe_2O_3) claramente identificáveis por DRX. A formação de compostos ferrosos independentes provoca o aumento da massa específica e resistência dos corpos cerâmicos, por meio da formação de conglomerados fortes que por sua vez, influem no aumento da massa específica e resistência de corpos cerâmicos (YATSENKO; YATSENKO; ZAKARLYUKA, 2017).

Algamal, Khalil e Saleem (2018) adicionaram 5% em massa de nanopartículas de MgO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3 , ao lodo de ETA para produção de blocos calcinados, com o objetivo de estudar o efeito de cada adição. Dentre as adições, os corpos de prova produzidos com Fe_2O_3 , demonstraram maiores retrações lineares, menor massa específica, menor porosidade, maior absorção de água e menores valores de resistência em relação às outras adições. Contudo, o Fe_2O_3 provocou melhoria nas propriedades dos corpos de prova quando comparado às amostras apenas com lodo. A partir de micrografias, os autores constataram que há coesão com as partículas de lodo, mas pouca formação de novas fases quando comparado às imagens com outras adições.

Scribot *et al.* (2018) conduziram um estudo utilizando lama vermelha, resíduo rico em ferro proveniente do processamento de bauxita, em substituição à argila para produção de cerâmica. Os resultados mostraram que o uso de 30% de lama vermelha resultou na formação de cerca de 35% a mais de mulita que a amostra de referência. O aumento está associado à quantidade de hematita na lama. Contudo, houve aumento de retração e absorção de água e redução de resistência, associado ao aumento do diâmetro médio dos poros em cerca de 97% em relação à amostra de referência.

Outro estudo desenvolvido por Amaral, Prat e Reis (2020) adicionou rejeitos de mineração de ferro em massas cerâmicas. Foram usados 10 e 20% de resíduo, cuja composição química possuía 43,5% de Fe_2O_3 , incorporado a massa cerâmica e calcinado a 750, 850 e 950 °C. Apesar da pouca diferença entre as propriedades físicas, os corpos de prova com adição de Fe_2O_3 , reduziram a temperatura mínima necessária para a formação de fases à 850 °C, menor que os 950 °C necessários para a série de referência.

2.2.2 Plasticidade

A plasticidade é uma propriedade que relaciona os argilominerais com a água presente entre as partículas. Ela permite que uma determinada deformação aplicada na argila se mantenha sua forma, possibilitando a moldagem e extrusão do material cerâmico, por exemplo (SANTOS, 1989).

A quantidade de água que torna uma argila moldável é chamada água de plasticidade. Essa quantidade tem relação direta com o mineral, o tamanho de partícula e a capacidade de troca de cátions da argila em questão (GRIM, 1962). Uma argila com uma alta plasticidade proporciona uma boa trabalhabilidade e conformação plástica para produtos conformados por extrusão (LUZ; LINS, 2008).

Os minerais que compõem as argilas têm influência sobre suas propriedades plásticas. Quartzo e feldspato agem como redutores de plasticidade, enquanto altos teores de argilominerais, como caulinita, aumentam a plasticidade, sendo influenciado ainda pelo teor de orgânicos (GRIM, 1962).

Macedo *et al.* (2008) estudaram cinco argilas coletadas no estado da Paraíba, confrontando suas propriedades químicas e mineralógicas com os resultados de plasticidade obtidos em laboratório. Os autores observaram que em argilas com distribuição granulométrica semelhantes, apesar da mica ser um mineral que facilita o

deslizamento das partículas, o teor de orgânicos teve maior influência no desenvolvimento da plasticidade.

Masheane *et al.* (2018) relacionaram a composição química e granulometria com a plasticidade de argilas. No estudo com três argilas da região do sul da África, a argila com maior plasticidade apresentou a maior fração argila, enquanto a menos plástica tinha maior fração de silte.

A quantificação dessa propriedade é realizada por meio da determinação dos limites de Atterberg. Estes limites dependem de diversas propriedades das argilas, como a clivagem dos minerais (minerais com clivagem são mais plásticos, pois facilitam o deslizamento com a orientação da água) e sua morfologia (minerais lamelares são mais plásticos que os que têm clivagem perfeita) (SANTOS, 1989).

O limite de liquidez (LL) é o teor de água, em relação à argila seca, acima do qual a massa argilosa flui como um líquido quando agitada ligeiramente. A execução do ensaio para sua determinação segue os procedimentos estabelecidos na NBR 6459 (ABNT, 2016a).

Já o limite de plasticidade (LP) é resultante das forças de atração entre as partículas de argilominerais e a ação da água, que age entre as partículas como um lubrificante. Quando uma força tangencial é aplicada, há o deslizamento entre as placas de argilominerais (SANTOS, 1989). A presença de certos minerais, como a montmorilonita na argila tende a aumentar seu limite de plasticidade (GRIM, 1962).

A determinação da plasticidade de uma determinada massa argilosa tem como objetivo definir qual a deformação máxima que se pode alcançar até que se formem fissuras, isto é, até que se perca a umidade entre as partículas que a formam (HEINRICH; GOMES, 2014). No Brasil, a norma usada para mensurar este aspecto nas argilas é a NBR 7180 (ABNT, 2016b), que define o limite de plasticidade como a relação entre quantidade de água que provoca deslizamento entre as partículas de argilominerais e o percentual de argila seca.

A diferença entre os limites de plasticidade e o de liquidez é o índice de plasticidade (IP). Margem (2008) afirma que este valor não deve ser inferior a 10% para a produção de cerâmica vermelha, pois acarreta problemas durante a extrusão da peça, provocando trincas e mudanças de forma.

O limite de liquidez é ligeiramente maior que o de plasticidade e valores altos indicam que o material precisa de muita água para desenvolver a plasticidade. Deve-se observar que, a quantidade de água presente na argila é determinante para o processo de produção. Se por um lado, pouca água na mistura pode levar a complicações na extrusão da peça, por outro, o excesso de água pode tornar a massa plástica inconformável. Além disso, muita água também colabora para a redução da massa específica e a retração da gradativa do volume aparente da peça, onde os espaços antes preenchidos por água passam a ficar vazios após a secagem, influenciando também na sua estabilidade dimensional (BRAGA; SANTOS; SALES, 2016).

2.2.3 Composição granulométrica

Uma das características determinantes das propriedades do solo é sua granulometria. Por meio dela, somado a propriedades como plasticidade, é possível classificar determinado solo como argila, silte, areia, pedregulho, ou uma combinação entre estes.

A composição granulométrica de uma argila tem influência significativa em suas propriedades, inclusive verde, isto é, antes da calcinação, quanto após a calcinação. A presença de uma grande quantidade de finos torna a argila mais plástica, contudo, necessita de uma maior quantidade de água para desenvolver a plasticidade. Além disso, o teor de partículas finas dá a massa argilosa uma maior compactação, impedindo a passagem de água e causando retrações e deformações na peça seca (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

A granulometria também é fundamental no processo de sinterização. A sinterização se dá mediante o contato entre partículas com o aumento da temperatura e provoca aumento de resistência, condutividade térmica, transparência e translucidez (BROPHY; ROSE; WULFF, 1972).

Quando os grãos da argila são maiores, é preciso que haja cominuição do material, tendo em vista o aumento do contato entre os grãos necessários à sinterização da peça. Para tal, o material deve ter seu tamanho de grãos variando de 0,005 a 0,2 mm, uma vez que materiais mais finos são mais reativos quimicamente (HEINRICH; GOMES, 2014).

No caso das cerâmicas, é importante que haja uma distribuição granulométrica numa estreita faixa de valores e que os grãos sejam de preferência esféricos, facilitando a formação de poros, a fim de evitar a retração e fissura das peças durante a calcinação

(BROPHY; ROSE; WULFF, 1972). Heinrich e Gomes (2014), reforçam ainda que os grãos esféricos são mais eficazes no preenchimento de moldes para prensagem da massa cerâmica, tendo grãos lamelares ou resultantes de pulverização, superfícies rugosas e porosas, dificultando a fluidez da massa.

Desta forma, podem ser adicionados à massa cerâmica materiais desplastificantes, que possibilitem a saída de água por meio da produção de poros. Pracidelli e Melchiades (1997) afirmam que, adição de areia reduz a retração das peças e a quantidade de água de amassamento, mas pode afetar negativamente a resistência da cerâmica após a calcinação.

Além disso, a presença de areia aumenta a pressão necessária à extrusão das peças. Podem ser usadas areias com granulometrias entre 0,05 e 0,5 mm ou chamota (resíduo gerado da moagem de peças cerâmicas sinterizadas impróprias para comercialização), contudo, é preciso homogeneizar bem o material com a massa cerâmica além resfriar lentamente a peça quando esta contiver areia.

O diagrama Winkler (Figura 4) é um instrumento que determina o uso preferencial de uma argila a partir de sua distribuição granulométrica. Diversas propriedades se correlacionam com a granulometria para dar uma destinação adequada à argila, como o conteúdo de argilominerais, quartzo e teor de matéria orgânica, mas o diagrama apresenta uma orientação prévia de uso (LUZ; LINS, 2008).

O reconhecimento dos tamanhos das partículas de uma determinada amostra pode ser feito por dois métodos (LUZ, SAMPAIO; FRANÇA, 2010). No peneiramento, há a separação das partículas de acordo com suas dimensões geométricas, que são limitados superior e inferiormente por meio de uma série de aberturas de peneiras.

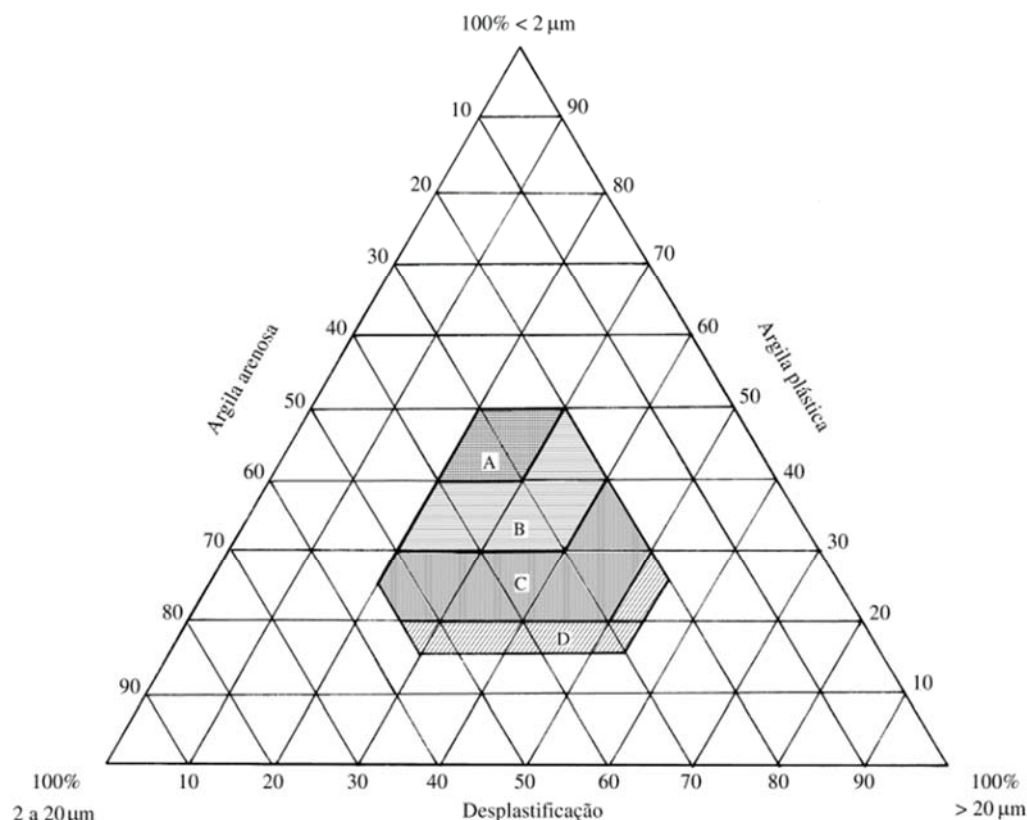
Na classificação, a separação por tamanho de partícula tem como base a velocidade que a partícula atravessa um meio fluido, com fundamento na lei de Stokes, em que a velocidade da partícula no meio é função do seu tamanho e massa específica, sendo base para o ensaio de análise granulométrica por sedimentação normatizado pela NBR 7181 (ABNT, 2016c).

Além destes, ainda existe o método de classificação por meio de analisador de tamanho de partícula a laser. Quando as partículas de uma amostra são inferiores à 0,045 mm, o método do peneiramento se torna ineficiente. As partículas tendem a se aglomerar devido

à força de *Van Der Waals*, gerando erros nos resultados (SCHNEIDER; NEUMANN; SOUZA, 2007).

Para tais casos, pode ser usado o analisador de tamanho de partícula (ATP) a laser. O equipamento *Malvern Mastersizer* se baseia na técnica de espalhamento de luz e é empregado com frequência na caracterização de pós. Este método é recomendado para partículas de 0,0001 a 3 mm e pode ser usado para fazer análises granulométricas de pós dispersos, como efluentes líquidos (FRANÇA; COUTO, 2007).

Figura 4 – Diagrama Winkler



Regiões Tipos de produto	Composição granulométrica (%)		
	2 µm	2 a 20 µm	20 µm
A: Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B: Telhas e capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C: Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D: Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: Pracidelli e Melchiades (1997).

A classificação de materiais como argilas e areias, são normatizadas pela NBR 6502 (ABNT, 1995). A Tabela 1 apresenta estes padrões.

Tabela 1- Classificação do solo segundo diâmetro de partículas

Material	Diâmetros de partícula (NBR 6502, ABNT, 1995)
Pedregulho grosso	20,0 – 60,0 mm
Pedregulho médio	6,0 – 20,0 mm
Pedregulho fino	2,0 – 6,0 mm
Areia grossa	0,60 – 2,0 mm
Areia média	0,20 – 0,60 mm
Areia fina	0,06 – 0,20 mm
Silte	0,002 – 0,06 mm
Argila	< 0,002 mm

Fonte: NBR 6502, ABNT, 1995.

2.2.4 Teor de orgânicos

Em argilas quaternárias, é comum o depósito de matéria orgânica decomposta entre as camadas sedimentadas, o que acentua a cor acinzentada da argila bem como sua plasticidade (MELLO *et al.*, 2011).

Uma das características da inclusão de orgânicos em cerâmica, é a formação de poros, com objetivos como redução da massa específica ou melhoria da resistência térmica da cerâmica. Em uma revisão sobre adições orgânicas em cerâmicas, Phonphuak e Chindaprasirt (2015) citam o exemplo da cinza da casca de arroz, composta de cerca de 90% e sílica e alto teor de orgânicos. A incorporação de cinza de casca de arroz em cerâmicas, produz um material poroso, cujos poros reduzem com o aumento da temperatura de calcinação, resultando em um corpo cerâmico com poros menores e que não são interconectados.

Nigay *et al.* (2017) estudaram as propriedades térmicas e mecânicas de cerâmicas produzidas com argila e adições orgânicas. Os autores utilizaram entre 4 e 8% de farinha de caroço de azeitona e palha de trigo misturados à argila para produção de corpos de prova de (180 × 80 × 18) mm calcinados a 950°C. Estes estudiosos verificaram que o uso de adições orgânicas aumenta o volume de poros na cerâmica, associado à massa específica da adição. Quanto menor a massa específica, maior o volume ocupado na massa argilosa, e maior o poro resultante na calcinação. Além disso, a presença de grãos menores nas adições orgânicas resulta em redução do tamanho médio de poros e uso dessa combinação provocou aumento de resistência em espécimes que usaram estas adições.

2.3 PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA

Após a mistura da argila e demais componentes com a água, o corpo cerâmico é moldado dando origem ao chamado corpo cerâmico verde. Este produto é o resultado da

moldagem, sem passar por nenhum processo de secagem e já precisa apresentar certas propriedades a fim de garantir a qualidade do produto.

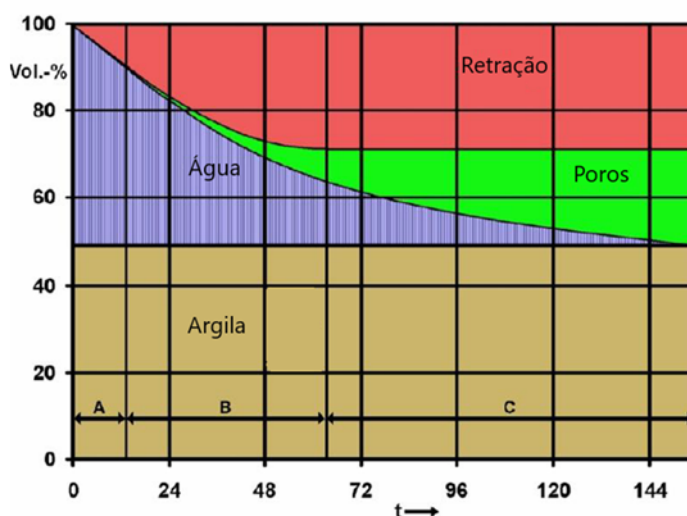
A resistência verde ideal (antes do processo de calcinação) é aquela que permite que o corpo seja manuseado, sem que haja alterações em sua forma. Essa resistência é provocada pelo processo de moldagem, que tende a organizar os agregados conforme suas orientações preferenciais. Além dos fatores conhecidos relacionados anteriormente que afetam as propriedades das massas cerâmicas, a presença considerável de minerais não argílicos reduz a resistência à verde. Também a presença de silte tende a reduzir esta propriedade (GRIM, 1962).

2.3.1 Processos térmicos

Antes da calcinação, as peças verdes devem passar por um processo de secagem. Na secagem, há aproximação das partículas de argilominerais e a saída da água, provocando retração na peça (HEINRICH; GOMES, 2014). Nesta etapa ocorre a remoção de toda a água que não faz parte da estrutura dos minerais.

A Figura 5 demonstra como se dá o comportamento da peça cerâmica, com relação à quantidade de água, poros e retração em função do tempo de secagem. Observa-se na imagem que a quantidade de água reduz com o tempo de secagem, aumentando a retração e o volume de poros. A partir das 72 horas de secagem, já não há aumento da retração da peça, apesar da redução do volume de água e aumento do volume de poros.

Figura 5 – Diagrama de secagem de Bourry para componentes de argila



Fonte: Adaptado de Heinrich e Gomes (2014).

Falhas na secagem podem comprometer a qualidade de peças cerâmicas em virtude da formação de fissuras e deformações. Silva Nascimento *et al.* (2019) afirmam que a taxa de difusão da água é maior na superfície que no interior do produto, provocando a secagem do exterior enquanto o interior ainda está úmido. A superfície das peças se torna inelástica provocando deformações e fissuras.

O tempo de secagem pode ser reduzido, induzindo o aumento da circulação de ar nas peças verdes, ou aumentando a temperatura. As condições de secagem devem estar em torno de 105 °C, por cerca de 5 horas, sendo a temperatura ideal aquela que não provoca fissuras nas peças. Esta temperatura pode variar ainda com o tipo de mineral presente, sendo os valores menores para caulinitas, ilitas, cloritas que para montmorilonitas e atapulgitas, por exemplo (GRIM, 1962).

Vasconcelos da Silva *et al.* (2020) afirmam ainda que, a taxa de variação da umidade aumenta com o aumento da temperatura de secagem, reduzindo o tempo de secagem de blocos cerâmicos. Contudo, essa combinação causa efeitos negativos nas peças. O estresse térmico provocado, provoca o aparecimento de fissuras e deformações, resultando em redução qualidade.

A presença de minerais não argílicos tende a reduzir o aparecimento destas fissuras, sendo desejável cerca de 25% destes minerais para redução da retração (GRIM, 1962).

2.3.1.1 Sinterização

A calcinação da argila é uma etapa necessária à sinterização da peça cerâmica. A temperatura para que ocorra a sinterização da cerâmica deve ser abaixo da temperatura de fusão da argila, provocando consolidação e retração da peça (HEINRICH; GOMES, 2014).

Apesar de temperaturas abaixo de 900 °C não serem recomendadas cientificamente, Monteiro e Vieira (2004), afirmam que diversas olarias no Brasil, comercializam produtos calcinados em temperaturas abaixo dos 600 °C. Em seus estudos, os autores observaram que argilas muito finas, tendem a ser muito plásticas em função da superfície de contato entre suas partículas. Essa característica, associada a uma morfologia de partícula em forma de discos, auxilia na consolidação das peças cerâmicas, contudo provoca elevados níveis de retração durante a calcinação. Os autores atribuem a

consolidação da estrutura de cerâmicas em temperaturas abaixo de 600 °C, produzidas com estas características, à desidroxilação dos minerais argílicos.

A recomendação da FIEMG (2013) é que o corpo cerâmico seja submetido a temperaturas entre 800 °C e 1000 °C, mas a maioria dos produtos cerâmicos são calcinados em temperaturas abaixo dessa faixa, produzindo uma cerâmica de alta porosidade aberta, com pouca fase vítrea, mas que alcançam a resistência suficiente para sua destinação (LUZ; LINS, 2008).

O material não deve atingir esta temperatura de forma abrupta, de modo a não provocar trincas e deformações indesejáveis. O processo de calcinação deve ocorrer nas seguintes etapas: aquecimento até a temperatura desejada; patamar durante certo tempo na máxima temperatura de calcinação, resfriamento a temperaturas inferiores a 200 °C (FIEMG, 2013).

Vieira, Ramos e Vieira (2007) verificaram que retração da cerâmica tem relação direta com a rampa de aquecimento a qual é submetida. A 10 °C/min, a retração ocorre em temperaturas maiores (1075-1175 °C), que a 1 °C/min (900 – 1250 °C), por exemplo. O aumento da temperatura de calcinação aumenta a massa específica volumétrica e reduz a porosidade, o que contribui para a sua resistência (YANG *et al.*, 2012)

Berdonosov *et al.* (2014) verificaram ainda que, essa densificação pode ser auxiliada pela presença de agentes de fundentes. Santana *et al.* (2017) afirmam também que a presença de Na₂O e K₂O favorecem a formação da fase líquida e reduzem a temperatura de fusão do sistema SiO₂-Al₂O₃. As alterações de forma que ocorrem no corpo cerâmico, durante a sinterização, têm relação direta com sua composição mineralógica. Por exemplo, a mudança de fase do quartzo-β para o quartzo-α a 573 °C, provoca aumento de volume. Além disso, há formação de novas fases, que conferem as características aos corpos cerâmicos.

Lee e Yeh (2008) estudaram como as diferentes condições de calcinação atuam no desenvolvimento das propriedades mecânicas de cerâmicas comerciais. Corpos de prova cerâmicos foram calcinados em temperaturas iguais a 900, 1000, 1100, 1200 e 1250°C, em duas taxas de aquecimento diferentes, 2 °C/min e 10 °C/min. Os autores concluíram que a temperatura de calcinação interfere em todas as propriedades da cerâmica, tais como, porosidade, massa específica, retração e resistência. Entre 900 e 1000 °C, não

houve variação significativa, mas em temperaturas maiores há aumento significativo de resistência, provocado pelo grau de vitrificação da cerâmica associado a uma baixa porosidade. A taxa de aquecimento de 10 °C/min mostrou melhores resultados, uma vez que inicia a densificação da cerâmica mais cedo.

A calcinação provoca mudanças estruturais que resultando em retração ou expansão volumétricas nas peças cerâmicas. Em altas temperaturas, favorece a formação de fases vítreas, resultando em um grande aumento de resistência mecânica (VASCONCELOS DA SILVA *et al.*, 2020).

Algumas transformações nos corpos cerâmicos são esperadas durante a calcinação. A Tabela 2 apresenta um resumo de como ocorrem estas transformações na maioria das cerâmicas em função da temperatura.

Tabela 2 – Transformações que ocorrem nos corpos cerâmicos em função da temperatura

Faixa de temperatura (°C)	Modificações esperadas	Particularidades de acordo com a argila
200 – 300	Oxidação de orgânicos ⁽¹⁾	Pode ser alterada em função do tipo de orgânico, do tamanho e textura dos grãos. Nesta etapa os gases liberados podem expandir e romper o corpo de prova.
250 – 300	Retração devido à decomposição do hidróxido de alumínio. Estabiliza-se em 500 °C ⁽²⁾ .	
400 – 500	Oxidação dos sulfetos ⁽¹⁾	Pode haver mudança nos parâmetros de rede da caulinita em função da perda das hidroxilas
573	Transformação alotrópica do quartzo (de β para α) ⁽²⁾ .	
600	Desidroxilação completa dos cristais de argila ⁽³⁾	Grãos menores e com baixa cristalinidade podem perder hidroxilas em temperaturas inferiores ⁽¹⁾
500 – 900	Perda do CO ₂ dos carbonatos ⁽¹⁾	
	Perda da estrutura da mica ⁽¹⁾	
1150	Formação da mulita ⁽²⁾ .	
1300–1500	Expansão típica da mulitização ⁽²⁾ .	
1900 – 2000	Fusão completa ⁽¹⁾	

Fonte: ⁽¹⁾ Adaptado de Grim (1962); ⁽²⁾ Sousa; Salomão e Arantes (2017); ⁽³⁾ Monteiro e Vieira (2004).

É importante lembrar que, essas modificações estão intimamente relacionadas com o tipo de argilomineral presente, podendo desenvolver diversas fases em altas temperaturas. Logo, quanto mais eficiente o processo de calcinação, com menores gastos de energia

para conseguir maiores temperatura, melhor as condições ambientais de produção da cerâmica.

Um exemplo é a formação da mulita. A mulita é a principal fase formada na cerâmica sinterizada, sendo a única fase intermediária estável no sistema alumina-sílica à pressão atmosférica. Esta pode ser rica em sílica, quando sua composição é $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (3:2 Mulita), ou rica em alumina, $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{SiO}_2$ (2:1 Mulita) (SHACKELFORD; DOREMUS, 2008). Esta fase é a responsável pela resistência de materiais a base de argila. Também a forma e tamanho da partícula influem na formação da mulita. Aripin *et al.* (2015) afirmam que a redução do tamanho de partícula facilita a formação de mulita a menos de 1400 °C. Contudo, em se tratando do quartzo, nem a redução do tamanho do grão impede que o excesso de quartzo sature a mistura.

2.3.1.2 Cor

A composição química e mineralógica de determinado solo usado na produção de cerâmica é responsável pela cor que o material adquire após a calcinação (FEITOSA, 2015). Um experimento realizado por Feitosa (2015) demonstrou que os teores de óxidos, sobretudo o óxido de ferro determinou a coloração avermelhada da cerâmica. Contudo, este óxido precisa fazer parte da estrutura mineralógica da matéria prima. Caso contrário, se o ferro for inserido na massa argilosa em forma de adição, a coloração avermelhada não se acentua. O autor também afirma que, a saturação da cor se acentua com o aumento da temperatura de calcinação.

As cores que as argilas apresentam após a calcinação, podem ajudar na classificação e destinação desta para determinado uso. O sistema de cores de Munsell tem sido usualmente empregado como uma forma de padronizar o reconhecimento de cores em solos e outros materiais de construção. O sistema possui cartelas de cores que variam de acordo com as relações entre as matrizes de cores (vermelha, amarela, verde, azul e roxa), luminosidade e saturação (MUNSELL SOIL COLOR CHARTS, 1994). A Tabela 3 mostra as cores apresentadas pela cerâmica vermelha após a calcinação em diversas temperaturas.

Milošević *et al.* (2019) realizaram uma caracterização mineralógica em diversas argilas de uma região da Sérvia. O parâmetro de coleta se baseou nas cores e profundidades encontradas em uma determinada região. A análise das cores das argilas *in loco* e após a calcinação a 1100 °C foi realizada com auxílio de sistema de cores Munssel (Figura 6).

As amostras 3 e 4, possuem maior teor de orgânicos, por volta de 15%, apresentando coloração mais escura. A amostra 6, de cor mais avermelhada, indica uma maior presença de ferro. Além do Fe_2O_3 , constituintes como MnO e TiO_2 são responsáveis pela alteração da cor do produto final. Após a calcinação, as argilas adquiriram colorações mais escuras associada a formação de hematita.

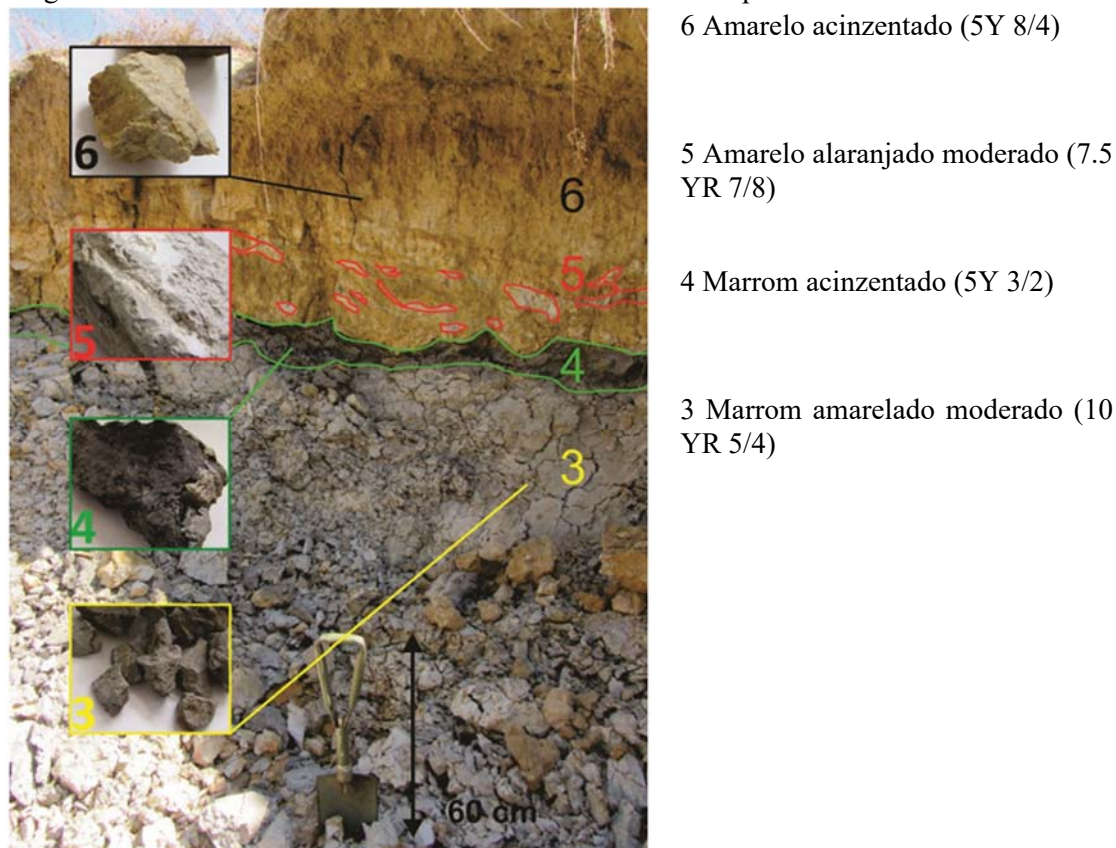
Tabela 3 – Cores dos corpos de prova segundo a temperatura usada na calcinação segundo Santos (1989)

Temperatura (°C)	Cores dos corpos de prova
110 °C	Vermelha, marrom, verde, violácea, creme, cinza, outras cores, exceto branca, vermelha alaranjada, marrom avermelhada, preta, cinza avermelhada;
950 °C	Vermelha com diversas tonalidades, amarela, marrom clara;
1250 °C	Creme amarelada, vermelha, vermelha escura, marrom escura, marrom clara e preta (S.Q.);
1450 °C	Marrom escura, preta, com ou sem perda de forma, cinza esverdeada (S.Q.), cinza escura, marrom escura, preta com fusão.

S.Q. – superqueima, ocorre quando há os corpos de prova apresentam um ou mais destes fatores: mudança brusca da cor vermelha para marrom escura ou preta, aparecem bolhas internas ou superficiais, os corpos de prova aderem entre si de modo que não é possível separá-los, há inchamento dos corpos de prova em virtude da formação de bolhas internas, há fusão dos corpos de prova em suas arestas ou totalmente.

Fonte: SANTOS, 1989.

Figura 6 – Horizontes do solo de Dobrodo e suas cores correspondentes no sistema Munsell



Fonte: Milošević *et al.* (2019).

2.3.2 Retração

Como foi visto anteriormente, a retração da peça cerâmica acontece em duas ocasiões: na secagem e após a sinterização. Existem alguns fatores que podem influenciar a retração após a calcinação, dos quais, se destacam (GRIM, 1962):

- A presença de alguns minerais na massa argilosa tende a provocar maior retração que outros. Por exemplo, a presença de montmorilonita, atapulgita e alofano, provocam maiores retrações que caulinita e illita;
- O aumento da retração é influenciado pelo tamanho e forma do mineral. Grãos menores e em forma de placas, provocam maiores retrações que os demais;
- A retração também é maior quando há maior quantidade de agentes fundentes, pois há uma maior formação de fases cristalinas. Por outro lado, reduz quando há uma quantidade considerável de quartzo;
- Não há relação direta com a quantidade de hidroxilas presentes;
- Por volta dos 500 °C a caulinita e halosita apresentam uma leve expansão, que pode influir na forma do corpo de prova. Também a presença de illita pode provocar expansão em temperaturas entre 450 e 800 °C, seguida por uma rápida e contínua retração. Já quando há montmorilonitas aluminosas, existem alterações dimensionais entre 500 e 800°C;
- Com relação à formação de fases, se houver formação de mulita e cristobalita, há uma rápida retração das peças produzidas.

Silva Nascimento *et al.* (2019) estudaram a variação volumétrica da cerâmica em relação à temperatura de secagem em prismas cerâmicos. Foram realizados ensaios com dois tipos de cerâmica em três temperaturas de secagem, 60, 80 e 110 °C. durante a secagem a água migra para a superfície das peças por difusão. Quando a temperatura é alta, esse movimento ocorre de forma brusca provocando deformações e fissuras na secagem. O estudo evidenciou a correlação entre temperatura de secagem e retração volumétrica para ambas as argilas. A evaporação da água é maior nos períodos iniciais, se reduzindo progressivamente com o tempo.

Apesar da pouca variação em termos volumétricos, Vasconcelos da Silva *et al.* (2020), afirmam que a temperatura de secagem da cerâmica tem relação com a formação de fissuras. Os autores estudaram a o comportamento de paredes de blocos cerâmicos

furados quando submetidos a temperaturas de secagem de 5 a 100 °C. Foi observado que, a 50 °C, houve formação de fissuras durante a secagem das peças, provocadas pela eliminação da umidade, que posteriormente foram reestabelecidas com o tempo de secagem, com variação volumétrica em torno de 15%. A 80 °C, também houve formação de fissuras, que não foram completamente reestabelecidas, havendo uma variação volumétrica de cerca de 20%.

De acordo com Cargnin *et al.* (2015) a retração volumétrica tem relação com a espessura e da peça cerâmica e com a temperatura e tempo de calcinação. Em seu experimento foram utilizados espécimes com duas espessuras diferentes, 7,8 mm e 2,3 mm, calcinados em temperaturas entre 300° e 110 °C. Os autores observaram que os espécimes com 7,8 mm apresentaram menores valores de retração linear que aqueles mais finos, uma vez que as áreas centrais não atingem a mesma temperatura que as áreas superficiais retardando as transformações físicas no material. A retração também teve relação com a temperatura de calcinação, havendo maiores valores em maiores temperaturas.

2.3.3 Absorção de água

Dentre as propriedades da cerâmica vermelha, a absorção de água é uma das principais uma vez que influi diretamente na qualidade da peça e consequentemente da edificação construída com estas.

Muñoz Velasco *et al.* (2016) revisaram estudos nos quais a argila foi substituída parcialmente por resíduos para produção de blocos cerâmicos. O estudo contemplou diversos resíduos os quais foram separados de acordo com sua natureza: lodos de esgoto, proveniente de estações de tratamento; cinzas, resultantes de processos industriais de incineração, adições inorgânicas, como resíduos de processamento de minérios, e adições orgânicas, coletados em processos industriais agrícolas ou de produção de papel e madeira. Os autores observaram os efeitos das adições nas propriedades das cerâmicas e verificaram que, em geral, há decréscimo na massa específica associado a um aumento de absorção, com exceção das adições inorgânicas. Um dos aspectos influentes para a redução da absorção de cerâmicas produzidas com adições inorgânicas é a alta massa específica dos resíduos.

Chiang, Chien e Hwang (2008) estudaram a substituição parcial de argilas por reservatório de sedimentos para produção de cerâmica. O resíduo de reservatório é composto majoritariamente de SiO₂ (70,14%), tendo uma composição química

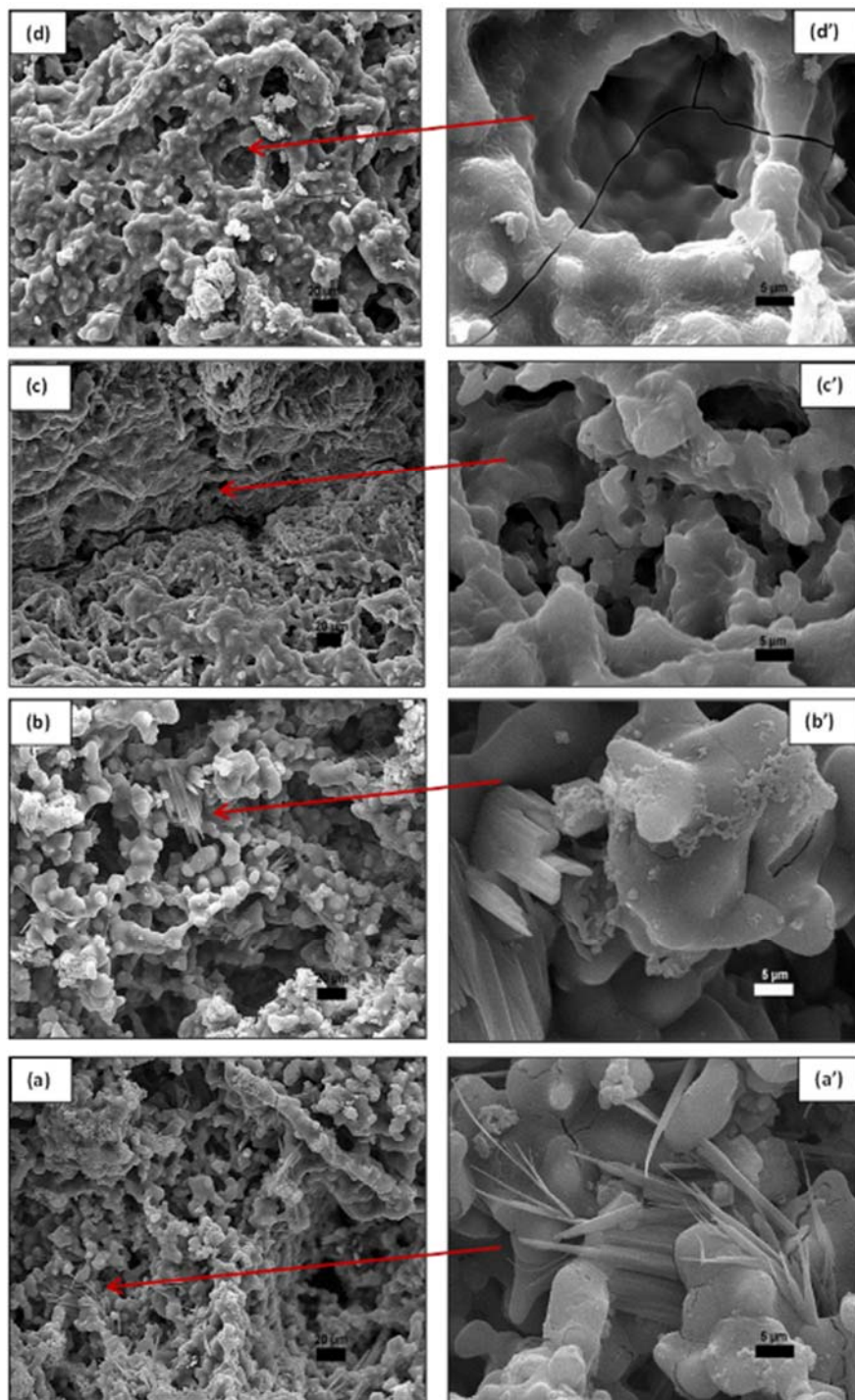
semelhante à argila usada no estudo. Foram usados percentuais de 0, 5, 10 e 20% de argila para a produção de corpos de prova calcinados em temperaturas de 1000 a 1150 °C. Com relação à temperatura de calcinação, os autores observaram as melhorias sobre as propriedades do material cerâmico, cresceram gradativamente com o aumento da temperatura até 1100 °C, tendendo à estabilização após isso. Com relação à absorção de água, houve redução da absorção com o aumento da temperatura e com a redução do teor de argila na massa cerâmica. Os resultados foram relacionados com a redução da porosidade aberta. Os autores observaram que o resíduo de reservatório provocou aumento de massa específica em relação às amostras contendo argila.

Rouabhia, Nemamcha e Moumeni (2018) realizaram um experimento para a produção de cerâmica porosa com base num sistema mulita-anortita-albita, substituindo parcialmente uma argila caulínica por duas adições: CaCO_3 e Na_2O_3 . Foram estudados corpos de prova usando de 0 a 70% de adições, calcinados a 1200 °C. Os autores observaram que, o quanto maior o teor de adições, maior a porosidade aparente e menor a massa específica dos corpos de prova. A Figura 7 demonstra que, o uso de 10 e 30% de adições apresenta uma maior densificação das peças, com poros menores e circulares, sendo observada a presença de cristais bem desenvolvidos de mulita. Por outro lado, o uso de 50 a 70% de adições provoca um material poroso, de forma irregular, ocasionando fissuras e fragilizando a cerâmica. A formação de CO_2 durante a calcinação das adições foi responsável por aumentar o volume de poros das cerâmicas e resultar no aspecto esponjoso.

Petterle *et al.* (2018) estudaram a formação de placas cerâmicas contendo argila caulínica, cinza da casca de arroz e lodo de ETA, em diversas proporções, calcinadas a 1300 °C. A cinza da casca de arroz é um resíduo rico em sílica. Já o lodo de ETA tem características variáveis de acordo com a qualidade da água bruta e do tipo de tratamento ao qual foi submetida. Os autores observaram que a adição da sílica melhorou as propriedades da cerâmica reduzindo sua porosidade e absorção de água e condutividade térmica, entre outros. Contudo, a adição do lodo de ETA gerou um material mais poroso e com absorção de água superior àquele com adição apenas da cinza. Os resultados referentes ao lodo de ETA foram relacionados com sua alta quantidade de matéria orgânica. Já as melhorias provocadas pela sílica são em função da maior fase vítrea encontradas nas micrografias do material em relação à amostra de referência. O quartzo

possibilitou a eliminação dos gases gerados durante a calcinação e os óxidos fundentes auxiliaram a densificação do material.

Figura 7 – Micrografia de uma cerâmica porosa após sinterização a 1500 °C. (a, a'): 90% de caulim, 5% de Na_2CO_3 e 5% de CaCO_3 ; (b, b'): 70% de caulim, 15% de Na_2CO_3 e 15% de CaCO_3 ; (c, c'): 50% de caulim, 25% de Na_2CO_3 e 25% de CaCO_3 ; (d, d'): 30% de caulim, 35% de Na_2CO_3 e 35% de CaCO_3



Fonte: Rouabhia, Nemamcha e Moumeni (2018).

Como foi visto, as propriedades dos corpos cerâmicos estão interligadas. A absorção de água pela cerâmica, fator fundamental em questões de durabilidade, está relacionada com a porosidade e massa específica, da mesma forma que o aumento da massa específica durante a calcinação indica a formação de novas fases que irão auxiliar a resistência mecânica.

2.3.4 Resistência à flexão

Para dar à argila uma resistência adequada, é preciso adicionar água em teores iguais ou superiores ao limite de plasticidade. A tensão de ruptura à flexão é a grandeza que melhor representa a resistência mecânica de uma argila seca (SANTOS, 1989).

Fatores como tamanho e forma do grão, tipo e teor de argila, bem como sua composição mineralógica da argila tem influência sobre a resistência mecânica de cerâmicas (VASCONCELOS DA SILVA *et al.*, 2020).

A composição mineralógica das argilas confere uma combinação para proporcionar trabalhabilidade da massa argilosa, com influência na resistência mecânica (LUZ; LINS, 2008). Santos (1989) cita que o aumento do teor de ilita abaixo de 2 mm aumenta a tensão de ruptura de argilas. Já o alto teor de montmorilonita tende a reduzir esta tensão, em virtude da contração dessas argilas durante a secagem.

Nas argilas, os carbonatos auxiliam a formação de novos compostos durante a calcinação, conferindo boa sinterização entre 950 e 1100 °C (MELLO *et al.*, 2011). Estes autores afirmam ainda que a presença de feldspatos na cerâmica facilita a formação de fases vítreas, reduzindo sua porosidade e aumentando a resistência.

Com relação à granulometria, a uniformidade no tamanho dos grãos que compõe a argila, dificulta o empacotamento da massa argilosa, resultando na baixa difusão durante a calcinação. Este comportamento afeta a resistência uma vez que provoca aumento da porosidade na cerâmica (REIS, 2015).

A resistência mecânica dos corpos cerâmicos é um resultado de suas demais propriedades, como porosidade e massa específica. Geralmente, características como baixa porosidade e alta massa específica, podem ser associadas à uma cerâmica resistente. Exceções, como cerâmicas porosas, produzidas com este fim podem ter comportamentos diferentes.

Zouaoui e Bouaziz (2017) estudaram a produção de cerâmica porosa a partir de misturas de argila com resíduos cerâmicos como, resíduos de peças cerâmica calcinadas e chamote, e areia. Até 30% da argila foi substituída e produzidos corpos de prova que foram calcinados em temperaturas entre 900 e 1100 °C. o experimento mostrou que houve redução da massa específica associado a um aumento de resistência quando a temperatura de calcinação aumentou. Apesar de tratar-se de uma cerâmica porosa, o aumento de temperatura contribuiu para a formação de anortita, resultando em densificação do corpo cerâmico.

Scribot *et al.* (2018) utilizaram resíduo de beneficiamento de bauxita como substituto parcial da argila na produção de material cerâmico. O resíduo estudado é rico em ferro e titânio, e seu descarte incorreto pode provocar sérios prejuízos ambientais. Os autores substituíram de 0 a 30% da argila por resíduo e produziram corpos de prova prismáticos que foram calcinados a 950 e 1015 °C. Os autores observaram que a incorporação do resíduo provoca aumento de massa específica e de resistência em temperatura acima de 1015 °C. Após 1000 °C houve redução de porosidade dos corpos de prova, provocado pelo surgimento de fases vítreas resultantes do aumento da temperatura.

2.4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 2

- Os componentes majoritários das argilas são SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A sílica é a principal responsável pela redução da plasticidade da massa argilosa. A alumina quando combinada com a sílica e outros minerais acelera a formação da fase vítrea, contribuindo para o aumento da resistência. O Fe_2O_3 provoca maior retração e absorção nas cerâmicas, mas também é responsável pela redução da temperatura de calcinação.
- O desenvolvimento da plasticidade em argilas está associado à sua mineralogia e composição granulométrica. A presença de minerais como quartzo e feldspatos reduzem a plasticidade, enquanto argilominerais, tais como caulinita e montmorilonita aumentam. A matéria orgânica também aumenta a plasticidade de argilas, contudo, favorece a formação de poros. Materiais com granulometria mais grosseira necessitam de menos água para desenvolver a plasticidade enquanto os solos mais finos precisam de mais água, o que pode prejudicar o processo de produção aumentar a quantidade de falhas em sua estrutura.

- A presença de agentes fundentes, ou agentes de fluxo, pode acelerar o processo de sinterização da argila, alcançando suas propriedades em temperaturas menores, sendo componentes como FeO, CaO, MgO, Na₂O e K₂O importantes neste processo.
- A calcinação da cerâmica deve acontecer após a etapa de secagem. Na etapa de secagem, a água de conformação, que não faz parte da estrutura da cerâmica é eliminada de forma a evitar trincas e falhas. A temperatura de calcinação precisa estar acima de 900 °C, contudo, estudos mostraram que é possível a formação de cerâmicas resistentes com calcinação a partir de 600 °C, com rampa de aquecimento de cerca de 10 °C/min. A formação de fases vítreas pode ser acelerada devido à presença de fundentes.
- A qualidade das cerâmicas está relacionada principalmente à sua retração, absorção e resistência mecânica, que, por sua vez, estão interligados. A retração está associada às transformações de fase dos minerais presentes na cerâmica. O aumento de retração pode provocar a formação de trincas, que provocam aumento de absorção e redução de resistência. A absorção de água tem relação com a massa específica da cerâmica e com sua porosidade. O excesso de orgânicos e de minerais que liberam gases durante a calcinação aumenta a porosidade aberta provocando fragilidade na cerâmica. A resistência da cerâmica é desenvolvida durante a calcinação e está relacionada à temperatura de calcinação e aos minerais presentes na matéria prima. A formação de anortita, hematita, mulita entre outros, aumenta a resistência da cerâmica
- A indústria da cerâmica vermelha é a principal fornecedora de materiais para alvenaria e lajes do Brasil, sendo a região Nordeste a terceira maior responsável pela produção do país. A extração da matéria prima provoca diversos danos ambientais e sua substituição por resíduos pode resultar em sustentabilidade para este setor econômico.

3 TRATAMENTO DE ÁGUA POTÁVEL E GESTÃO DE RESÍDUOS EM ETA

Garantir a boa qualidade da água é fundamental para o desenvolvimento da vida na terra. A preservação e o uso consciente da água têm sido frequentemente discutidos, uma vez que os recursos naturais são limitados, e as mudanças climáticas observadas no planeta tem afetado diversos ecossistemas.

No consumo humano, ainda há outra preocupação: a potabilidade da água. Isto é, a água tem que estar de acordo com certos parâmetros estabelecidos por órgãos competentes, de modo a não prejudicar a saúde dos seus consumidores. O mau saneamento está ligado a doenças como cólera, diarreia, disenteria, hepatite A, febre tifoide e poliomielite, sendo que, apenas a diarreia é responsável por cerca de 280 mil mortes por ano no mundo, interferindo ainda no atraso escolar, valorização imobiliária, meio ambiente e turismo (FREITAS; MAGNABOSCO, 2017)

Desta forma, o tratamento adequado de água, tem um papel fundamental na qualidade de vida da população, sendo necessários investimentos neste sentido. Estima-se que com investimentos em tratamento de água e saneamento, há um ganho de 1,5% do PIB global, além do retorno de US\$ 4,30 para cada US\$ 1,00 investido, devido à economia com serviços de saúde, mais produtividade e menos mortes prematuras (OMS, 2019).

O PLANSAB, promulgado em 2014 pela presidência da República, é um documento constituído por diagnósticos da situação atual do saneamento no Brasil, bem como estratégias para a integralização dos serviços por meio de obras e gestão das atividades de saneamento, projetando cenários para a efetivação desses projetos (BRASIL, 2019).

No diagnóstico relatado pelo plano foi considerado déficit os domicílios sem oferta de serviço e com atendimento precário. Foi constatado que 33,9% dos domicílios brasileiros têm atendimento precário e 6,8% não têm atendimento. A maior parte dos domicílios com abastecimento precário pertencem a pessoas com pouca escolaridade e cerca 70% ganham até meio salário-mínimo. Desta forma, se observa que, a população de baixa renda está vulnerável aos prejuízos provocados pela má qualidade do saneamento do Brasil.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, com dados de 2019, apontou que, apesar dos avanços em serviços de saneamento no país, o consumo médio de água tem reduzido nos últimos anos, fruto, principalmente, de políticas de conscientização do uso da água (SNIS, 2019). Na região Nordeste esta realidade é

diferente. Houve aumento do consumo em cerca de 1% em relação ao ano anterior, refletindo no abastecimento da região. A Tabela 4 apresenta os índices de abastecimento urbano de água no Brasil.

Tabela 4 – Índices e variação do abastecimento urbano de água por região do Brasil entre os anos de 2018, 2019 e 2020

Região	Índice de atendimento em abastecimento urbano de água com rede (%)		
	2018	2019	2020
Norte	69,6	70,4	72,0
Nordeste	88,7	88,2	89,7
Sudeste	95,9	95,9	96,1
Sul	98,6	98,7	98,8
Centro-Oeste	96	97,6	98,0
Brasil	92,8	92,9	93,4

Fonte: Adaptado do SNIS (2019), SNIS (2020) e SNIS (2021).

Segundo o SNIS, a partir de dados coletados em 2020, 93,4% da população urbana tem abastecimento de água. Este número aumentou em todas as macrorregiões, tendo o Norte e Nordeste retratado aumento da população atendida e de municípios que responderam ao SNIS. Apesar do aumento do índice de abastecimento urbano de água, houve redução do 1,2% do consumo entre os anos de 2019 e 2020, impulsionado pelos programas de boas práticas e monitoramento do fornecimento de água (SNIS, 2021).

Observa-se que, mesmo com a melhoria no sistema de fornecimento de água, ainda há uma importante diferença entre os índices observados nas regiões Norte e Nordeste e as demais regiões do Brasil. Este cenário mostra que ainda existem desafios a serem superados no abastecimento de água, e que as regiões Norte e Nordeste devem mostrar aumento de fornecimento e demanda nos próximos anos.

A capital pernambucana está longe da universalização do abastecimento em relação às outras capitais nordestinas, atingindo 89,5% das economias residenciais habitadas. Em 2011, apenas 42% da água consumida na Região Metropolitana do Recife (RMR) era tratada. Nos últimos anos, Pernambuco teve um crescimento acima da média nacional, havendo investimentos estratégicos para o crescimento nos próximos anos. A previsão da universalização do abastecimento de água na região estava prevista para 2014, mas até então ainda se concretizou (INSTITUTO TRATA BRASIL; FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS; INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA – IBRE, 2011).

O ranking dos 100 maiores municípios do Brasil em termos de população, tem revelado a lentidão com que os serviços de água, coleta e tratamento de esgotos avançam. No quesito atendimento total de água, o município de Jaboatão dos Guararapes, apresenta um dos piores índices, com um total de 74,5%, ficando na 93ª posição. Os municípios da RMR participantes da pesquisa: Recife, Paulista, Olinda e Jaboatão, figuram entre os piores desempenhos no ranking que trata de serviços relacionados à água e esgoto, 73ª, 81ª, 84ª e 94ª, respectivamente (OLIVEIRA.; SCAZUFCA; AROUCA, 2012).

Desta forma, ainda são necessários investimentos em saneamento, na RMR, a fim de disponibilizar este serviço a toda a população, sendo os serviços de tratamento de água indispensáveis ao bem-estar da sociedade. No geral, o crescimento populacional é a motriz para uma maior demanda por recursos hídricos (OMS, 2009).

Ainda é preciso investir para diminuir a intermitência no fornecimento, que ocasiona a busca da população por meios alternativos, como a perfuração de poços, que, geralmente não recebem nenhum tipo de tratamento, provocando o aparecimento de doenças tais como viroses e parasitoses (INSTITUTO TRATA BRASIL; REINFRA, 2018)

Sendo assim, ainda há perspectiva do aumento da demanda de água para consumo na RMR nos próximos anos, levando a crer que também haverá necessidade de investimento para o seu tratamento.

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

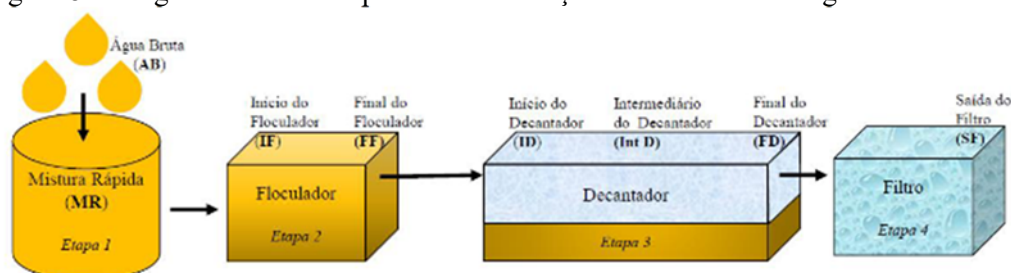
Para se obter água potável, dentro dos padrões aceitáveis de segurança, é preciso tratá-la a fim de remover impurezas. O tratamento de água é importante para fins higiênicos, removendo micro-organismos e compostos orgânicos; fins estéticos, como remoção de cor, sabor e cheiro e fins econômicos, reduzindo corrosividade, dureza, cor, turbidez e excessos de ferro, manganês, entre outros (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

A qualidade da água bruta, aquela que é retirada dos rios e destinada para o tratamento, varia de acordo com diversos fatores. Oliveira *et al.* (2021) destacam que fatores como idade e tamanho da estação de tratamento, tipo de coagulante, níveis de precipitação, entre outros, influenciam a qualidade da água e que os parâmetros de tratamento devem observar sempre os piores cenários. Quanto ao tamanho da estação, observou-se que estações de pequeno porte, tendem a produzir água com melhor qualidade, devido às

características da água bruta. Em períodos chuvosos, a água se torna mais turva, provocando a maior demanda de coagulantes no processo.

Em ambientes urbanos, cujo volume de água distribuído é elevado, a água passa por estações de tratamento de água (ETA), na qual são realizados processos físicos e mecânicos para promover a potabilidade da água. As estações de tratamento convencionais seguem diversas etapas, em geral, descritas na Figura 8 e detalhadas a seguir:

Figura 8 – Diagrama de Fluxo típico de uma estação de tratamento de água convencional



Fonte: Michelan *et al.* (2019)

Produtos químicos são adicionados à água, a fim de remover sólidos em suspensão. Os coagulantes são sais metálicos adicionados à água a fim de reduzir as forças que unem as impurezas e facilitar a aglomeração delas, possibilitando sua remoção (RICHTER, 2001). Um estudo desenvolvido por Zaman *et al.* (2021) demonstrou a ação de 4 tipos de coagulantes usados para produção de água potável. O sulfato de alumínio, policloreto de alumínio (PAC) e o cloridrato de alumínio tiveram seu desempenho contestado frente à Quitosana, produto de origem orgânica. O estudo demonstrou que o cloridrato de alumínio se mostrou o mais eficiente dentre os três para redução da turbidez, mas que o excesso de coagulante provoca o efeito contrário, dispersando as partículas em vez de aproximá-las.

A água com o coagulante adicionado passa por câmaras de mistura rápida, a fim de promover a dispersão do produto. Este processo resulta na formação de flocos, que decantam por ação da gravidade a fim de serem removidos. A este resíduo, dá-se o nome de lodo de estação de tratamento de água e ele possui as características da água bruta e do coagulante que foi utilizado.

Após este processo, a água ainda passa por um filtro, onde são removidos materiais particulados e micro-organismos que possam resultar em algum risco. Existem modelos

de ETA que utiliza a filtração como o principal agente para tornar a água potável. Neste sistema, é usada uma ultrafiltração. É um modelo de implementação com o custo maior que o convencional, mas tem bons resultados em termos de eficiência e geração de resíduos. Uma vez que não há emprego de coagulantes, o resíduo fica livre de contaminação por alumínio, evitando prejuízos ao meio ambiente (CHEW *et al.*, 2016). A filtração também gera o lodo de ETA, que posteriormente é coletado e segue para a etapa de desidratação.

3.2 RESÍDUOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Segundo a Resolução CONAMA 313 (BRASIL, 2002) o resíduo sólido industrial é todo aquele que resulte de atividades industriais, em estado sólido, semissólido, gasoso sem situação de contenção e líquido “cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”. Dentre estes se enquadram os resíduos oriundos de tratamento de água (ETA).

O resíduo se apresenta como um líquido não newtoniano e gelatinoso, cujos sólidos são compostos do produto do defloculante utilizado, partículas orgânicas, bactérias, entre outros removidos no processo de coagulação (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

A quantidade e qualidade do lodo se relaciona com o período do ano, uma vez que está associado à turbidez da água. Ahmad; Ahmad e Alam, (2017) realizaram um experimento para quantificar o lodo gerado em uma ETA localizada na cidade de Ghaziabad, na Índia. Nesta ETA, a água passa por um processo de tratamento convencional e usa o PAC como coagulante. Os autores verificaram que a geração de lodo está associada ao ingresso de água, ao teor de alumínio que compõe o coagulante, ao total de sólidos suspensos e ao teor de outras adições usadas no tratamento da água, como polímeros e carbono ativado.

Segundo Brandt *et al.* (2017), o volume de lodo gerado representa de 1,5 a 2,5% do volume de água tratada, sendo o teor de sólidos cerca de 0,3% deste percentual. Logo, a maior parte do lodo resultante do processo de tratamento de água é líquido e deve ter seu volume reduzido, por meio de desidratação, de modo a ser transportado para sua destinação final.

Existem alguns métodos usados em ETA que auxiliam na desidratação do lodo. Os leitos e lagoas de secagem consistem em escavações que formam lagoas rasas, onde a secagem

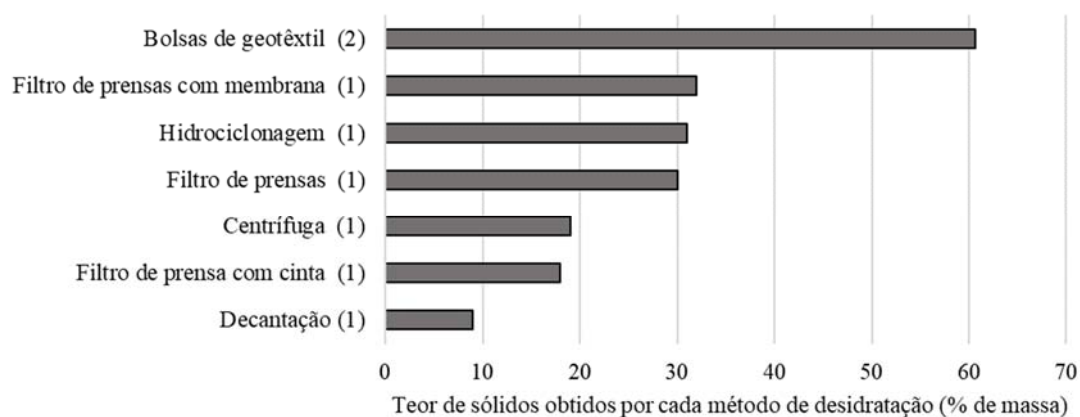
do lodo ocorre por percolação e evaporação (BRANDT *et al.*, 2017). Deve haver diversos leitos de secagem para o bom funcionamento do processo. O resíduo é despejado em um leito e inicia seu processo de espessamento. Quando há novo lançamento de lodo, este deve ser direcionado para a outra lagoa de modo a não atrasar o processo de secagem. A secagem dura entre 3 semanas e 1 ano, podendo ser retratada em caso de chuvas, e após isto o lodo pode ser removido por meio de pás carregadeiras (RICHTER, 2001).

Estes métodos de desidratação não mecânicos são recomendados quando não há limitação de área para construção de lagoas e quando as condições climáticas são favoráveis, isto é, não há alta umidade relativa do ar e precipitação elevada (FROTA, 2020).

Outros métodos funcionam de forma mecânica, com a utilização de equipamentos que permitem a eliminação da água por meio de prensagem do lodo, centrifugação, entre outros. Em geral, estes métodos carecem energia para seu funcionamento, além de requerer manutenções periódicas e poderem apresentar algum prejuízo em seu funcionamento devido a variações nas características do lodo (FROTA, 2020).

Senfter *et al.* (2021) apresentaram um gráfico relacionando o método de secagem com o percentual de lodo seco gerado (Figura 9). Os autores observaram que a simples decantação é menos eficiente e que os melhores modelos apresentam algum mecanismo e insumos que facilitam a secagem. Em geral, a eficiência do processo de desidratação do lodo passa por um aumento de gasto energético, e sua escolha depende das condições físicas e financeiras da ETA.

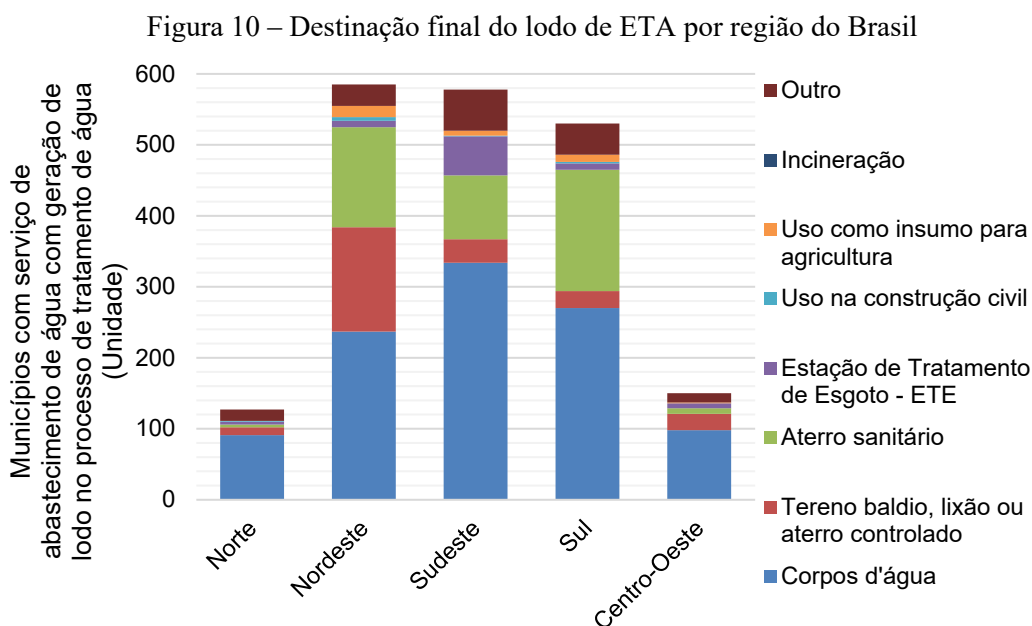
Figura 9 – Relação entre métodos de secagem e teores de sólidos resultantes



Fonte: (1) Adaptado de Senfter *et al.* (2021); (2) Ardila *et al.* (2020).

3.2.1 Disposição final dos lodos

Segundo a Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (IBGE, 2020), a maior parte dos resíduos gerados no tratamento de água, têm como destino os corpos d'água (Figura 10), seguido pelo lançamento em terrenos baldios e disposição em aterros. Observa-se que pouco se tem reaproveitado este resíduo, uma vez que sua representação é mínima em todas as regiões onde há informações sobre a geração de lodo.



Fonte: PNSB 2021 (IBGE, 2020).

Estudos recentes têm apontado possíveis destinações para o aproveitamento do lodo de ETA. Dentre estes, o uso em solos agrícolas, recuperação de áreas degradadas e produção de insumos da construção civil.

A depender das características do solo e das espécies vegetais, a disposição do lodo em solos agrícolas pode trazer benefícios ao desenvolvimento das plantas como adição de minerais e aeração do solo (CUNHA *et al.*, 2019). Contudo, o excesso de alumínio no lodo, em virtude do tipo de coagulante empregado, provoca a deficiência de fósforo e cálcio, resultando em raízes curtas, grossas e quebradiças, logo, pouco eficientes na absorção de água e de nutrientes do subsolo (FERREIRA, MOREIRA; RASSINI, 2006).

Boscov *et al.* (2021) realizaram um estudo para investigar a possibilidade do uso de lodo em misturas com solos para aplicações geotécnicas. Foram selecionados dois solos lateríticos e misturados em diversas proporções com cal, pó de pedra e lodo de ETA. Os

autores observaram que as misturas com cal e pó de pedra podem ser usadas em solos com baixas tensões de solicitação. Para terraplenagem, a adição do lodo resultou em redução da tensão de cisalhamento, sendo este material pouco indicado para este uso. O estudo propõe ainda que sejam estudadas tanto as características do solo a ser melhorado quanto o lodo, para que não haja contaminação do solo.

Moreira *et al.* (2009) afirmam que a aplicação do lodo em solos eleva os teores de macronutrientes e o valor do pH. Este resíduo pode ser empregado na recuperação de áreas degradadas, desde que existam características geológicas e hidroquímicas semelhantes, sendo observado, ainda, que a disposição de lodo nestes locais teve pouco impacto sobre a água subterrânea.

Em uma revisão da literatura realizada por Gomes *et al.* (2019), foram avaliados os diferentes tipos de lodo de ETA, em função do coagulante usado no tratamento, e suas aplicações em materiais de construção tais como blocos cerâmicos, *pavers*, agregados leves, cimento, concreto e geopolímeros. Os autores elencaram dificuldades para a difusão do uso de lodo relacionadas com a variabilidade do resíduo. O uso de lodo de ETA em materiais de construção geralmente resulta em aumento da absorção de água provocado pelo alto teor de orgânicos, o que provoca perda de qualidade e durabilidade. Contudo, os autores apresentam limites de substituição dos materiais convencionais por cerca de 10% de lodo na produção de cerâmica e 5% dos agregados miúdos na produção de concreto.

3.3 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 3

- Para tornar a água potável, são necessários diversos processos, demandando o uso de coagulantes e outros compostos químicos, que irão definir a qualidade final da água.
- O resíduo que resulta do tratamento, é denominado lodo de ETA, e possui as características da água bruta e dos compostos usados no tratamento. Uma vez que há expectativa do aumento do consumo de água pela sociedade brasileira, tendo em vista um déficit do abastecimento atual, espera-se que haja aumento da geração deste resíduo.
- A maior parte do lodo de ETA ainda é descartada em corpos hídricos, contudo, opções para reciclagem e reaproveitamento têm sido estudadas. Dentre as

possíveis formas de uso do lodo têm-se a aplicação em solos agrícolas, recuperação de áreas degradadas e produção de insumos da construção civil.

- O reaproveitamento do lodo precisa ser estudado em cada caso, uma vez que se comporta de forma diversa de acordo com o material ao qual é incorporado e tem encontrado barreiras na variabilidade de sua composição.

4 CERÂMICA VERMELHA PRODUZIDA COM LODO DE ETA

Como foi observado, as propriedades das cerâmicas estão relacionadas diretamente com suas composições química, mineralógica e granulométrica, entre outros. Tendo em vista a alta geração de lodo de ETA e a dificuldade de destiná-lo corretamente, alguns estudos foram desenvolvidos, substituindo parcialmente a argila convencional por lodo.

Neste capítulo serão descritos estudos já desenvolvidos com este propósito, evidenciando as características do processo produtivo da cerâmica em sua qualidade final. Alguns textos não tratam exclusivamente da adição de lodo de ETA, mas os materiais adicionados podem auxiliar no desenvolvimento das características das cerâmicas em função de suas propriedades.

4.1 CERÂMICAS PRODUZIDAS COM LODO DE ETA

Teixeira *et al.* (2006) avaliaram o efeito da incorporação de lodo de ETA do Município de Presidente Prudente, em massas cerâmicas usadas para produção de tijolos. Os autores atentaram para os efeitos dos diferentes flocculantes utilizados (sulfato de alumínio e cloreto férrico). Os autores produziram corpos de prova de $60 \times 20 \times 5$ mm, incorporando de 0 a 20% de lodo. Os corpos de prova foram calcinados em temperaturas de 850 a 1150 °C e avaliadas suas propriedades físicas e mecânicas. Os autores concluíram que a adição de lodo sempre provoca pioras nas propriedades da cerâmica, com redução de resistência, aumento de absorção e redução da massa específica. Os resultados dos corpos de prova usando lodo tratado com sulfato de alumínio foram piores que os com lodo com cloreto férrico em todas as temperaturas estudadas. O uso de até 15% de lodo é aceitável conforme as normas técnicas observadas pelos autores.

Monteiro *et al.* (2008) avaliaram a temperatura de calcinação cerâmicas produzidas a partir de misturas de argila caulinitica e lodo de ETA. Os autores produziram corpos de prova de $115 \times 25 \times 10$ mm, com a adição de até 10% de lodo, calcinados em temperaturas de 700 a 1100 °C e observaram que as composições químicas semelhantes do lodo e da argila estudados podem ter reduzido as tensões residuais geradas na calcinação. Não houve influência da temperatura entre 700 e 850 °C, mas a calcinação a 1100 °C resultou em cerâmicas menos porosas e mais resistentes. Contudo, os autores concluíram que o lodo sempre provoca redução da resistência mecânica, e que seu uso deve limitar-se a pequenas quantidades.

Oliveira e Holanda (2008) estudaram a influência do lodo na microestrutura da cerâmica. Os autores utilizaram o lodo seco, moído e peneirado, passante na peneira 0,452 mm. Os corpos de prova de $115 \times 25,4 \text{ mm}^2$ foram produzidos com percentuais de lodo de até 15%, umedecidos com 7% de água. Os exemplares foram calcinados em temperaturas que variaram de 850 a 1050 °C. Os autores observaram que o lodo introduziu na mistura partículas inferiores a 0,002 mm, aumentando a plasticidade da massa argilosa. A calcinação a 1050 °C provocou a dissolução parcial do quartzo presente nos materiais, resultando em formação de fase vítrea. Os autores concluíram que a incorporação de até 15% de lodo não provocou efeitos significativos na microestrutura da cerâmica e nem em suas propriedades físicas e mecânicas.

Paixão *et al.* (2008) estudaram a produção de cerâmicas com lodo com alto teor de ferro. O lodo, tratado com cloreto de ferro, foi seco em estufa, foi moído até a fração passante na peneira 0,84 mm. Os autores usaram 10% de água e substituíram até 10% da argila por lodo. Com o objetivo de aumentar a resistência mecânica das cerâmicas produzidas, os autores beneficiaram o lodo, resultando em duas amostras: uma calcinada a 1000°C e outra moída até a fração passante na peneira 0,075 mm. Foram produzidos corpos de prova com 5% deste lodo beneficiado. Corpos de prova com dimensões iguais a $5,5 \times 20,5 \times 61,1 \text{ mm}$, foram calcinados em temperaturas que variaram de 950 a 1050 °C. Os autores concluíram que o uso de 2 a 5% de lodo, reduz a resistência mecânica da cerâmica em cerca de 30%. As observações realizadas por MEV, relataram a baixa interação entre lodo e argila, provocando microfissuras ao redor das partículas de lodo identificadas na microscopia. Os autores verificaram que o uso do lodo beneficiado provocou menos alterações nas cerâmicas com relação às amostras de referência. O uso de grãos menores reduziu as micro trincas, mas ainda houve baixa interação entre lodo e argila. Os autores afirmaram que a calcinação do lodo aumenta sua estabilidade dimensional e química após a calcinação, e sugerem que haja combinação entre moagem e calcinação para aumentar o potencial de uso do resíduo.

Vieira, Margem e Monteiro (2008) observaram as alterações microestruturais em cerâmicas produzidas com 10% de lodo de ETA, com temperatura de calcinação igual a 700 °C. Os autores afirmaram que o lodo tem efeito deletério na cerâmica em função da perda de matéria orgânica durante a calcinação, uma vez que provoca aumento de fraturas, poros e trincas nas cerâmicas com incorporação de lodo. Os autores recomendam o uso de fundentes, para reduzir a perda de massa, além de sugerir a calcinação do lodo.

Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) estudaram o uso de lodo de ETA obtido em diferentes etapas do sistema de tratamento: desarenação, decantação e filtração. Nos experimentos, até 10% de argila caulínica foi substituída por lodo de ETA. Os autores produziram corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual a 20,1 mm e os calcinaram a 700 °C. De acordo com o DRX, os resíduos de decantação e filtração são mais semelhantes à argila. O resíduo proveniente do desarenador provocou menor absorção e retração linear, evidenciando este resíduo como o de maior potencial de utilização. Dentre os três, o resíduo do filtro provocou maior absorção de água, contudo, todos eles resultaram em redução da resistência mecânica.

Tartari *et al.* (2011 a, b) estudaram as propriedades do lodo gerado em uma ETA em foz do Iguaçu e sua incorporação em argilas para produção de cerâmica vermelha. O lodo usado pelos autores apresentou uma elevada perda ao fogo, cerca de 20%, não sendo recomendado como elemento majoritário na produção de cerâmica em função do seu caráter desplastificante. Os experimentos para avaliação das propriedades físicas e mecânicas da cerâmica produzidas foram realizados por meio de corpos de prova de 80 × 35 × 7 mm, com percentuais de lodo que variaram de 4 a 16%. Os autores observaram que a água de composição do lodo auxiliou na interação entre os argilominerais, reduzindo a necessidade de água adicionada. Duas temperaturas de calcinação, 950 e 1050 °C, foram empregadas. Os resultados mostram que a adição de lodo à cerâmica provoca redução de resistência em qualquer quantidade e que percentuais acima de 8% de lodo resultaram em trincas e deformações na cerâmica.

Torres, Hernández e Paredes (2012) estudaram a substituição da areia empregada na produção de cerâmica de revestimento por lodo de ETA. Neste experimento, os autores usaram 75% de argila e 25% de areia, que foi substituída por teores entre 10 e 100% de lodo. Foram produzidos corpos de prova com dimensões iguais a 40 × 40 × 80 mm, calcinados a 900 °C. Os autores observaram que o lodo tem características pouco plásticas e parcialmente coesivas, semelhantes à areia, contudo, a substituição da areia por lodo resultou em aumento da absorção de água e redução da resistência à compressão, recomendando-se a sua limitação a 10%.

Reis *et al.* (2014) avaliaram as propriedades de corpos de prova cerâmicos produzidos com teores que variaram de 2 a 10% de lodo de ETA. O lodo obtido em uma ETA em São Francisco do Sul, foi seco e moído até passar na peneira 0,180 mm. Para conformação

dos corpos de prova de $30 \times 70 \times 7$ mm, foi adicionado 8% de água. Os corpos de prova foram calcinados em temperaturas de 850 a 1050 °C. Os autores observaram que houve aumento de resistência quando adicionado 2,5% de lodo nos corpos de prova calcinados a 950 °C. Não houve alterações significativas na densidade aparente dos espécimes, mas houve aumento da absorção de água e porosidade da cerâmica com a adição de lodo. Os ensaios de MEV mostraram que houve interação entre o lodo e a cerâmica, indicando formação de fase vítrea na interface dos grãos. Os autores concluíram que é possível a incorporação de até 10% de lodo e que sua adição favorece a fusibilidade da cerâmica durante a calcinação.

Kizinievič *et al.* (2013) utilizaram lodo proveniente de estações de tratamento na Lituânia para produção de cerâmica. A água local é rica em ferro, resultando em um lodo com estas características. Os autores produziram corpo de prova de $70 \times 70 \times 70$ mm, com teores de lodo entre 5 e 40%, calcinados entre 1000 e 1050 °C. Os resultados apresentados mostram que o uso de até 10% de lodo resultou em redução de absorção e aumento de densidade e resistência. Os autores verificaram que o uso de 40% de lodo em cerâmicas calcinadas entre 1000 e 1050 °C resulta em um material com baixa condutividade térmica, em função da sua alta porosidade.

Agostini (2014) avaliou a variabilidade do lodo de acordo com seu período de coleta, e sua influência na cerâmica produzida. O autor coletou o lodo em três períodos do ano e o misturou à um tipo de argila para produção de cerâmica. Foram produzidos corpos de prova de $86 \times 27 \times 18$ mm, com 5% de lodo, calcinados em temperaturas entre 800 e 1050 °C. Foi observado o aumento de retração e da resistência e redução da absorção com o aumento da temperatura de calcinação. O lodo provocou piora das propriedades da cerâmica. O autor verificou que o tempo de limpeza dos decantadores e a quantidade de floculante usado interfere na composição do lodo. O uso de CaO durante a desidratação também interferiu nas propriedades da cerâmica. O autor jogou 800 °C como a melhor temperatura de calcinação, uma vez que foi suficiente para manter a qualidade da cerâmica.

Martins (2014) estudou a influência da variação dos coagulantes nas propriedades das cerâmicas produzidas. O autor estudou lodos provenientes do tratamento de água com policloreto de alumínio (PAC) e com sulfato de alumínio. Para produção da cerâmica, o lodo foi seco ao ar e posteriormente moído, sem controle do tamanho de grão. Foram

produzidos corpos de prova de $60 \times 20 \times 5$ mm, com teores de lodo variando de 10 a 30%, calcinados em temperaturas de 900 a 1200 °C. O autor relatou que não foi possível formar corpos de prova com 30% de lodo, devido à baixa coesão entre os materiais. Concluiu-se que o uso de lodo de ETA piora a qualidade da cerâmica, contudo, o uso de lodo com PAC tem melhores resultados.

Medeiros *et al.* (2014) realizaram um experimento incorporando cinzas da casca de arroz, lodo de ETA e cinza de lenha à massa argilosa para produção de cerâmicas de revestimento. Foram produzidos corpos de prova de $60 \times 20 \times 5$ mm, com espécimes compostas de 95% de argila e 5% de lodo, 75% de argila e 25% de cinza de lenha, e 83,33% de argila, 8,33% de cinza da casca de arroz e 8,33% de cinza de lenha. Os autores avaliaram critérios de absorção e resistência dos corpos de prova calcinados em temperaturas de 1000 a 1150 °C. As amostras com 25% de cinza de lenha resultaram em maior absorção e menor resistência que as demais. Com relação ao lodo de ETA, os autores observaram que houve ganho de resistência com o aumento da temperatura, principalmente entre 1000 e 1100 °C. Concluiu-se que o uso de 5% de lodo de ETA em corpos de prova calcinados entre 1100 e 1150 °C, produz cerâmicas classificadas como semi-porosas, com propriedades satisfatórias.

Silva (2014), utilizou lodo gerado na etapa de decantação para a produção de tijolos cerâmicos maciços. O autor produziu corpos de prova de $80 \times 20 \times 5$ mm, com teores de lodo de 5 a 25% e 8% de umidade. Os corpos de prova foram calcinados a 950 °C. O autor verificou que a adição do lodo gera aumento da porosidade e reduz a massa do corpo de prova. O uso de até 15% de lodo foi considerado viável uma vez que após isso houve problemas com a resistência mecânica.

Benlalla *et al.* (2015) propuseram o uso de lodo de ETA para a produção de blocos cerâmicos estruturais. O lodo usado pelos autores, obtido no Marrocos, é rico em Al_2O_3 , representando cerca de 60% de sua composição. Após a coleta, o lodo foi seco e moído até a fração passante na peneira 0,6 mm. Foram produzidos corpos de prova com $80 \times 30 \times 20$ mm, com teores de lodo de 5 a 30%, calcinados em temperaturas entre 800 e 1000 °C. Os autores observaram que os diferentes teores de lodo não alteraram a plasticidade da cerâmica, sendo as misturas obtidas altamente plásticas. O aumento do teor de lodo provocou aumento de absorção de água e de retração, redução de resistência, resultando

em corpos cerâmicos porosos e com baixa densidade. O uso de 20 a 30%, com temperatura de calcinação entre 900 e 930 °C foi recomendado pelos autores.

Lima (2016) realizou um estudo para a aplicação de lodo de ETA na produção de telhas cerâmicas. O lodo foi coletado de bags de desidratação e misturadas à uma argila coletada em uma olaria na cidade de Palmas. O autor moldou telhas usando 10% de lodo. Os resultados mostraram que o lodo provocou fissuras e deslocamento nas telhas produzidas, resultando num aumento da absorção de água e redução da resistência à flexão. O autor concluiu que o lodo empregado no experimento tem alto teor de areia, agindo como desplastificante da argila, além de um alto teor de orgânicos. Logo, não é recomendado para produção de telhas cerâmicas.

Rodrigues (2016) preparou pisos cerâmicos vitrificados com substituição parcial da matéria prima convencional por lodo de ETA. Os materiais utilizados no experimento foram caulim, feldspato sódico, quartzo e resíduo de ETA, moídos em moinho de bolas até a fração passante na peneira #325 (0,045 mm). Por ser rico em caulinita, o lodo substituiu o caulim na mistura, em diversas proporções. Foram elaborados corpos de prova com dimensões iguais a $115 \times 25,4 \times 7,5$ mm, com percentuais de lodo de 0 a 10%, calcinados em temperaturas entre 1190 e 1250 °C. A adição de lodo provocou o aumento da retração e redução da absorção de água. Observou-se que o lodo aumentou a massa específica e a resistência da tensão de ruptura dos corpos de prova. A autora concluiu que o lodo não alterou significativamente as propriedades da cerâmica, sugerindo que é possível a substituição de 10% do caulim por lodo.

Santos (2016) estudou o uso de lodo de ETA na produção de blocos cerâmicos. O lodo usado pelo autor foi coletado em leitos de secagem, na cidade de Alvorada-RS. O autor produziu corpos de prova em uma olaria, em forma de blocos de 6 furos, com $190 \times 140 \times 190$ mm, com teores de lodo variando entre 5 e 20%. Os blocos foram calcinados a 900 °C por três dias. Foi observado que o uso de 20% de lodo impediu a extrusão dos blocos, fragmentando-os durante o processo. O autor verificou aumento da absorção e redução da resistência mecânica, recomendando o uso de até 10% de lodo.

Tantawy e Mohamed (2017) estudaram a incorporação de lodo de ETA em blocos cerâmicos, com o objetivo de produzir blocos resistentes, com boa qualidade térmica e leves. O lodo coletado pelos autores foi seco em estufa e moído em moinho de bolas até ficar em forma de pó. Foi adicionado 10% de água para produção de corpos de prova com

250 × 120 × 65 mm, com teores de 15 a 60% de lodo de ETA. Os corpos de prova foram calcinados em temperaturas entre 700 e 1000 °C. Os autores verificaram que houve redução de densidade e aumento da porosidade com o aumento do teor de lodo. As propriedades melhoram quando há aumento da temperatura de calcinação, mas a substituição da argila provoca redução na formação de fase vítrea durante a calcinação. Os autores afirmam que o teor de lodo entre 15 e 30% produzem blocos com qualidade aceitável.

Mymrin *et al.* (2017) realizaram experimentos onde o lodo de ETA foi o componente majoritário na produção de cerâmicas. Os autores propuseram misturas entre o lodo, resíduos de vidro, sais de neutralização (usados em baterias) e areia argilosa em diversas proporções. Foram realizados experimentos com corpos de prova de 60 × 20 × 10 mm, calcinados em temperaturas entre 900 e 1100 °C. Quanto aos resíduos, observou-se que os sais e o lodo apresentaram alta perda ao fogo, devido ao alto percentual de SO₃ e à matéria orgânica presente, respectivamente. Os autores verificaram que os metais pesados encontrados nos sais foram neutralizados após a calcinação. A menor resistência foi observada na amostra com 50% lodo + 15% vidro + 15% sais + 20% argila, e a maior na amostra com 50% lodo + 25% vidro + 25% sais. Os autores afirmaram que o lodo pode substituir a argila plenamente, quando a calcinação ocorrer em temperaturas acima de 950 °C. A amostra com maior resistência também possuía a maior densidade, maior absorção e maior retração. A calcinação a 1100 °C resultou em cerâmicas pouco porosas com aspecto vítreo. Os autores concluíram que os resíduos urbanos podem atuar como elementos complementares para produzir novos materiais. Enquanto a cerâmica comum, calcinada a 1100 °C apresentou até 8,2 MPa, a formada apenas com resíduos atingiu 20,2 MPa.

Cremades, Cusidó e Arteaga (2018) utilizaram lodo de ETA para produção de cerâmica de revestimento. Os autores utilizaram o método de *spray-drier* para atomização do lodo. Após o processo, o lodo ficou amarelado e com maior percentual de grãos na faixa do silte. Foram produzidos corpos de prova retangulares com 70 × 10 × 10 mm, com teores entre 20 e 70% de lodo atomizado e argila, empregando água suficiente para a extrusão. Os corpos de prova foram calcinados a 980 °C. Os autores observaram que o uso do lodo demandou mais água para extrusão dos corpos de prova. Os resultados mostraram que o lodo provocou alta retração e absorção de água e redução da resistência mecânica. Os autores afirmam que a retração foi aumentada em função do alto teor de carbonatos do

lodo, que reduziram sua densidade após a calcinação. A cerâmica com até 10% de lodo tem indicação para uso em pisos e possui baixo impacto ambiental.

Algamal, Khalil e Saleem (2018) usaram lodo de ETA e adições para produção de blocos cerâmicos. O lodo usado foi seco e sua matéria orgânica foi removida após uma calcinação a 350 °C durante uma hora. O material resultante foi moído até a fração passante em 0,075 mm. Os corpos de prova foram produzidos com 95% de lodo e adições de 5% de MgO, Cr₂O₃, Al₂O₃ ou Fe₂O₃. Os autores observaram que as adições melhoram a performance das cerâmicas produzidas com lodo, principalmente o Cr₂O₃. Observou-se que a redução do tamanho de partícula foi fundamental para a formação de fase vítrea na cerâmica.

Oliveira e Leite (2018) utilizaram lodo de uma ETA em Manaus e argila de uma olaria para produção de cerâmica. Os materiais foram secos em estufa e moídos em um moinho de bolas por 30 minutos. No programa experimental, foram usadas de 12 a 18% de lodo, umedecidos com 10% de água para produção dos corpos de prova. As misturas foram homogeneizadas por cerca de uma hora em um moinho de bolas e produzidos corpos de prova com cerca de 72,03 × 31,67 × 7,77 mm. Os corpos de prova foram calcinados a 900 °C. Os autores observaram aumento da retração, da densidade e redução da absorção de água com a adição do lodo. O teor de resíduo foi associado ao aumento da temperatura do sistema, auxiliando a densificação das peças e formação de fase vítrea. Contudo, foi observada redução da resistência dos corpos de prova devido ao aumento do teor de lodo. Esse comportamento foi tido como esperado e afirmou-se que a influência negativa do lodo não foi tão relevante levando-se em conta a qualidade final do produto.

Orlov, Belkanova e Vatin (2020) produziram cerâmica estrutural a partir de misturas argila e lodo tratado com cal ou por meio de congelamento. Tratar o lodo com cal ou realizar o congelamento e descongelamento são métodos usados para melhorar o processo de desidratação do lodo. Foram adicionados cal virgem e cal hidratada em proporções de 5 a 10% do lodo. Após o tratamento, o lodo foi submetido à desidratação por hidrociclonagem, produzidos corpos de prova com 60 × 30 × 10 mm para determinação da retração e de 50 × 50 × 50 para determinação da resistência à compressão. O teor de lodo variou de 5 a 40% em relação a argila e os corpos de prova foram calcinados a 950 °C. Dentre as variações estudadas, os corpos de prova com o lodo tratado com por meio do congelamento-descongelamento apresentou a maior retração e resistência após a

calcinação. Os autores associaram este comportamento ao aumento do teor de agentes fundentes (FeO, K₂O e MnO) na adição. Os autores observaram que a adição da cal hidratada provocou redução da densidade após a calcinação, devido ao aumento da porosidade devido à eliminação de orgânicos.

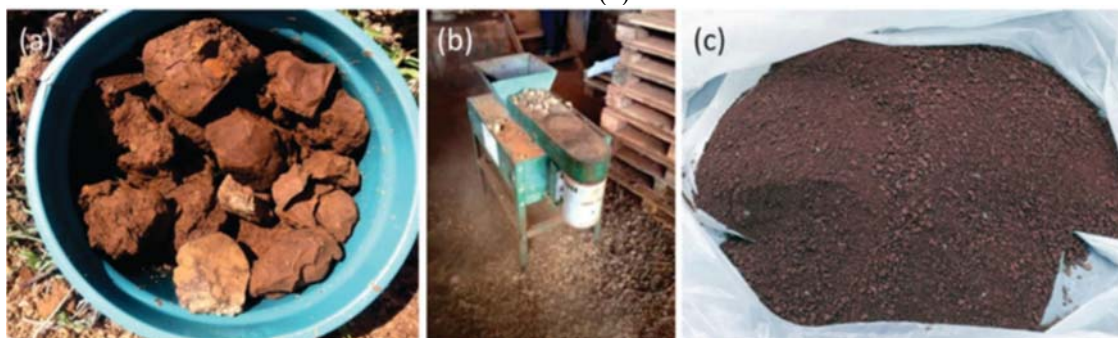
4.2 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO LODO NAS CARACTERÍSTICAS DA CERÂMICA

4.2.1 Composição granulométrica

A composição granulométrica do lodo tem sido, por muitas vezes, apontada como causa da baixa qualidade da cerâmica formada. Nos ensaios realizados com solos, em geral, estes são secos ao ar e posteriormente destorroados, devendo-se considerar suas particularidades. A escolha da forma de secagem não pode resultar em efeitos significativos sobre os resultados dos ensaios (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* 2015). No caso do lodo, há formação de grumos de difícil desagregação após a secagem, mesmo que esta seja feita em temperatura ambiente. Quando desagregado, o lodo perde sua característica original.

Araújo *et al.* (2015) e Tartari *et al.* (2011a) utilizaram as normas técnicas brasileiras para classificação de solos (ABNT, 2016d) para determinar as propriedades do lodo e do solo usados no experimento. Segundo Araújo *et al.* (2015) a moagem do lodo se fez necessária uma vez que o lodo foi removido de uma lagoa de secagem e encontrava-se aglomerado (Figura 11).

Figura 11 – Resíduo após sua remoção (a), trituração em máquina tipo pedra moinho (b) e triturado (c)



Fonte: Araújo *et al.* (2015).

O lodo tende a formar grumos após a secagem, mesmo ao ar, provocando a necessidade de cominuição para sua incorporação à massa argilosa. Ackah *et al.* (2018) secaram

amostras de lodo de ETA ao ar (aproximadamente 25 °C) sobre um piso de concreto limpo de modo a evitar qualquer tipo de contaminação. Os autores observaram que a secagem interferiu significativamente nas propriedades das amostras, formando agregados graúdos, rígidos e estáveis, cuja granulometria foi impossível de determinar, uma vez que não era representativa.

A maior parte dos autores não justificou a escolha do método de secagem, moagem ou o tamanho de grão desejado após a cominuição (CRUZ *et al.*, 2016; MONTEIRO *et al.*, 2008; OLIVEIRA; HOLANDA, 2008; PEI LING *et al.*, 2018; REIS *et al.*, 2014). Contudo, os autores afirmam que a moagem do lodo é necessária para facilitar a mistura do lodo à massa argilosa e uniformizar o tamanho dos grãos (BENLALLA *et al.*, 2015; CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018; KIZINIEVIČ *et al.*, 2013; TANTAWY; MOHAMED, 2017).

O beneficiamento do resíduo impacta diretamente em suas características físicas e nas propriedades da massa argilosa a qual é incorporada, resultando na alteração de sua composição granulométrica final, bem como nos limites de consistências dos materiais empregados.

Os estudos apresentados anteriormente mostram variações na forma de coleta e tratamento do lodo para desenvolvimento de cerâmicas. A Tabela 5 apresenta um resumo de como o lodo foi recebido e tratado para a realização dos experimentos.

Teixeira *et al.* (2011) demonstraram que o uso do lodo de ETA resultou em um aumento de teor de areia na composição granulométrica e associou isto à alta porosidade obtida nos experimentos. Paixão *et al.* (2008) utilizaram lodo moído e calcinado, apontando que o método reduziu a formação de defeitos, reduzindo o efeito negativo provocado pelo lodo. Oliveira e Holanda (2008) observaram uma proximidade entre a composição granulométrica do lodo e da argila, associando isto à pouca alteração entre as propriedades das cerâmicas produzidas com e sem lodo.

Vitorino, Monteiro e Viera (2009) consideraram que o uso de lodo proveniente do desarenador, composto 100% de areia, contribuiu para melhoria do processo de extrusão, resultando em uma cerâmica com menos porosidade e menor retração.

Tabela 5 – Beneficiamento do lodo pós coleta na ETA

Autor	Secagem	Temperatura	Moagem	Diâmetro máximo do grão
Teixeira <i>et al.</i> (2006)	Sim	-	Moinho de facas	-
Monteiro <i>et al.</i> (2008)	Sim	110 °C	-	-
Oliveira e Holanda (2008)	Sim	110 °C (24 h)	Destorroado	0,42 mm
Paixão <i>et al.</i> (2008)	Sim	110 °C (48 h)	Moinho de bolas	0,84 mm e 0,075 mm
Tartari <i>et al.</i> (2011)	Sim	110±5 °C	Moinho martelo	-
Teixeira <i>et al.</i> (2011)	Sim	110 °C	Moinho de facas	0,42 mm
Torres <i>et al.</i> (2012)	Sim	Ao ar		
Kizinievic <i>et al.</i> (2013)	Sim	100±5 °C	Moagem	0,63 mm
Agostini (2014)	Não	-	-	-
Martins (2014)	Sim	Ao ar	Cominuição manual	-
Reis <i>et al.</i> (2014)	Sim	-	Moagem	0,18 mm
Silva (2014)				
Araújo <i>et al.</i> (2015)	-	Ao ar	Triturador pedra moinho	2,00 mm
Benlalla <i>et al.</i> (2015)	Ao sol (por 72 h) e em estufa	105 °C (48 h)	Moagem	0,60 mm
Lima (2016)	Sim	Ao ar	Cominuição manual	0,425 mm
Rodrigues (2016)	Sim	110 °C (48 h)	Moinho de bolas	0,045 mm
Santos (2016)	Não	-	Não	
Tantawy e Mohamed (2017)	Sim	-	-	0,125 mm
Mymrin <i>et al.</i> (2017)	Ao ar	-	Moagem	2 mm
Algama, Khalil e Saleem (2018)	Sim	100 °C	Moinho de bolas	0,075 mm
Oliveira e Leite (2018)	Sim	50 °C (48 h)	Moinho de bolas	-
Orlov, Belkanova e Vatin (2020)	Sim	-	Spray-drier	-

Fonte: A autora (2023).

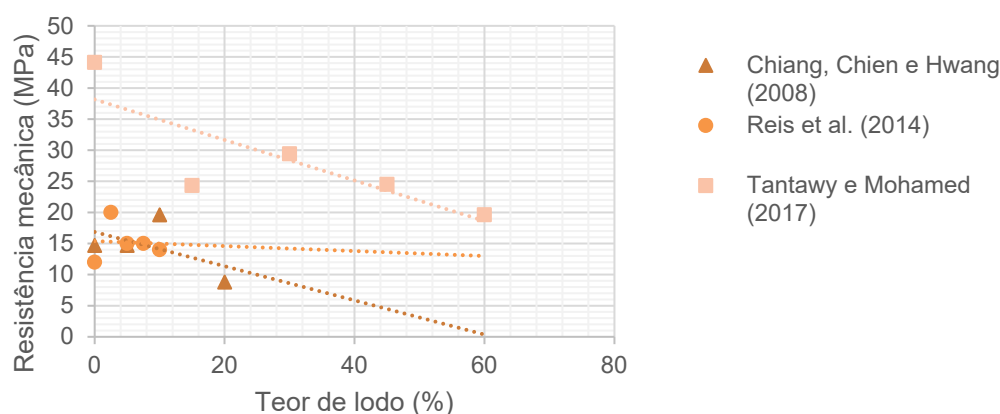
A Figura 12 mostra a relação entre o teor de lodo e a resistência mecânica entre os corpos de prova produzidos pelos autores estudados, observando a tendência de comportamento devido ao tamanho do grão de lodo incorporado. Foram relacionados apenas os estudos que utilizaram grãos moídos, com controle do tamanho de partícula e que possuíam dados de resistência mecânica após calcinação entre 900 e 1000 °C.

A Figura 12a mostra os resultados de autores que usaram o lodo com tamanho de grãos entre 0,125 e 0,3 mm. As linhas de tendência mostram que o teor de lodo influi na resistência dos corpos de prova, mesmo com granulometrias mais finas. O gráfico da Figura 12b mostra a tendência da resistência mecânica quando usado grãos de lodo de 0,42 mm. Apesar de mostrar uma menor inclinação da linha de tendência, observa-se uma redução das resistências em relação à Figura 12a. A Figura 12c mostra que o uso de grãos maiores, entre 0,6 e 0,84 mm, provoca maior redução da resistência em relação ao uso de grãos menores.

Desta comparação pode-se concluir que há influência do tamanho de grão resultante da moagem, contudo, ela não se mostra uniforme, uma vez que não é unânime em todas as amostras. Existem outros fatores determinantes nas propriedades das cerâmicas produzidas com lodo de ETA que precisam ser analisados em conjunto com sua composição granulométrica.

Figura 12 – Relação entre teor de lodo com e resistência das amostras estudadas por diversos autores

a)



b)

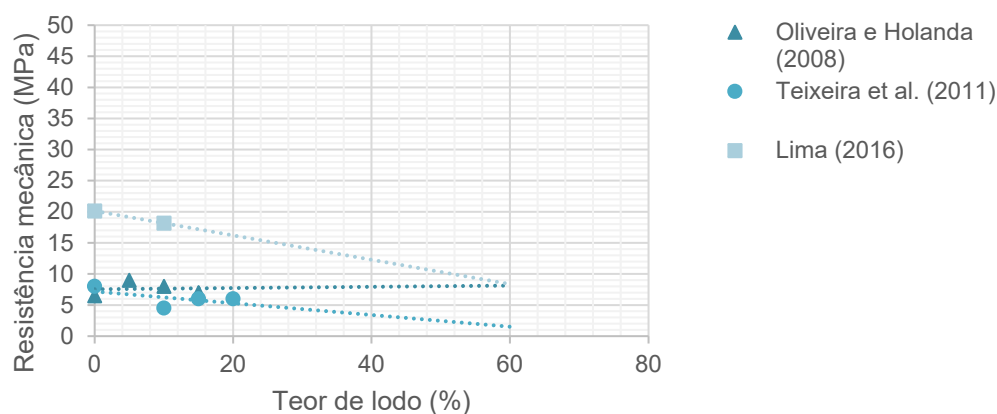
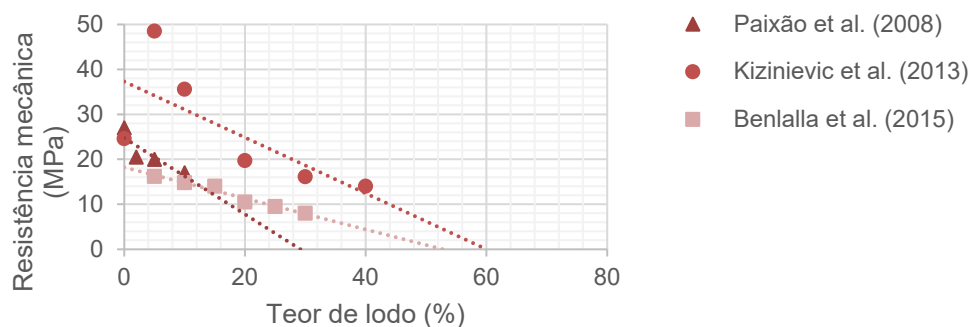


Figura 12 – Relação entre teor de lodo com e resistência das amostras estudadas por diversos autores (Cont.)

c)



Fonte: A autora (2023).

4.2.2 Composição química e mineralógica

Nem todos os autores estudados apresentam dados acerca da composição química da matéria prima empregada. Além disso a maior parte da bibliografia disponível apresenta dados de difração de Raios-X incompletos. Apesar de apresentarem dados de cada matéria prima individual, muitos deles não trazem informações sobre a composição pós-calcinação. Quando este dado não é apresentado, não há forma de quantificar as fases dificultando o reconhecimento de sua origem. A Tabela 6 apresenta a composição química obtida por FRX por alguns autores.

A composição química dos lodos, em geral, possui os mesmos óxidos majoritários que os solos com os quais foram misturados. As particularidades observadas pelos autores são em função do tipo de tratamento utilizado ou da característica dos corpos hídricos de cuja água foi obtida.

O lodo de ETA utilizado por Benlalla *et al.* (2015) apresentou teor de Al_2O_3 superior aos outros estudos, cerca de 62,66% da composição química do lodo. Os autores associam o teor de alumina ao uso de sulfatos de alumínio durante o tratamento da água.

O alto teor de ferro observado por Kizinievic *et al.* (2013) é resultante da alta concentração de ferro na água subterrânea da Lituânia, que vai de 0,5 a 3,5 mg/l, e não deve ultrapassar 0,2mg/l, segundo as normas de potabilidade do país.

A composição química dos lodos, em geral, possui os mesmos óxidos majoritários que os solos com os quais foram misturados. As particularidades observadas pelos autores são em função do tipo de tratamento utilizado ou da característica dos corpos hídricos de cuja água foi obtida.

Tabela 6 – Composição química de lodos estudados por diversos autores

Autor		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Outros	Perda ao fogo
Chian, Chien e Hwang (2008)		70,14	15,45	5,37	-	5,24	1,02	1,64	-	0,64	-	-	-	-
Monteiro <i>et al.</i> (2008)		24,68	30,39	11,59	0,9	0,35		0,17		0,16			1,09	30,67
Oliveira e Holanda (2008)		35,92	31,71	12,79	1,1	0,58	0,06	0,71	0,09	0,1	0,35	-	-	16,93
Paixão <i>et al.</i> (2008)		69,5	13,5	5,3	0,6	3,3	1,5	2,2	0,06	0,64	-	-	0,2	3,2
Vieira, Margem e Monteiro (2008)		14,49	20,19	6,23	0,39	0,14	-	-	0,19	0,13	0,53	-	-	57,73
Tartari <i>et al.</i> (2011)		24,1	31,6	18,6	2,2	0,3	-	-	-	-	-	2,8	2,8	20,4
Kizinievic <i>et al.</i> (2013)		10,9	1,34	68,65	-	-	-	0,61	-	8,23	9,39	0,88	0,88	-
Reis <i>et al.</i> (2014)		16,2	18,1	12,41	1,62	0,77	-	-	-	29,01	2,58	6,23	19,31	-
Martins (2014)	Lodo AS	33,6	43,3	18,8	0,7	0,9	-	-	-	0,2	-	2	2,5	-
	Lodo PAC	50,8	32,6	11,5	1,5	1,6	-	1,2	-	0,3	-	-	0,5	-
Benlalla <i>et al.</i> (2015)		27,12	62,66	1,16	0,16	0,83	0,24	0,37		1,25	0,19	-	0,91	5,11
Lima (2016)	Chuvoso	34,9	26,4	15,9	0,75	1,03	0,16	0,28	0,09	0,88	0,25	-	0,06	19,3
	Estiagem	34,71	24,63	15,9	0,91	1,18	0,28	0,23	0,08	1,12	0,27	-	0,94	19,75
Rodrigues (2016)		30,11	31,73	10,39	1,06	1,29	-	-	0,14	0,35	-	-	0,43	24,5
Santos (2016)		31,91	14,42	14,36	0,98	0,55	-	0,17	0,3	0,91		0,96	5,18	31,22
Tantawy e Mohamed (2017)		59,7	10,52	4,38	-	1,16	1,53	2,2	-	6,01	-	2,85	3,4	11,1
Mymrin <i>et al.</i> (2017)		17,01	24,46	13	0,4	0,18	0,02	0,15	3,2	0,3	0,44	0,61	1,07	39,77
Pei Ling <i>et al.</i> (2018)		40,33	31,84	6,43	0,46	1,32	-	0,48	-	-	0,2	0,14	0,44	18,5
Algama, Khalil e Saleem (2018)		51,22	15,65	8,14	4,14	1,11	2,86	1,31	-	2,62	-	-	-	12,95
Oliveira e Leite (2018)		36,38	55,41	6,61	-	-	0,31	0,48	0,03	3,95	0,31	1,44	-	-

Fonte: A autora (2023).

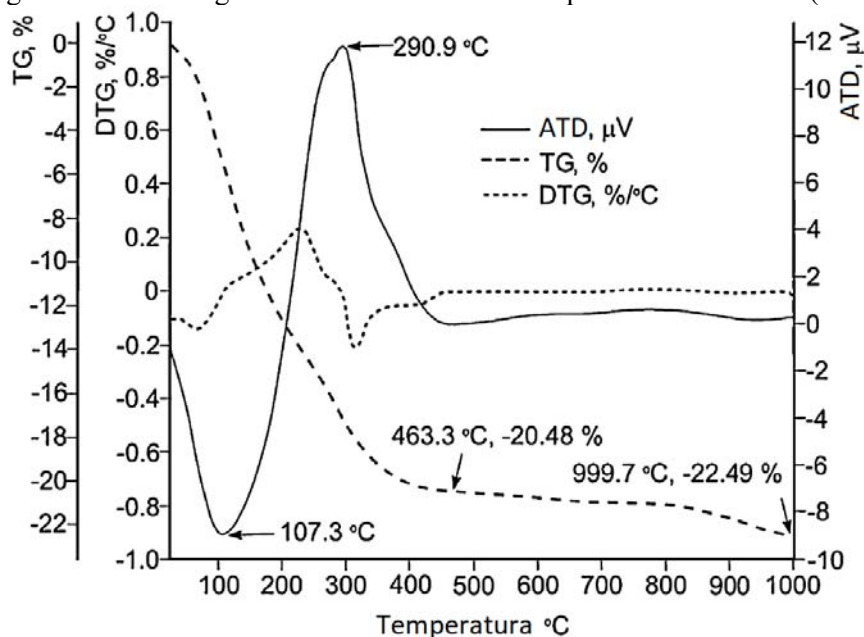
A formação de vazios ou irregularidades da peça cerâmica com lodo é associada principalmente à presença de matéria orgânica e voláteis durante a calcinação. Uma das características do lodo de ETA, observada em diversos trabalhos é sua alta perda ao fogo em relação à argila. A perda de massa do resíduo ocorre com o aumento da temperatura. Logo, é esperado que, com a sinterização da cerâmica que ocorre por volta de 950 °C para cerâmica vermelha (SANTOS, 1989), haja perda de massa e consequentemente formação de vazios na estrutura deixados pelo material perdido na calcinação.

Vieira, Margem e Monteiro (2008) observaram por meio de imagens de obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) que as misturas de argila com 10% de lodo de ETA, calcinadas a 700 °C, demonstraram uma maior quantidade de defeitos em função da perda de cerca de 58% da massa, causada pela combustão da matéria orgânica. Essa perda provocou a formação de poros e trincas, reduzindo 45,4% da resistência a compressão diametral da cerâmica em relação à amostra de referência.

Martínez-García *et al.* (2012) relatam que a incorporação de lodo nas misturas com argila em corpos cerâmicos calcinados à 950 °C aumentou sua porosidade aberta e fechada, provocando um aumento na absorção de água do corpo de prova, e consequentemente, prejudicando a durabilidade do material final. Os autores associam este fator à matéria orgânica presente no lodo uma vez que sua análise térmica diferencial (ATD) aponta uma perda de massa de 36,5% entre 200 e 500 °C, devido à decomposição da matéria orgânica. Os autores sugerem limitar o teor de lodo incorporado a 5% da argila para não prejudicar a qualidade da cerâmica.

Kizinievič *et al.* (2017) observaram que o lodo de ETA usado num ensaio de termogravimetria, teve perda de massa de 20,5% entre 200 e 463 °C devido à perda de materiais voláteis (Figura 13). Logo, as adições de 40 e 60% de lodo em cerâmica provocaram a calcinação de compostos orgânicos na cerâmica calcinada a 900 e 1000 °C, resultando na formação de poros e fissuras, incrementando sua porosidade aberta (Figura 14).

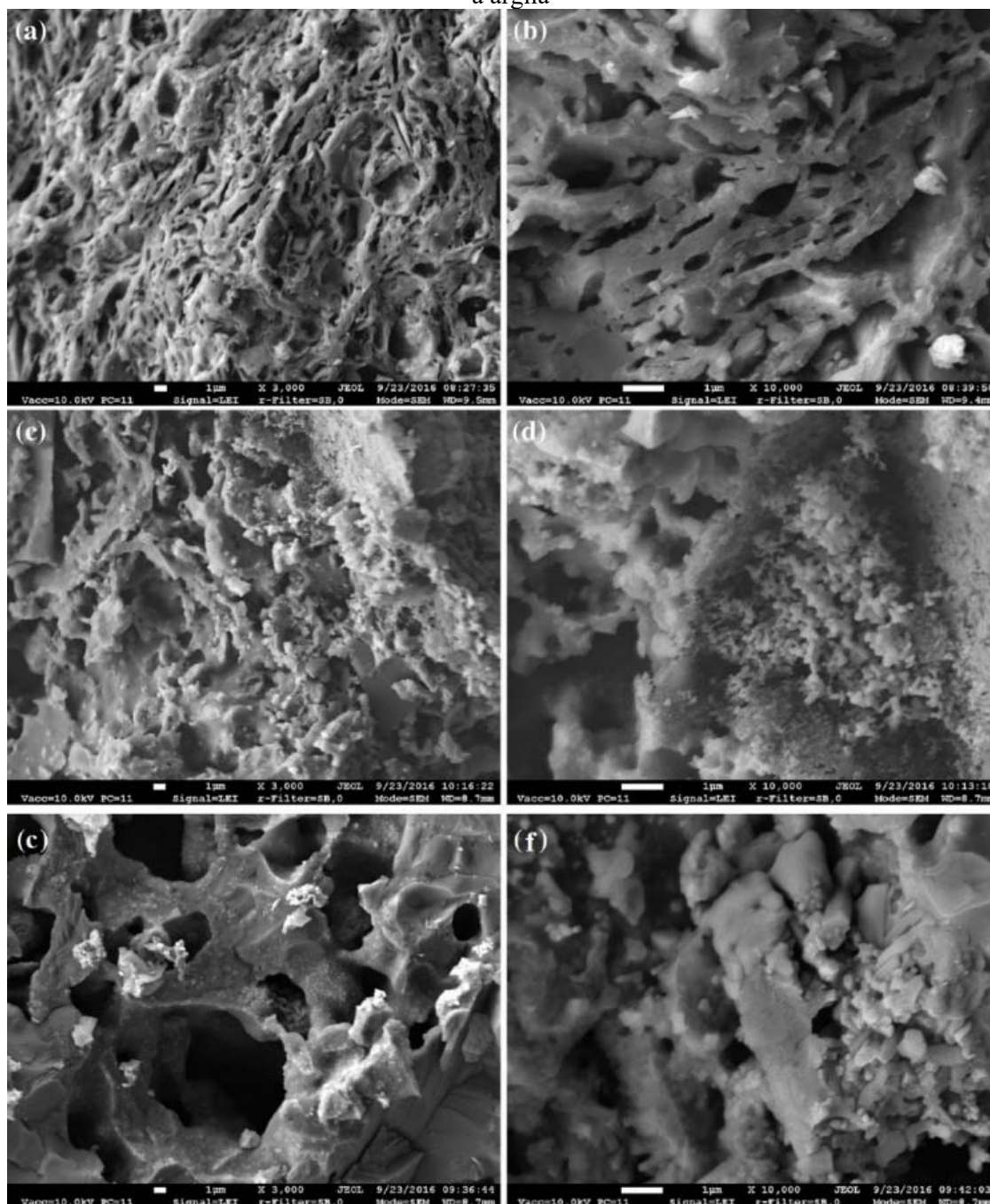
Figura 13 -Derivatograma do lodo de ETA usado por Kizinievič *et al.* (2017)



Fonte: Adaptado de Kizinievič *et al.*, 2017.

A Figura 15 mostra como o teor de matéria orgânica influencia a resistência mecânica dos corpos de prova estudados. Apesar das diferentes condições de produção, observa-se que na Figura 15a, onde o percentual da P.F. é inferior a 13%, há maior resistência dos corpos de prova que nas demais figuras. Na Figura 15b, o lodo possui P.F. entre 18 e 21%, a resistência é inferior e há redução em função do teor de lodo. Na Figura 15c, o lodo possui P.F. superior à 21%, e observa-se uma menor resistência inicial que as observadas nas Figuras anteriores. Apesar de haver relação entre teor de lodo e a resistência mecânica, a quantidade de matéria orgânica não parece ter influência determinante nesta redução. Observa-se, por exemplo que a tendência à redução observada por Paixão *et al.* (2008), cujo PF é igual a 3,2% é semelhante à observada por Monteiro *et al.* (2008), com P.F. de 30,67%. Logo, o teor de orgânicos é responsável pela redução da resistência, mas não necessariamente determinante na má qualidade dos corpos de prova, devendo-se analisar as características das cerâmicas produzidas com lodo de ETA em conjunto.

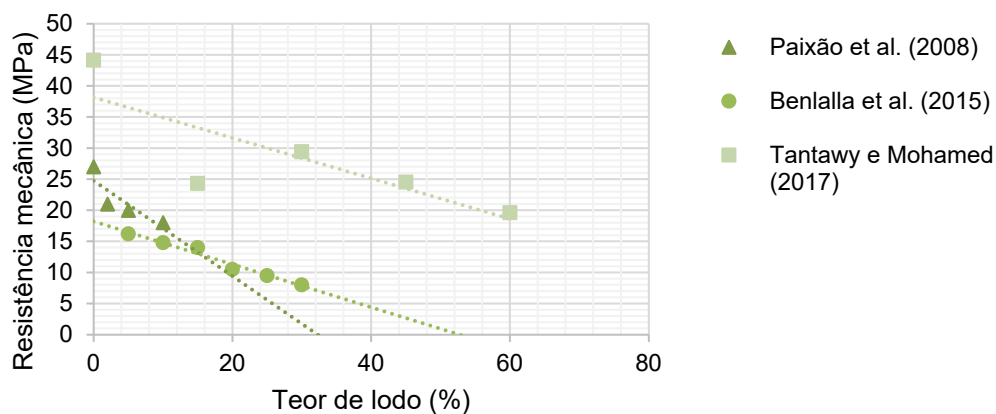
Figura 14 – Microestrutura de corpos cerâmicos após calcinação a 1000 °C: (a, b) corpo cerâmico de referência; (c, d) corpo cerâmico produzido com 40% de lodo de ETA em substituição à argila; (e, f) corpo cerâmico produzido com 60% de lodo de ETA em substituição à argila



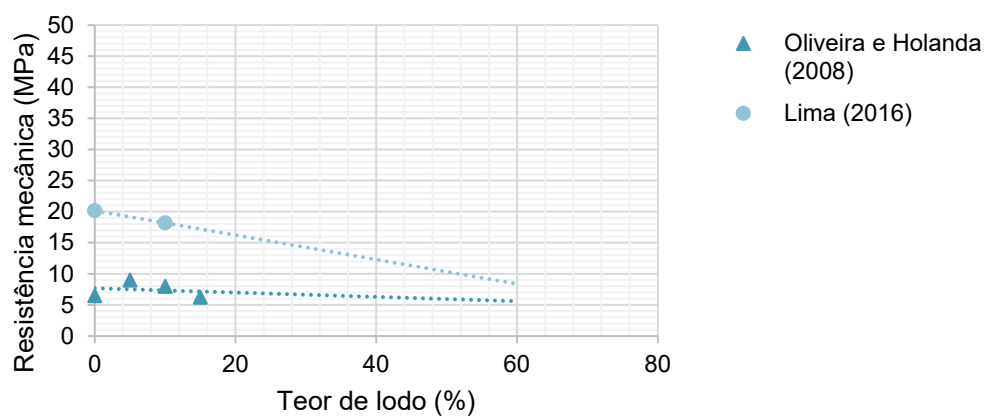
Fonte: Kizinievič et al., 2017.

Figura 15 – Relação entre perda ao fogo e resistência de cerâmicas produzidas com lodo

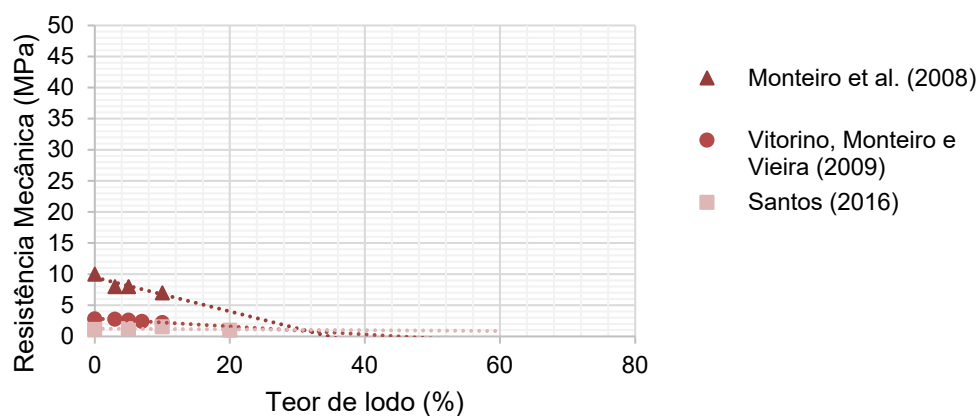
a)



b)



c)



Fonte: A autora (2023).

Uma forma que se encontrou a fim de melhorar as características do lodo para seu uso em cerâmica foi de remover a sua matéria orgânica ou outros componentes que irão se perder durante a calcinação. Vieira, Margem e Monteiro (2008), sugerem que, além da redução do tamanho de partícula, deve-se calcinar o lodo de modo a reduzir o efeito deletério provocado pela presença de matéria orgânica.

Por outro lado, Ukwatta *et al.* (2015), quando da produção de material cerâmico com a incorporação de 10 a 25% lodo de águas residuais, observaram que, a presença da matéria orgânica, desde que entre 7,1 e 27,79%, auxilia na sinterização dos corpos de prova, causando a redução de cerca de 50% da energia usada na calcinação.

Uma das características da massa argilosa que está associada à granulometria e à quantidade de matéria orgânica é a sua plasticidade. Santos *et al.* (2001) observaram que o lodo estudado para substituição em argila possuía menores limites de liquidez e plasticidade que as argilas por eles utilizadas. Esta propriedade foi associada à grande quantidade de areia média da amostra, em torno de 58%. Teixeira *et al.* (2002) também observaram em sua amostra de lodo uma maior quantidade de areia que argila.

Esta maior quantidade de areia se torna um ponto positivo na produção cerâmica uma vez auxilia na formação de vazios nas peças evitando trincas durante a retração. Contudo, quando o lodo possui percentuais elevados de areia e silte, passa a ter características desplastificantes, em virtude da baixa interação química entre suas partículas. A tentativa de conformar corpos cerâmicos apenas com lodo, resultou em peças altamente deformadas e fissuradas segundo Tartari (2008) (Figura 16). Desta forma, há a recomendação de se misturar o lodo com argilas de alta plasticidade (TARTARI *et al.*, 2011).

Figura 16 – Corpos cerâmicos confeccionados apenas com lodo, sinterizados à 950 °C



Fonte: Tartari (2008).

Monteiro *et al.* (2008), observaram que o lodo utilizado teve altíssima plasticidade, atribuída a este pela quantidade de matéria orgânica. As amostras secas ao ar tiveram índice de plasticidade igual a 207,2%, enquanto as que foram secas a 110° C, 27,1%, semelhante à da argila usada no estudo. Desta forma, os autores defendem que, a incorporação de lodo seco ao ar pode ter um

efeito deletério nas peças após a calcinação, sendo, portanto, necessária à redução do teor de orgânicos na preparação da massa.

Por outro lado, Benlalla *et al.* (2015), usando um lodo com alto percentual de Al_2O_3 e com máximo tamanho de grão igual a 0,6 mm, observaram que não houve interferência significativa na plasticidade das amostras de cerâmica com incorporação de até 30% lodo, não sendo estudadas substituições com percentuais superiores. Contudo, os ensaios de adsorção com azul de metileno, uma média capacidade de troca de cátions do lodo, afirmam que não pode ser comparado a uma argila convencional, podendo, sim, ser classificado como uma areia siltosa com uma fração de argila altamente plástica.

Com relação à sua composição mineralógica, o lodo de ETA é composto principalmente de caulinita e quartzo, com a presença de outros minerais que variam entre os autores. A Tabela 7 mostra a relação de minerais observadas pelos autores estudados.

Tabela 7 – Composição mineralógica de lodos de ETA estudados por diversos autores

Referência	Minerais					
Teixeira <i>et al.</i> (2006)	Caulinita					
Chian, Chien e Hwang (2008)	Quartzo					
Monteiro <i>et al.</i> (2008)	Caulinita	Gibisita	Goetita	Quartzo		
Oliveira e Holanda (2008)	Caulinita	Quartzo	Gibisita			
Paixão <i>et al.</i> (2008)	Caulinita	Gibisita	Goetita	Hematita	Sulfato de alumina hidratado	
Vieira, Margem e Monteiro (2009)	Caulinita	Quartzo	Hematita			
Torres <i>et al.</i> (2012)	Caulinita	Quartzo				
Tantawy e Mohamed (2017)	Quartzo	Albita	Calcita			
Pei Ling <i>et al.</i> (2018)	Caulinita	Quartzo	Hematita	Zeolita cúbica		
Algamil, Khalil e Saleem (2018)	Albita	Anortita	Nontronita			
Oliveira e Leite (2018)	Caulinita	Quartzo				
Agostini (2014)	Quartzo	Hematita	Calcita	Alumina		
Martins (2014)	Quartzo					
Lima (2016)	Caulinita	Quartzo	Hematita			
Rodrigues (2016)	Caulinita	Gibisita	Goetita	Quartzo	Muscovita	
Santos (2016)	Caulinita	Quartzo				

Fonte: A autora (2023).

Os resultados dos difratogramas apresentados pelos autores em seus respectivos trabalhos, mostra que há semelhança entre as composições mineralógicas de lodos e argilas estudados (TEIXEIRA *et al.*, 2006; MONTEIRO *et al.*, 2008; ALGAMAL, KHALIL; SALEEM, 2018). Este aspecto pode facilitar a interação entre partículas de lodo e argila (TEIXEIRA *et al.*, 2006).

Além de caulinita e quartzo, a argila estudada Monteiro *et al.* (2008), possuía em sua composição gibsita, mica e muscovita, demonstrando também a semelhança mineralógica com o lodo estudado. A presença de gibsita nas amostras de lodo tem relação com o teor de alumina resultante do floculante usado no tratamento. O quartzo observado é proveniente das impurezas da água.

A presença de hematita nas amostras de lodo estudadas por Paixão *et al.* (2008) têm relação com o cloreto de ferro empregado como floculante no tratamento da água. Os autores identificaram por meio de Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), principalmente a presença de elementos com Si e Fe na superfície das amostras.

4.2.3 Características de cerâmicas produzidas com lodo de ETA

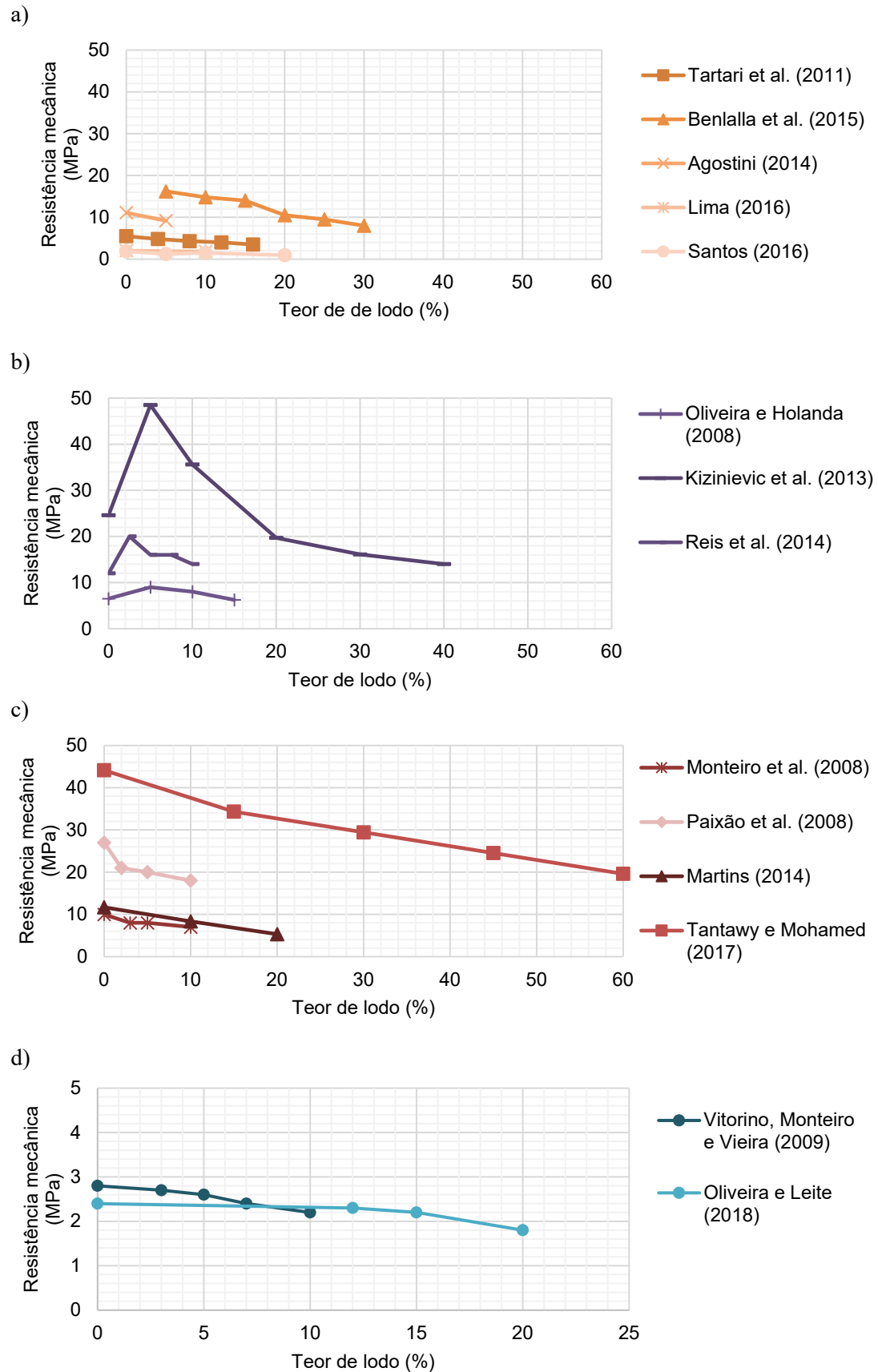
Tendo em vista os diversos tipos de corpos de prova empregados nos estudos, não é possível comparar os resultados entre autores. Foram observados os resultados de retração, absorção de água e resistência mecânica dos corpos de prova calcinados em temperaturas entre 900 e 1000 °C (Figura 17).

Os resultados obtidos pelos autores estudados demonstram correlação entre as propriedades dos corpos de prova. Dessa forma, foram apresentadas figuras que mostram como o lodo interfere nas propriedades das cerâmicas de forma a melhorar ou piorar sua qualidade.

Após análise dos dados de cada autor, pode-se observar cinco padrões de comportamento em função da adição de lodo de ETA na cerâmica.

Agostini (2014); Benlalla *et al.* (2015); Lima (2016); Santos (2016) e Tartari, *et al.* (2011) observaram que o uso do lodo provoca aumento de retração e absorção e redução de resistência (Figura 17a). Benlalla *et al.* (2015), Santos (2016) e Tartari, *et al.* (2011) possuem dados completos acerca das composições formuladas e serão analisados a seguir.

Figura 17 – Relação entre teor de lodo e resistência mecânicas de cerâmicas produzidas com lodo de ETA estudados por diversos autores



Fonte: A autora (2023).

Benlalla *et al.* (2015) demonstraram que houve um aumento de até 40% da retração em relação aos corpos de prova de referência, quando usado 30% de lodo em cerâmicas calcinadas a 900 °C. Houve aumento da absorção de água em mais de 50% em relação à referência e redução de 50% da resistência à flexão na mesma série em estudo. A adição de lodo reduz o teor de SiO₂ e Fe₂O₃, aumentando a de Al₂O₃ da composição.

Santos (2016) observou o aumento da retração em cerca de 17% para corpos de prova produzidos com 20% de lodo, com aumento da absorção de 9% e redução da resistência à compressão em 34% para a mesma série. A composição química das amostras estudadas demonstra redução do teor de SiO₂ e Fe₂O₃, com aumento de Al₂O₃.

Tartari *et al.* (2011) observaram que as amostras produzidas com 16% de lodo de ETA tiveram quase o dobro da retração das amostras de referência, resultando ainda em um aumento de cerca de 17% da absorção e redução de 36% da resistência mecânica. A adição de lodo provocou redução do percentual de SiO₂ e aumento de Al₂O₃ e de Fe₂O₃.

Em comum, pode-se destacar que em todos os casos, houve redução da relação Si/Al nas misturas. A redução do Si/Al provoca a produção de poros maiores durante a calcinação, resultando em redução da resistência mecânica (CHIANG; CHIEN; HWANG, 2008; XU; ZOU; LI, 2009). Santos (2016) e Tartari *et al.* (2011) observaram ainda o aumento da relação F/AS (Fe₂O₃+CaO+MgO/SiO₂+Al₂O₃), associada ao aumento da geração de gases durante a calcinação, elevando a porosidade e a absorção da cerâmica. Em contrapartida, os autores verificaram que o lodo eleva o teor de fundentes, responsáveis pela densificação da cerâmica.

Kizinievič *et al.* (2013); Oliveira e Holanda (2008) e Reis *et al.* (2014), notaram que o lodo provoca aumento de resistência em pequenas quantidades, seguido por redução em porcentagens maiores (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** 17b).

A retração após calcinação apresentada por Kizinievič *et al.* (2013) mostra que há redução da retração em percentuais de lodo que vão de 5 a 30%, em relação à amostra de referência, nos corpos de prova calcinados a 1000 °C. O menor valor foi observado nas amostras com 5% de lodo, sendo 11,5% inferior à amostra sem lodo. Observou-se redução da absorção de água com 5 e 10% de lodo, seguido por posterior aumento até 40%. A absorção dos corpos de prova com 5% de lodo é cerca de 20% inferior à amostra de referência, enquanto a com 20% de lodo é 27% superior. Houve aumento de resistência de 97% nas amostras com 5% de lodo e 44% nas amostras com 10%. Após esse percentual, observou-se redução da resistência em função do

teor de lodo adicionado. O uso de lodo reduz o teor de SiO_2 e de Al_2O_3 enquanto aumenta o teor de Fe_2O_3 , uma vez que o lodo usado pelos autores é rico em ferro.

Reis *et al.* (2014) observaram aumento da absorção e da resistência em função da adição de lodo em corpos de prova calcinados a 950°C , em relação à amostra de referência. Os autores verificaram que houve aumento da resistência em cerca de 80% quando usado 2,5% de lodo, enquanto o uso de 10% resultou em um aumento de cerca de 30% quando comparadas às amostras sem lodo. O uso de lodo provocou redução nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , contudo, a composição química das matérias primas empregadas foi muito semelhante.

Oliveira e Holanda (2008) observaram que o lodo de ETA empregado em seu estudo provocou aumento da retração, redução da absorção de água e aumento da resistência em corpos de prova calcinados a 950°C . Houve aumento de retração em relação à amostra de referência em cerca de 15% quando usados 5 e 10% de lodo. Também houve redução de cerca de 15% da absorção nas amostras com 5% de lodo e de 2% nas amostras com 10%. A resistência aumentou cerca de 40% com 5% de lodo havendo posterior redução. Os autores observaram a redução do teor de SiO_2 e aumento de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , sendo os percentuais das amostras com lodo e sem muito próximos.

Nos estudos de Reis *et al.* (2014) e Oliveira e Holanda (2008), notou-se a semelhança química entre os materiais empregados, o que pode reduzir a tensão entre os materiais durante a calcinação e promover a interação entre os grãos de lodo e argila. Ambos os autores verificaram o aumento do teor de fundentes em função do teor de lodo, apesar da redução da relação F/AS e aumento da Si/Al.

Kizinievic *et al.* (2013) observou que o teor de fundentes mais que dobrou com a incorporação de lodo, observando ainda o aumento da relação F/SA e Si/Al. Os autores associaram a posterior redução da resistência e aumento da absorção nas amostras com mais de 10% de lodo ao aumento do teor de água incorporado. O maior volume de água empregado para a conformação da cerâmica produz um maior volume de poros, fragilizando sua estrutura.

Martins (2014); Monteiro *et al.* (2008); Paixão *et al.* (2008) e Tantawy e Mohamed, (2017), verificaram que há redução de retração com aumento da absorção, e redução de resistência com a incorporação do lodo na cerâmica (Figura 17c).

Monteiro *et al.* (2008) observaram que houve pouca variação da retração após a calcinação, mas a absorção de água aumentou com a adição do lodo na cerâmica. Com relação à resistência,

houve redução de até 30% em relação à amostra de referência, calcinada a 900 °C. Os autores observaram que o lodo reduz a relação Si/Al, aumenta a relação F/AS, mas houve pouca alteração no teor de fundentes.

Paixão *et al.* (2008) verificaram que houve redução da retração em até 33%, quando usado 2% de lodo na massa cerâmica. A absorção de água aumentou em torno de 40% em relação à amostra de referência e houve redução da resistência à flexão em mais de 20% em todos os percentuais estudados, nas cerâmicas calcinadas a 950 °C. Foi observado que o lodo aumenta o teor de fundentes, reduz a relação Si/Al e aumenta a relação F/AS.

Tantawy e Mohamed (2017) observaram que a retração reduziu em função do teor de lodo adicionado, a absorção aumentou a resistência também reduziu, em mais de 50% quando adicionado 60% de lodo, em cerâmicas calcinadas a 1000 °C. Os autores observaram pouca variação no teor de fundentes, aumento da relação Si/Al e redução na relação F/AS em função do teor de lodo.

De acordo com Pei Ling *et al.* (2018) a baixa interação do quartzo e da caulinita com a água resulta em pouca retração. Os autores verificaram altos percentuais de SiO₂ em relação aos demais estudos (entre 33,6% e 69,5%) e, relataram a presença de caulinita em sua composição.

Oliveira e Leite (2018) e Vitorino; Monteiro e Vieira (2009) observaram que o lodo provocou redução de absorção e resistência nos corpos de prova (Figura 17d).

Oliveira e Leite (2018) mostraram que o uso de lodo aumentou a densidade dos corpos de prova em cerca de 5%, quando comparada a amostra de referência à com 18% de lodo. Houve redução da absorção de água em mais de 50%. Contudo, os autores observaram que houve redução de cerca de 30% da resistência para a mesma amostra. O aumento de retração associado à redução de absorção de água é um sinônimo de que houve densificação dos corpos de prova após a calcinação (CHIANG; CHIEN; HWANG, 2008). A densificação do corpo de prova pode ter ocorrido em função do aumento de teor de fundentes, que passou de 3,41% para 7,09% com 18% de lodo.

Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) não apresentaram dados de composição química da argila utilizada no experimento. Em função disso é difícil afirmar se há correlação das propriedades químicas dos corpos cerâmicos com suas propriedades físicas e mecânicas. Os autores observaram houve um aumento de cerca de 45% da retração da cerâmica quando usados 10% de lodo, em relação à amostra sem lodo. Observaram também que o mesmo teor de lodo

resultou em redução da absorção de água em cerca de 8% e redução da resistência à compressão em cerca de 20%.

Apenas Orlov; Belkanova e Vatin (2020) observaram aumento de resistência em função do uso de lodo. Os autores afirmam que o aumento da retração associado ao uso de lodo, ocorre em função do aumento do grau de sinterização, devido à presença de agentes fundentes. Apesar do aumento da retração e da resistência das amostras, os autores verificaram que houve redução da densidade da cerâmica. Esse comportamento foi associado à um efeito duplo provocado pelo lodo. Por um lado, o lodo de ETA é um material deletério, devido ao seu teor de orgânicos, que aumenta a porosidade da cerâmica, reduzindo sua densidade. Por outro, os agentes de fundentes atuam para aumentar o grau de sinterização da cerâmica.

4.3 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CAPÍTULO 4

- A composição granulométrica do lodo de ETA tem relação com a forma de moagem e os procedimentos adotados por cada autor. Sua interferência na massa argilosa depende das características dos solos e do lodo utilizados. O lodo possui características semelhantes à uma areia siltosa, e quando misturado a uma argila com alta plasticidade favorece a formação de corpos de prova com qualidade semelhante àqueles produzidos apenas com o material convencional.
- Os percentuais de lodo usados por cada autor não tiveram motivação específica, e sua limitação tem relação com as propriedades dos corpos de prova cerâmicos após a calcinação.
- Altas temperaturas de calcinação resultam numa melhor densificação dos corpos de prova com lodo, melhorando a qualidade deste material. Contudo, deve-se observar a energia necessária à produção da cerâmica, evitando gastos energéticos excessivos.
- O aumento da retração observado nos corpos de prova tem relação com a composição química e mineralógica das composições. Os autores que relataram um alto teor de SiO_2 , observaram retrações lineares após a calcinação inferiores aos demais. A alta perda ao fogo de alguns lodos resultou em aumento da retração.
- O aumento da absorção de água está relacionado principalmente à formação de porosidade aberta, que tem relação com a perda de massa após a calcinação e à baixa interação entre os grãos de lodo e de argila.
- Na maior parte dos estudos houve redução de resistência mecânica. Os autores que observaram aumento de retração e absorção, observaram também redução desta

propriedade. O surgimento de falhas provocadas pela alta porosidade também foi motivo para redução da resistência.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 JUSTIFICATIVA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A semelhança química entre os materiais e a dificuldade de destinar o lodo adequadamente, foi o ponto inicial dos diversos estudos já apresentados. Contudo, mesmo com propriedades semelhantes, lodo e argila não resultam em uma interação adequada, dando origem a materiais com qualidade inferior àqueles produzidos com materiais convencionais.

Os estudos sugerem que os principais motivos para esta baixa interação são o diâmetro dos grãos de lodo, que são maiores que as argilas e o alto teor de orgânicos, responsável pela formação de cerâmicas porosas e frágeis.

Inclusive, os estudos sugerem que a calcinação do lodo e a moagem em diâmetros menores, bem como a combinação destes, resultarão em uma cerâmica com melhor desempenho e com características semelhantes à cerâmica convencional.

Contudo, uma análise de todos os estudos, mostra que o tamanho do grão é relativo, sua influência depende de diversas propriedades das misturas. Como relação à influência da calcinação, existem poucos estudos e não são conclusivos.

Logo, o programa experimental deste trabalho compreende a elaboração de misturas com lodo de ETA e argila, variando a granulometria do lodo, usando o lodo calcinado e não calcinado, empregando dois tipos de argila em diferentes percentuais.

Com isso, foram realizados ensaios microestruturais e tecnológicos para observação de como cada fator e a combinação entre eles provoca alterações na estrutura da cerâmica e como eles afetam o seu desempenho. O uso de duas argilas diferentes também foi importante para observar como o lodo interfere nas propriedades a depender do material com o qual foi misturado. Ainda, foi usado o lodo em seu estado bruto, de modo a verificar se realmente há influência do beneficiamento e como ele ocorre quando o lodo não é moído ou calcinado.

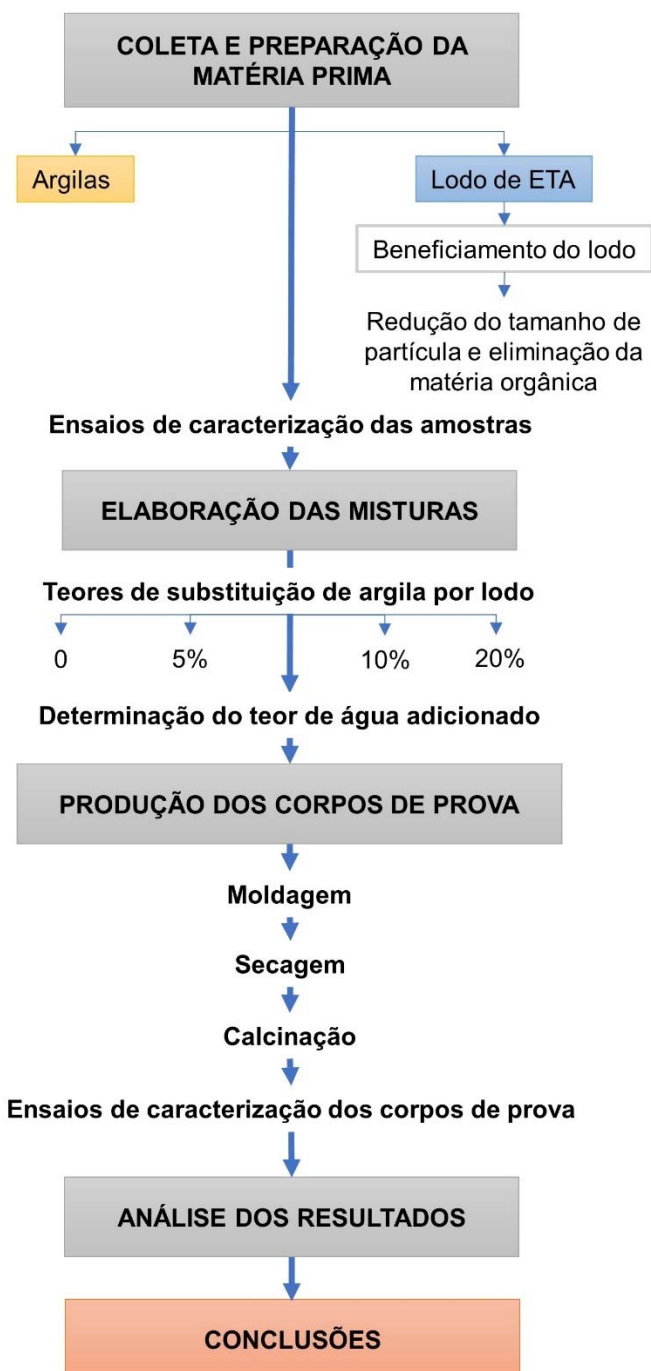
Os percentuais de lodo empregados nos experimentos tiveram como objetivo fornecer um bom espectro do experimento, com variações que pudessem facilitar a compreensão de como o lodo interfere nas propriedades das cerâmicas, limitado pelas características das misturas estudadas. Os estudos anteriores não apresentaram justificativas para a definição destes teores, tendo possivelmente adotado este mesmo critério.

Os demais itens deste capítulo descrevem os materiais e métodos empregados neste estudo de forma detalhada.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: argilas comumente usadas para produção de cerâmicas, provenientes de olaria na RMR e lodo de ETA proveniente da estação de tratamento de água, também localizada RMR. Um esquema do método usado para o desenvolvimento deste trabalho está apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do plano experimental



Fonte: A autora (2023).

5.3 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

5.3.1 Argilas

As argilas foram obtidas em olaria no município de Paudalho, proveniente de jazidas no agreste do Estado de Pernambuco, precisamente nos municípios de Feira Nova e Limoeiro. São argilas secundárias formadas em ambiente fluviais.

Foram obtidas duas qualidades de argila. No olaria, estas são denominadas argila preta e argila em virtude da sua coloração. Neste estudo serão denominadas de C1 e C2, respectivamente. Para a produção de blocos e telhas nesta olaria, usa-se uma mistura destas duas argilas, de modo a obter uma cerâmica com qualidade adequada. A proporção utilizada depende das condições de obtenção do material e variam de 1:1 a 1:3, entre C1 e C2.

Luz e Lins (2008) afirmam que, na maioria dos casos, esta composição é feita de forma empírica, baseada na experiência do técnico, dificultando a padronização de procedimentos. A quantidade de água ideal para o processo varia de acordo com a umidade natural das argilas, até mesmo porque, o local de armazenamento dos materiais geralmente é um pátio aberto, sem controle de temperatura ou umidade.

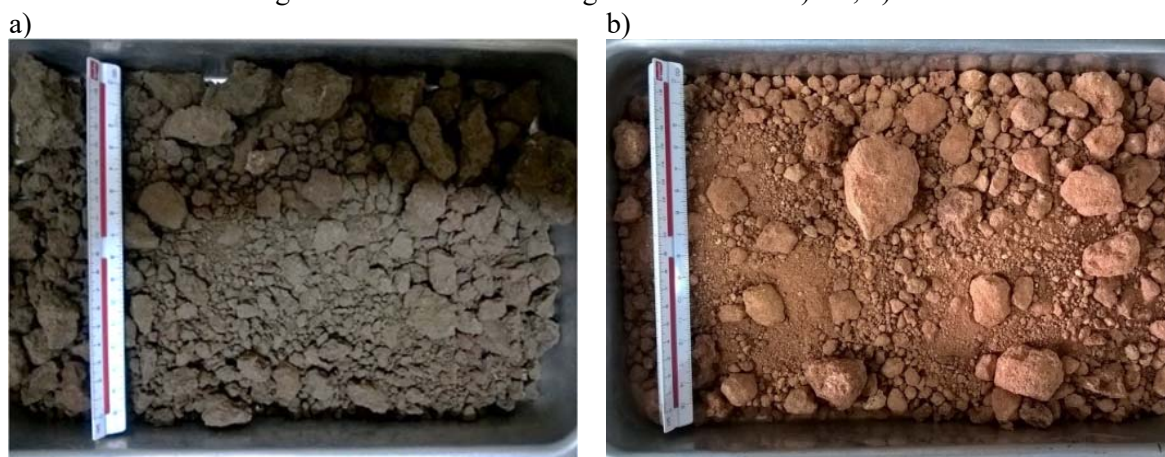
As amostras foram coletadas manualmente das pilhas de argilas utilizando uma pá, e foram armazenadas em baldes fechados até o dia de sua utilização.

5.3.2 Preparação das amostras de argila

A preparação das amostras de argila e de lodo foram realizadas no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI).

As amostras de argila foram secas ao ar, até atingirem a umidade higroscópica, e destorroadas em almofariz com auxílio de uma mão de gral, como recomendado NBR 6457 (ABNT, 2016d) (Figuras 19 e 20). A amostra então foi homogeneizada e quarteada de modo a se ter uma parcela representativa (Figura 21).

Figura 19 – Amostras das argilas secas ao ar: a) C1, b) C2



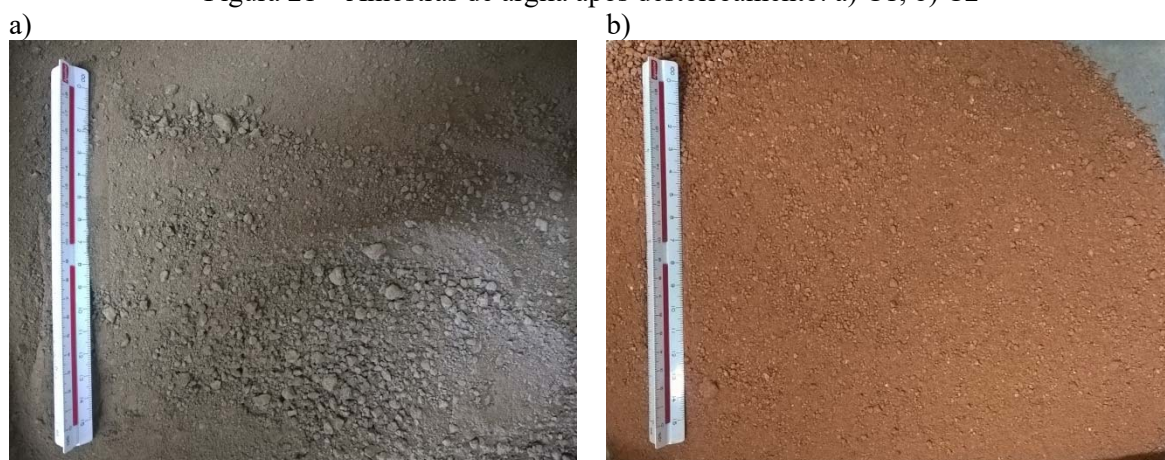
Fonte: A autora (2023).

Figura 20 – Destorroamento da argila em almofariz com auxílio de mão de gral



Fonte: A autora (2023).

Figura 21 – Amostras de argila após destorroamento: a) C1, b) C2



Fonte: A autora (2023).

5.3.3 Lodo de estação de tratamento de água

Das 22 ETA localizadas na RMR, apenas três contam com um sistema de tratamento de efluentes, ETEF: Pirapama, Botafogo e Gurjaú.

Os sistemas de tratamento de efluentes das ETA, fazem parte do sistema de tratamento de água e têm como objetivo retirar umidade do lodo, reduzindo seu volume, a fim de facilitar seu transporte e destinação adequada. Das três ETA mencionadas, apenas Pirapama e Botafogo estavam em funcionamento no período desse estudo, e tiveram material coletado para análise.

5.3.3.1 Estação de tratamento de água de Pirapama

A ETA Pirapama é a estação mais recente a entrar em funcionamento na RMR, sendo responsável pelo abastecimento da maior parte da região, com uma produção de cerca de 4,5 m³/s. O sistema é abastecido exclusivamente pela Barragem de Pirapama, possuindo mais três tomadas, que podem ser utilizadas no futuro. Após o tratamento da água, o resíduo gerado é disposto em lagoas de decantação, a fim de reduzir a umidade e facilitar o transporte até sua destinação final. Os detalhes de operação da ETA e do seu sistema de tratamento de resíduos consta no Apêndice A.

A coleta foi realizada no mês de maio, período chuvoso no Estado de Pernambuco. Segundo. Teixeira *et al.* (2004) o nível do rio, no qual é coletada a água para tratamento, influencia nos teores de argila e areia que ficam dispersos na água. A areia, que é mais densa, tende a precipitar, enquanto argila e silte permanecem por mais tempo na superfície. Assim, o lodo do período chuvoso é mais argiloso que os de estiagem (TEIXEIRA *et al.*, 2004).

O lodo coletado foi separado de modo que, parte foi seca ao ar, sendo exposto ao sol quando possível, parte foi seca em estufa e parte ficou *in natura*, para experimentos posteriores. A umidade inicial do lodo coletado foi de 735,33%, demorando cerca de 10 dias até que o lodo estivesse totalmente seco ao ar, sem necessidade de estufa.

5.3.3.2 Estação de tratamento de água de Botafogo

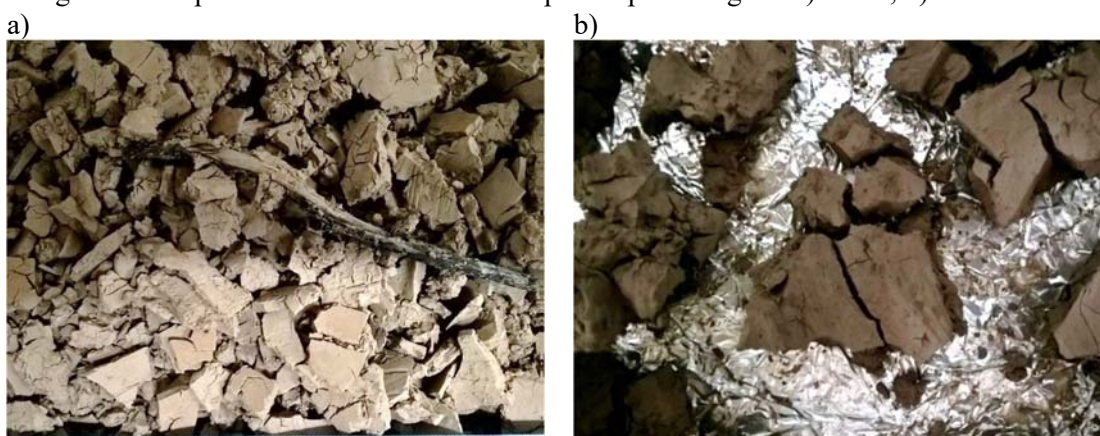
A ETA Botafogo, localizada no município de Igarassu, tem cerca de 30 anos de funcionamento, sendo hoje a principal responsável pelo abastecimento da zona norte da RMR. Na estação são tratados cerca de 1,1 m³/s de água por dia, mas sua capacidade pode ser aumentada para até 2,2 m³/s. Os detalhes de operação da ETA e do seu sistema de tratamento de resíduos consta no Apêndice B.

Em Botafogo, o espessamento do lodo se dá em *bags*. A fim de coletar uma amostra para a pesquisa, a *bag* foi aberta e coletados cerca de 30 litros de lodo. Este foi colocado em uma bombona que ficou vedada até a sua utilização.

5.3.3.3 Preparação das amostras de lodo

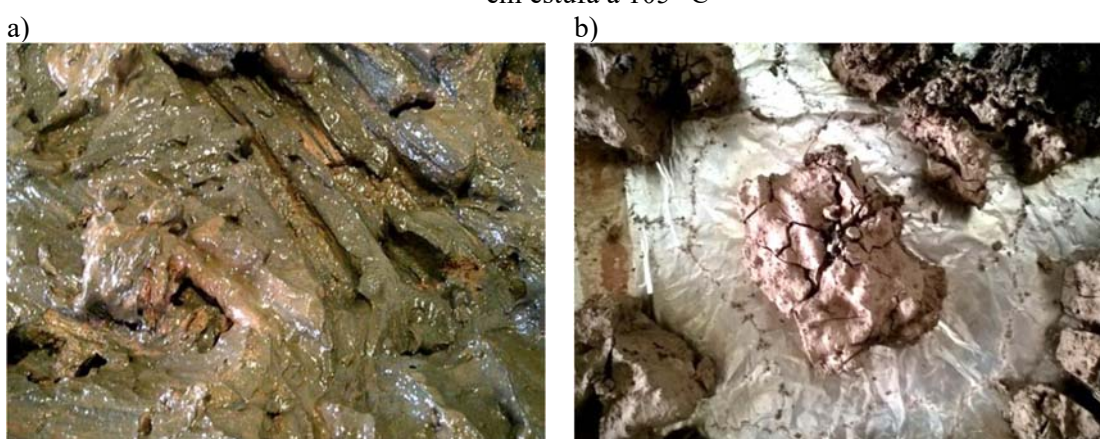
Foram separados cerca de 5 kg de amostra de cada lodo para os ensaios preliminares. Inicialmente uma porção do lodo foi colocada em bandejas plásticas para secagem ao ar e outra foi seca em estufa a $\pm 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ até massa constante. A aparência das duas amostras, tanto da ETA Pirapama quanto da ETA Botafogo após secagem, foi semelhante (Figuras 22 e 23)

Figura 22 – Aparência do lodo da ETA Pirapama após secagem: a) Ao ar; b) Em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fonte: A autora (2023).

Figura 23 – Lodo da ETA Botafogo: a) Lodo antes da secagem; b) aparência do lodo após a secagem em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$



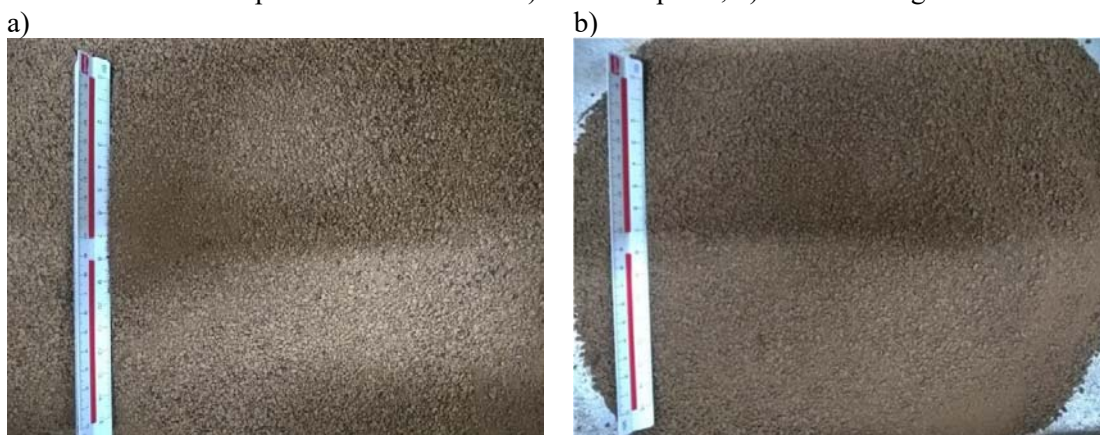
Fonte: A autora (2023).

Observou-se que, tanto as amostras secas ao ar, quanto as secas em estufa, adquiriram um aspecto rígido após a secagem, não sendo possível, sequer, desfazer os grumos com a mão. Desta forma, para reduzir seu diâmetro de modo a proceder os ensaios, as amostras secas em

estufa e as amostras secas ao ar foram submetidas a destorroamento manual, com mão de gral em almofariz, à semelhança ao destorroamento das argilas. O destorroamento foi realizado até o diâmetro dos grãos serem reduzidos à fração passante na peneira ABNT nº 10, com diâmetro máximo de grão igual a 2 mm (Figura 24).

Após o destorroamento manual, verificou-se que, o tamanho do grão obtido não representa a realidade do material, sendo então, resultado do método e da energia empregada na moagem. Observou-se ainda que o lodo não volta ao seu estágio original, sendo pouco solúvel em água (Figura 25).

Figura 24 – Amostras de lodo de ETA submetidas a destorroamento manual até fração passante na peneira ABNT nº 80: a) ETA Pirapama, b) ETA Botafogo



Fonte: A autora (2023).

Figura 25 – Aspecto granular da amostra do lodo coletado na ETA Botafogo durante a preparação para o ensaio de limite de liquidez



Fonte: A autora (2023).

Ao contrário do que acontece com a argila, os torrões não se desfazem facilmente dando origem aos grãos de lodo como esperado.

Uma explicação para este comportamento, pode ser a atribuição ao lodo de um comportamento coloidal. Segundo Rangel (2006), as dispersões coloidais apresentam estabilidade termodinâmica, devido à elevada energia livre acumulada na superfície das partículas. Quando há variação de suas propriedades como concentração, temperatura ou pH, há alteração na maneira como o coloide se comporta.

Quando há a secagem do material, por exemplo, a energia livre é reduzida, não havendo reações químicas, mas variando a entropia. O aumento da concentração pode ser dado até a concentração micelar crítica, quando o processo ainda é reversível. Contudo, em algumas dispersões, a secagem do material influi em suas propriedades de modo que este não pode ser facilmente reconstituído (RANGEL, 2006).

Esse comportamento também foi verificado por Ackah *et al.* (2018), o qual após secar o lodo a temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C, relataram a formação de grumos rígidos, graúdos e estáveis, cuja granulometria não poderia ser determinada pois não seria representativa.

Desta forma, para caracterização do lodo de ETA, optou-se por usá-lo em sua forma bruta, apenas com redução da umidade até o ponto em que o material não estivesse completamente seco, com aproximadamente 80% de água.

Para verificação da influência do tamanho de partícula do lodo na mistura binária, foram estudadas duas granulometrias: grãos com diâmetro máximo igual a 0,180 mm (fração passante na peneira ABNT n° 80) e grãos com diâmetro máximo igual a 0,075 mm (fração passante na peneira ABNT n° 200). A granulometria menor que 0,18 mm foi escolhida por se aproximar da faixa da areia fina, cuja presença na produção de cerâmica pode auxiliar no aumento da plasticidade e redução da retração (NBR 6502, ABNT, 1995). A mesma granulometria foi usada por Reis *et al.* (2014), que relatou aumento de resistência de suas amostras.

Os grãos com dimensão inferior a 0,075 mm, se encontram próximos à faixa do silte e podem auxiliar no empacotamento de partículas e melhorar o contato entre os grãos de argila e lodo. A mesma granulometria foi usada por Paixão *et al.* (2008) com a intenção de aumentar a resistência à flexão da cerâmica produzida.

O lodo seco em estufa foi colocado em um moinho de bolas e cominuído por 10 minutos. O objetivo com este tempo de moagem foi de gastar menos energia nesta etapa, otimizando o experimento. Contudo, após 10 minutos de moagem, percebeu-se que a maior parte dos grumos

de lodo ainda ficaram com o mesmo tamanho, enquanto a menor parte ficou pulverizada. Desta forma, mudou-se o tempo de moagem para 30 minutos, sendo a maior parte do material final passante na peneira ABNT n° 200.

O moinho de bolas utilizado neste estudo foi um cilíndrico com dimensões iguais a 30 x 26 cm com volume igual a 15,9 litros. Foram usadas esferas de porcelanas com três diâmetros: 35, 20 e 13 mm, com um total 8,6 kg, compostos por 3,32 kg de bolas menores, 2,16 kg de bolas médias e 3,12 kg das bolas maiores. A amostra usada durante a moagem foi de cerca de 1 kg, com uma velocidade de rotação igual a 50 rpm.

Dessa forma, a moagem não foi adequada para obtenção de partículas maiores, como as passantes na peneira n° 80, de modo que, para obtenção desta fração, o lodo foi moído em almofariz com o auxílio da mão de gral.

Outro fator influente apresentado na revisão foi a presença de matéria orgânica na mistura. Esta provoca porosidade nos corpos cerâmicos calcinados, reduzindo sua qualidade. Estudos anteriormente comentados (CRUZ *et al.*, 2016; KIZINIEVIČ *et al.*, 2013; MONTEIRO *et al.*, 2008; VITORINO; MONTEIRO; VIEIRA, 2009) demonstram por meio de ensaios termogravimétricos que a eliminação da matéria orgânica se dá por volta dos 500 °C, e o pico exotérmico dessa reação está em torno dos 300 °C. Logo, a maior parte do material perdido em função da temperatura está nesta faixa.

A temperatura escolhida para eliminação da matéria orgânica do lodo foi de 550 °C, com base na temperatura usada para quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos (CARMO; SILVA, 2012). O material, previamente seco em estufa a 105 °C e moído, foi colocado em uma mufla por 3 horas. Após esse tempo, verificou-se que o lodo se tornou mais claro e alaranjado, havendo partículas de cor preta na base do recipiente (Figura 26).

Figura 26 – Calcinação do lodo na mufla: a) lodo saído da mufla; b) detalhe do surgimento de partículas pretas na amostra



Fonte: A autora (2023).

5.3.4 Ensaios de caracterização

Como acontece com muitos resíduos aproveitados pela indústria brasileira, o lodo de ETA ainda não possui normas que o regulamentem como material reciclado e, portanto, não foram usadas normas para sua caracterização. Já as amostras de argilas seguiram as orientações de normas brasileiras. Os ensaios e suas possíveis normas estão relacionados na Tabela 8, indicando em quais materiais estes foram aplicados.

Tabela 8 – Ensaios de caracterização das matérias primas

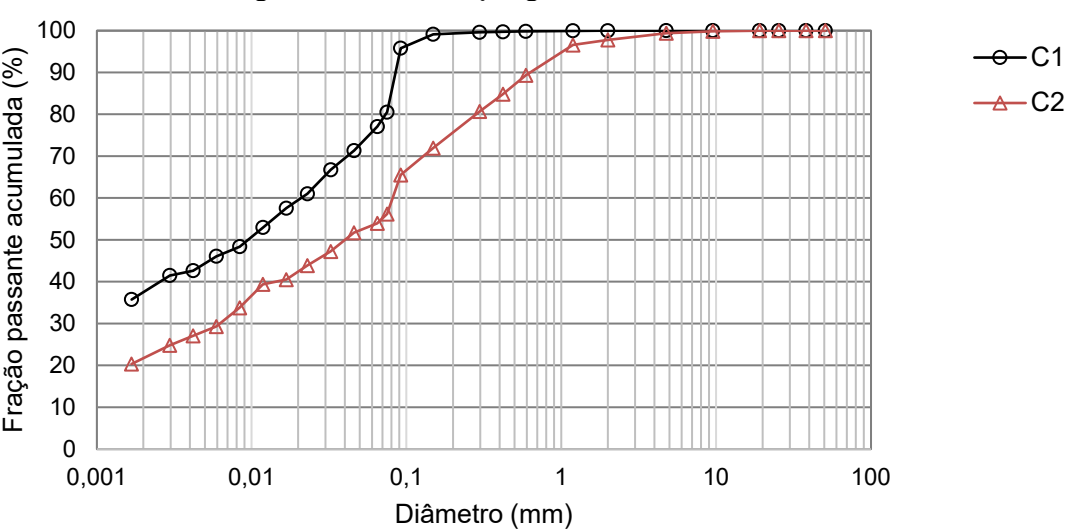
Ensaio	Norma	Lodo	Argila
Composição granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016).		x
Análise do tamanho de partícula (ATP)		x	
Determinação do limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016).		x
Determinação do limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016).		x
Composição química por fluorescência de Raios-X (FRX)		x	x
Composição Mineralógica por difração de Raios-X (DRX)		x	x

Fonte: A autora (2023).

5.3.4.1 Composição granulométrica

As análises granulométricas das amostras de solo foram realizadas por uma combinação de peneiramento e sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016) no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Com os valores obtidos, foram montadas curvas de distribuição granulométrica, apresentados na Figura 27.

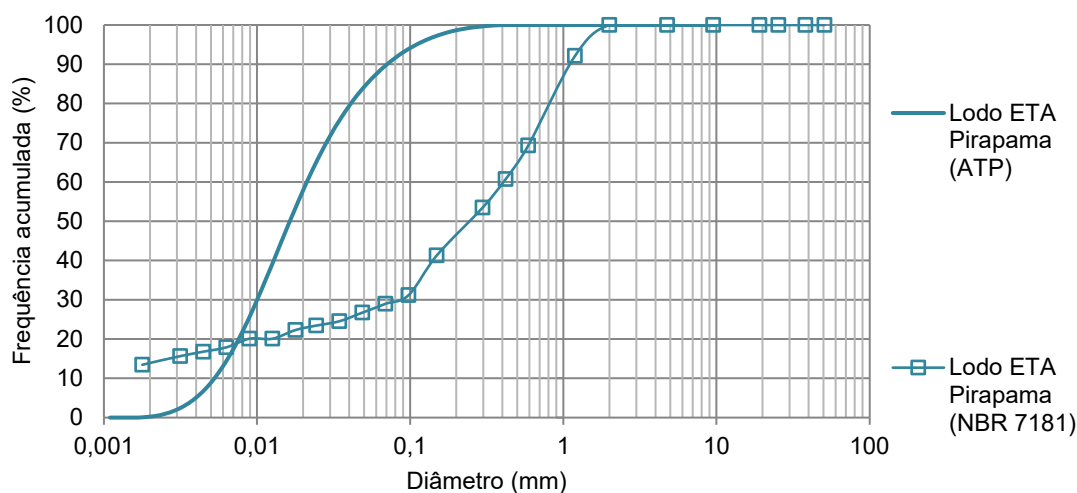
Figura 27 – Distribuição granulométrica dos solos



Fonte: A autora (2023).

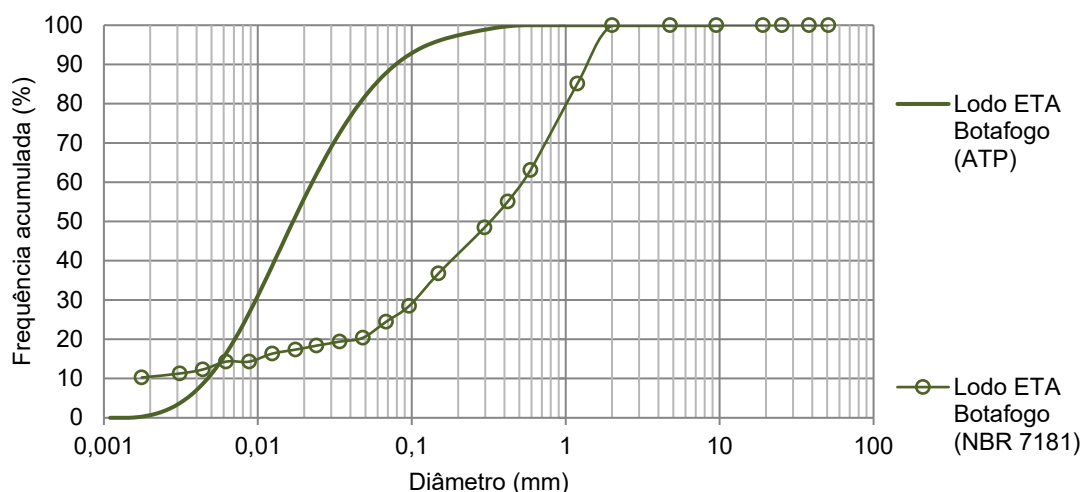
A constatação da influência da força empregada na cominuição do lodo no tamanho de partícula resultante foi feita durante o ensaio de granulometria. Foi realizada a mesma combinação de peneiramento e sedimentação usada anteriormente para argilas, no lodo e, posteriormente foi realizado um ensaio com o lodo bruto em um analisador de tamanho de partícula (ATP), com o equipamento Mastersizer 2000 da Malvern, no Laboratório de Tecnologia Mineral da UFPE (LTM), a fim de comparar estas duas condições do lodo. Estes resultados podem ser vistos nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Distribuição granulométrica da amostra do lodo da ETA Pirapama



Fonte: A autora (2023).

Figura 29 – Distribuição granulométrica da amostra do lodo da ETA Botafogo



Fonte: A autora (2023).

Observando os parâmetros dados na Tabela 9, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), construiu-se a Tabela 9, onde estão indicadas as proporções de cada fração dos materiais.

Tabela 9 – Classificação granulométrica das amostras dos lodos de ETA de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995)

Classificação segundo o tamanho de grão (%)	C1	C2	Lodo ETA Pirapama (ATP)	Lodo ETA Pirapama (NBR 7181)	Lodo ETA Botafogo (ATP)	Lodo ETA Botafogo (NBR 7181)
Pedregulho	0,05	2,24	-	-	-	-
Areia grossa	0,17	8,45	-	30,67	-	36,88
Areia média	0,20	8,64	1,19	18,82	2,37	14,56
Areia fina	22,53	26,74	11,22	24,53	11,88	24,04
Silte	16,07	10,09	87,16	15,52	85,24	14,319
Argila	60,98	43,85	0,44	13,45	0,51	10,25

Fonte: A autora (2023).

5.3.4.2 Limites de Atterberg

Para determinação do limite de liquidez e de plasticidade das amostras, foram observadas as recomendações dadas pela NBR 6459 e pela NBR 7180 (ABNT, 2016a; 2016b). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Para realização do ensaio, as amostras de lodo bruto estavam muito úmidas, não sendo possível determinar liquidez ou plasticidade. Optou-se por fazer os ensaios com o lodo seco e moído, mas o material tem pouca afinidade com a água, havendo a formação de uma película de água sobre a parte sólida (Figura 30). O lodo tem o comportamento de uma areia siltosa. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 10.

Figura 30 – Formação de película sobre a amostra de lodo coletado na ETA Pirapama durante a preparação para o ensaio de limite de liquidez



Fonte: A autora (2023).

As argilas C1 e C2 são classificadas como solos finos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). No SUCS os solos são classificados com base no teor de finos e limites de

consistência das amostras (PINTO, 2006). De acordo com o SUCS, C1 é uma argila de baixa plasticidade (CL) e C2, um silte de baixa plasticidade (ML).

Tabela 10 – Limites de Atterberg das amostras de argila e lodo

Materiais	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
C1	39,65	20,89	18,76
C2	47,14	32,53	14,61
Lodo ETA Pirapama	-	-	NP
Lodo ETA Botafogo	-	-	NP

Nota: NP = Não plástico.

Fonte: A autora (2023).

5.3.4.3 Composição química por fluorescência de Raios-X

A fim de identificar a composição química das matérias primas estudadas, foi realizado o ensaio de fluorescência de Raios-X nos Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos e Laboratório de Isótopos Estáveis, NEG-LABISE, da UFPE.

As amostras usadas no ensaio foram em forma de pó, sendo moídas e peneiradas até a granulometria passante na peneira nº 200 (0,075 mm) e secas em estufa a 110 °C. Uma porção de amostra seca foi prensada em cápsulas de alumínio com 30 toneladas força. Estas pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. A determinação foi feita com perda ao fogo a 950 °C. Os resultados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição química das matérias primas obtidas por FRX

Amostra	Composição química (% de massa)													
	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	K₂O	MgO	Na₂O	P₂O₅	SO₃	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	BaO	P.F.
C1	54	21,82	7,02	2,42	2,81	2,09	0,96	0,23	0,1	0,98	0,02	0,12	0,12	7,15
C2	44,6	30,13	9,33	0,5	1,28	0,82	0,27	0,07	0,1	1,04	0,01	Nd	0,07	11,7
Lodo ETA Pirapama	27,3	27,01	14,26	0,08	0,42	0,2	Nd	0,23	0,8	0,84	0,02	0,09	Nd	28,7
Lodo ETA Botafogo	28,3	29,6	13,6	0,14	0,19	0,08	0,02	0,3	0,6	0,6	0,01	Nd	Nd	26,5

Nota: Nd = não detectado; P.F. = Perda ao fogo.

Fonte: A autora (2023).

A composição majoritária das amostras é de sílica, alumina e óxido de ferro, confirmando o observado na bibliografia. C1 possui mais agentes fundentes que C2. A presença de materiais fundentes, tais como Na₂O, MgO, K₂O, CaO e Fe₂O₃, são importantes na composição para facilitar a fusão e aumentar a formação de fases cristalinas, principalmente quando a argila é rica em quartzo (TOYA *et al.*, 2007).

O lodo tem maiores percentuais de óxido de ferro do que as argilas, característica conferida pela qualidade da água que passou pelo tratamento. Além de ser um agente fundente, o Fe_2O_3 se decompõe em temperaturas entre 800 e 1000 °C, sendo responsável pela formação de hematita. Teores acima de 5% de Fe_2O_3 provocam a formação de compostos de ferro que influem na formação de fases vítreas, formando conglomerados fortes (YATSENKO; YATSENKO; ZAKARLYUKA, 2017).

5.3.4.4 Composição mineralógica por difração de Raios-X

A determinação da composição mineralógica das matérias primas foi realizada por difração de Raios-X pelo método do pó. As amostras de lodo e argila foram secas em estufa a 105 ± 5 °C e cominuídas até a fração passante na peneira ABNT nº 200 (0,075 mm).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes – LabTag, da UFPE, usando o equipamento D2 PHASER, da Bruker. Foi utilizado um anteparo de 3 mm, com feixe de 1,00 mm, velocidade de rotação igual a 15 rad/s. A varredura usada foi com 2 θ indo de 5 a 80°, com um passo igual a 0,05 a cada 0,575 segundos, para todas as amostras. Os bancos de dados utilizados foram do ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) e do COD (*Crystallography Open Database*). O software usado para as análises qualitativas foi o DIFFRAC.EVA 5.2.

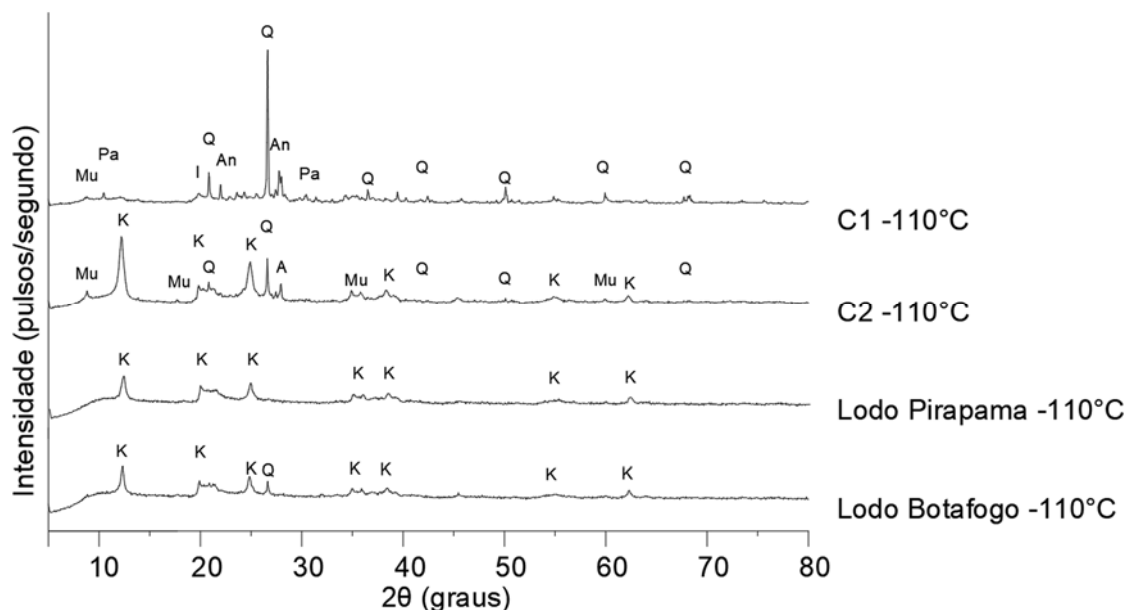
Os padrões de difração obtidos estão na Figura 31. A informações dadas nos difratogramas, corroboram os dados da análise química, uma vez que seus principais componentes são variações dos principais óxidos presentes.

A presença do quartzo se evidencia em C1, aparecendo com menor intensidade em C2 e no lodo. C2 apresenta picos de muscovita, que não são vistos em C1. Os minerais micáceos influenciam no limite de plasticidade de C2, que é maior que o de C1, uma vez que minerais com clivagem definida facilitam a orientação da água.

O lodo da ETA Pirapama apresenta picos de caulinita, com a presença de picos de outros minerais, dificilmente identificáveis.

No Lodo da ETA Botafogo, se vêem picos de caulinita, mica e quartzo, mostrando que também há semelhança mineralógica entre lodo e argilas. A ausência de picos de difração com presença de ferro indicam que o ferro deve estar presente na forma amorfa nas amostras (MILOŠEVIĆ *et al.*, 2019).

Figura 31 – Padrões de difração das matérias primas. Legenda: A, Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$); An, Anortita ($((\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8)$); K, Caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$); Mu, Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$); P, Pargasita ($\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$); Q, Quartzo (SiO_2)



Fonte: A autora (2023).

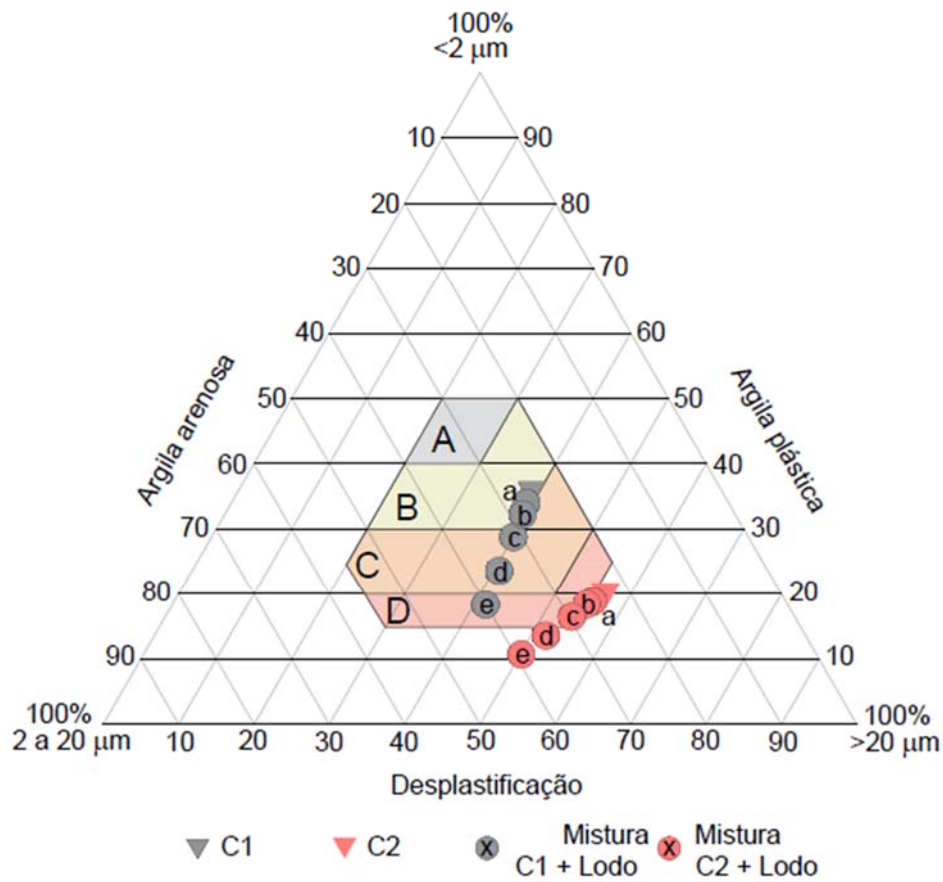
Tendo em vista a semelhança física, química e mineralógica entre os lodos estudados, apenas o lodo coletado na ETA Botafogo foi estudado nas composições cerâmicas formuladas. O lodo coletado para experimento nesta ETA se encontrava menos úmido, facilitando os processos de transporte, secagem e o desenvolvimento dos ensaios. O lodo da ETA Botafogo será identificado como “S”, nas composições em que este está presente, no restante deste trabalho.

5.4 MISTURAS BINÁRIAS LODO × ARGILA

O Diagrama Winkler, cujo objetivo foi explicado no tópico 2.1.3, foi usado como base para estabelecer as proporções possíveis de incorporação do lodo (Figura 32). O lodo bruto foi misturado com as argilas para determinação dos percentuais a serem estudados. A escolha do lodo em sua forma bruta se deu em função da dificuldade na produção das misturas em função da sua alta umidade inicial.

Com base no diagrama, observa-se que C1 se classifica para uso em telhas e C2 está fora de classificação. À medida em que o lodo é incorporado à C1, há tendência à desplastificação. O uso de até 50% de lodo em substituição à C1 torna-a, teoricamente, aplicável para produção de tijolos maciços. A presença de lodo em C2 também provoca a desplastificação da argila, mas após 20% de substituição, o material produzido está teoricamente desclassificado para produção de artefatos de cerâmica vermelha.

Figura 32 – Diagrama Winkler com formulações em estudo



Onde:

a: 5%;

b: 10%;

c: 20%;

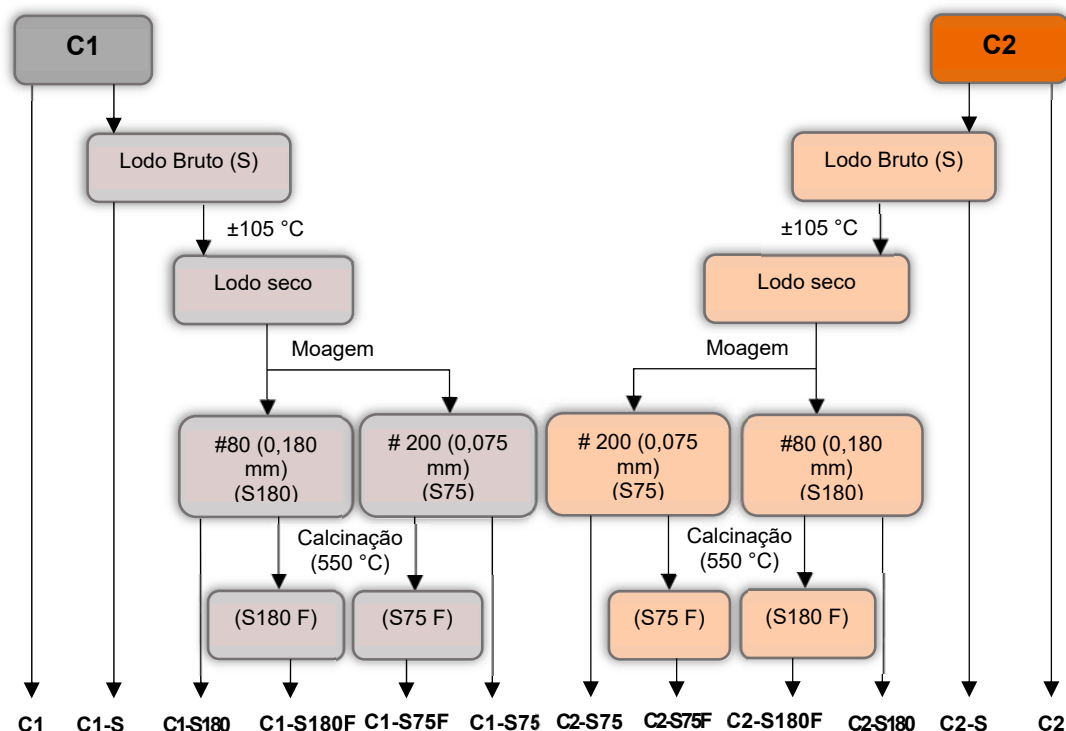
d: 35%;

e: 50% de substituição de argila por lodo.

Fonte: A autora (2023).

Limitou-se a substituição de C1 e C2 por até 20% de lodo para fins de comparação entre os efeitos do lodo em solos diferentes. Desta forma, as proporções de lodo empregadas no experimento foram de 5, 10 e 20%. A Figura 33 mostra o fluxograma de elaboração das misturas e a Tabela 12 apresenta a composição de cada mistura produzida.

Figura 33 – Fluxograma de elaboração das misturas lodo × solo



Fonte: A autora (2023).

Tabela 12 – Composição das misturas entre argila e lodo de ETA

Séries	Materiais (% de massa)						
	C1	C2	S75	S75F	S180	S180F	S
C1	100	-	-	-	-	-	-
C1-S75	95 – 80	-	5 – 20	-	-	-	-
C1-S75F	95 – 80	-	-	5 – 20	-	-	-
C1-S180	95 – 80	-	-	-	5 – 20	-	-
C1-S180F	95 – 80	-	-	-	-	5 – 20	-
C1-S	95 – 80	-	-	-	-	-	5 – 20
C2	-	100	-	-	-	-	-
C2-S75	-	95 – 80	5 – 20	-	-	-	-
C2-S75F	-	95 – 80	-	5 – 20	-	-	-
C2-S180	-	95 – 80	-	-	5 – 20	-	-
C2-S180F	-	95 – 80	-	-	-	5 – 20	-
C2-S	-	95 – 80	-	-	-	-	5 – 20

Onde: S75 = lodo moído com diâmetro inferior a 0,075 mm; S75F = lodo moído com diâmetro inferior a 0,075 mm aquecido a 550 °C; S180 = lodo moído com diâmetro inferior a 0,180 mm; S180F = lodo moído com diâmetro inferior a 0,180 mm, aquecido a 550 °C; S = lodo bruto.

Fonte: A autora (2023).

5.4.1 Ensaios de caracterização das misturas

Um dos fatores determinantes para a qualidade dos corpos de prova é a quantidade de água usada na mistura. As recomendações de Santos (1989) são de cerca de 50% do limite de

plasticidade das amostras. As Tabelas 13 e 14 apresentam os limites de plasticidade das misturas binárias estudadas.

Tabela 13 – Limites de plasticidade para séries produzidas com C1

Séries	Limite de plasticidade (%)			
	Proporções de lodo na mistura			
	0%	5%	10%	20%
C1	25,34%			
C1-S75		27,66%	28,10%	31,56%
C1-S75F		28,12%	28,88%	33,25%
C1-S180		28,17%	26,76%	29,67%
C1-S180F		24,73%	28,33%	31,95%
C1-S		28,61%	34,41%	43,53%

Fonte: A autora (2023).

Tabela 14 – Limites de plasticidade para séries produzidas com C2

Séries	Limite de plasticidade (%)			
	Proporções de lodo na mistura			
	0%	5%	10%	20%
C2	32,99%			
C2-S75		44,19%	42,58%	40,29%
C2-S75F		36,83%	41,42%	47,78%
C2-S180		38,58%	35,62%	43,42%
C2-S180F		34,58%	41,15%	38,28%
C2-S		36,73%	42,85%	51,78%

Fonte: A autora (2023).

A comparação entre os LP das séries mostra que, quanto maior a quantidade de lodo de ETA maior a plasticidade obtida, isto é, a mistura precisa de mais água para desenvolver plasticidade. As amostras desenvolvidas com C1 demonstram que, o limite de plasticidade aumenta discretamente com a redução do tamanho do grão e com a calcinação do lodo. Há aumento do limite de plasticidade quando o lodo substitui C2. Isto ocorre devido à redução do teor de grãos na faixa da areia, o que aumenta o contato entre os grãos, dificultando o deslizamento e demandando mais água na mistura (SANTOS, 1989).

5.4.2 Produção dos corpos de prova

A produção dos corpos de prova, bem como os procedimentos adotados para sua caracterização física e mecânica seguiram as recomendações de Santos (1989) para a caracterização de argilas. Para tanto, foi confeccionado um molde em aço, com dimensões internas iguais a $60 \times 20 \times 5$ mm (Figura 34). Santos (2016) utilizou corpos de prova em tamanho real e produziu blocos

cerâmicos com argila e lodo. Os resultados obtidos demonstraram que sequer os blocos de referência apresentaram qualidades aceitáveis segundo as normas brasileiras. Logo, o sistema produtivo de cerâmica vermelha requer uma preparação para produção de blocos com materiais alternativos, e o uso de corpos de prova menores reduz a possibilidade de erros e aumentam o número de repetições dos ensaios.

Figura 34 – Molde metálico para produção dos corpos de prova: a) molde montado; b) molde em 3 partes



Fonte: A autora (2023).

As misturas foram umedecidas com auxílio de um borrifador, sendo homogeneizadas manualmente. A recomendação dada por Camapum de Carvalho *et al.* (2015) é que, uma vez que o processo de homogeneização e manuseio provoca a perda de água do material, deve-se compensar com a adição de 10 a 20% de água na mistura. Contudo, se verificou que, no caso presente, a adição de 5% a mais de água foi suficiente para se atingir a umidade ideal. As amostras ficaram em repouso por 24 h em recipiente fechado a fim de que a umidade pudesse ser distribuída por toda a massa. Assim, se estabeleceu nesse experimento que o teor de água usado na moldagem é de $50 \text{ a } 55\% \pm 0,5\text{g}$.

Após o repouso, uma porção da mistura é colocada na forma para prensagem. Como as quantidades de água são variáveis em cada caso, foi necessária a correção da quantidade de amostra a ser usada em cada série de corpos de prova. Isto é, já que as amostras de argila de referência usaram, em geral, menos água que as demais, o uso de 8 g de argila implicou na produção de corpos de prova com cerca de 80% de argila e 20% de água, por exemplo. Logo, se ajustou a quantidade de massa em função do teor de mistura em cada caso, tomando como base, a quantidade de argila das amostras de referência. As umidades iniciais usadas na produção de cada série estão relacionadas nas Tabelas 15 e 16 e as massas iniciais nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 15 – Teor de água inicial de moldagem dos corpos de prova das séries produzidas com C1

Séries	Teor de água inicial de moldagem dos corpos de prova (%)			
	Proporções de lodo na mistura			
	0%	5%	10%	20%
C1	12,69			
C1-S75		13,22	12,22	16,20
C1-S75F		11,29	13,13	22,39
C1-S180		10,77	14,93	13,13
C1-S180F		13,53	11,88	12,50
C1-S		11,70	12,89	15,86

Fonte: A autora (2023).

Tabela 16 – Teor de água inicial de moldagem dos corpos de prova das séries produzidas com C2

Séries	Teor de água inicial de moldagem dos corpos de prova (%)			
	Proporções de lodo na mistura			
	0%	5%	10%	20%
C2	18,75			
C2-S75		22,75	23,24	21,11
C2-S75F		30,5	16,52	24,09
C2-S180		19,63	17,61	22,08
C2-S180F		20,91	18,92	19,14
C2-S		15,90	17,46	19,85

Fonte: A autora (2023).

Tabela 17 – Massa inicial média dos corpos de prova das séries produzidas com C1

Séries	Massa inicial dos corpos de prova (g)			
	Proporções de lodo na mistura			
	0%	5%	10%	20%
C1	9,14			
C1-S75		9,22	9,11	9,55
C1-S75F		9,02	9,21	8,73
C1-S180		9,31	9,24	9,39
C1-S180F		9,13	9,32	9,52
C1-S		9,34	9,66	9,83

Fonte: A autora (2023).

Tabela 18 – Massa inicial média dos corpos de prova das séries produzidas com C2

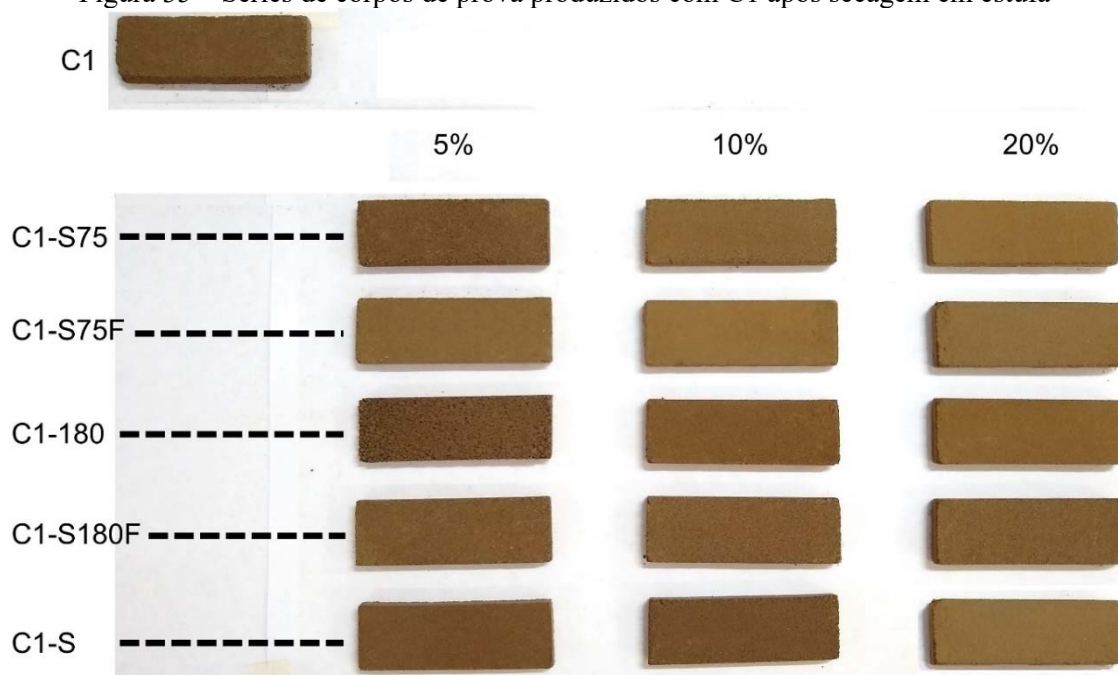
Séries	Massa inicial dos corpos de prova (g)			
	Proporções de lodo na mistura			
	0%	5%	10%	20%
C2	9,51			
C2-S75		10,36	10,42	10,14
C2-S75F		9,91	9,70	10,54
C2-S180		9,95	9,71	10,27
C2-S180F		10,12	9,87	9,89
C2-S		8,54	9,17	9,98

Fonte: A autora (2023).

A força usada na prensagem foi igual a 19,61 MPa e, após a desmoldagem, os corpos de prova foram secos ao ar por 24 h antes de serem colocados na estufa por mais 24 h a 105 °C. Apesar de Santos (1989) não sugerir a secagem ao ar após o desmolde, este procedimento se fez necessário, uma vez que a tentativa de encaminhar os corpos de prova para a estufa resultou na formação de microfissuras, resultantes da expulsão da água, reduzindo sua resistência mecânica.

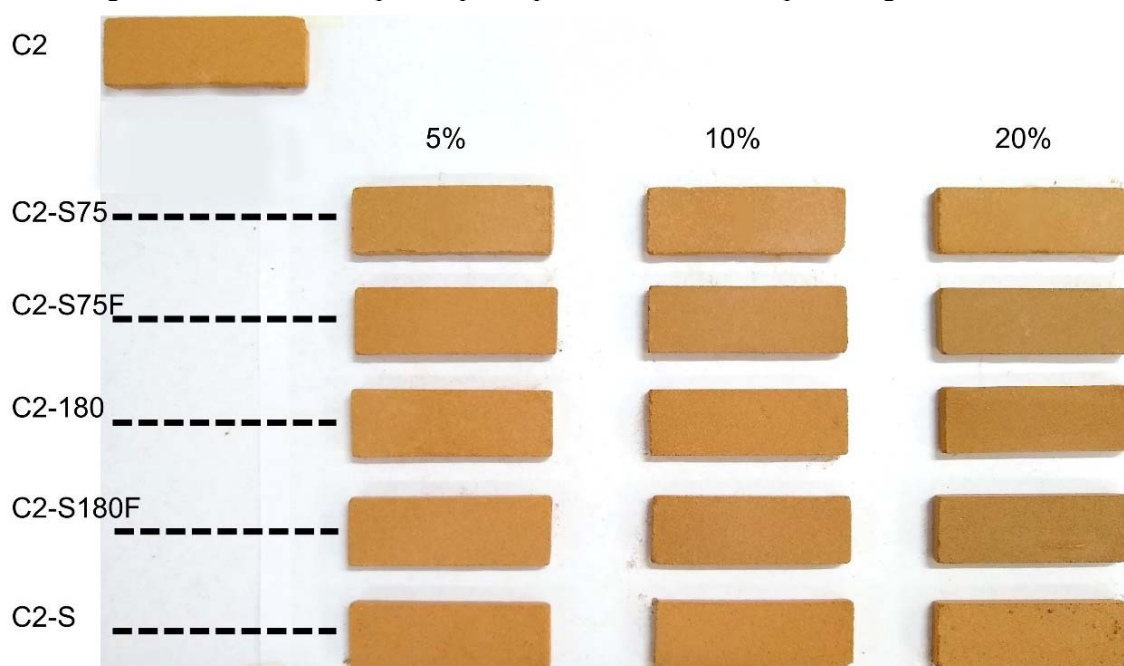
A Figura 35 apresenta as séries de corpos de prova produzidas com C1 após a secagem em estufa. Com relação às outras séries, pode-se perceber que, a adição do lodo à argila torna as peças discretamente mais claras em relação à amostra de referência. Em geral, as peças são semelhantes umas às outras. Por outro lado, os corpos de prova produzidos com C2 se tornam mais escuros com adição do lodo, sendo também parecidos entre si (Figura 36).

Figura 35 – Séries de corpos de prova produzidos com C1 após secagem em estufa



Fonte: A autora (2023).

Figura 36 – Séries de corpos de prova produzidos com C2 após secagem em estufa



Fonte: A autora (2023).

Foram produzidos 9 corpos de prova para cada série, a fim de obter resultados em triplicata para cada ensaio de caracterização. A relação dos ensaios realizados está descrita na Tabela 19 e seguiram os procedimentos recomendados por Santos (1989).

Tabela 19 – Quantidades de corpos de prova usados nos ensaios de caracterização

Ensaio	Quantidade de corpos de prova
Perda relativa de massa (%)	6
Massa específica aparente (g/cm ³)	3
Retração linear (%)	6
Absorção de água (%)	3
Tensão de ruptura à flexão (kgf/cm ²)	3
Composição mineralógica por difração de Raios-X	1

Fonte: A autora (2023).

5.4.3 Calcinação dos corpos de prova

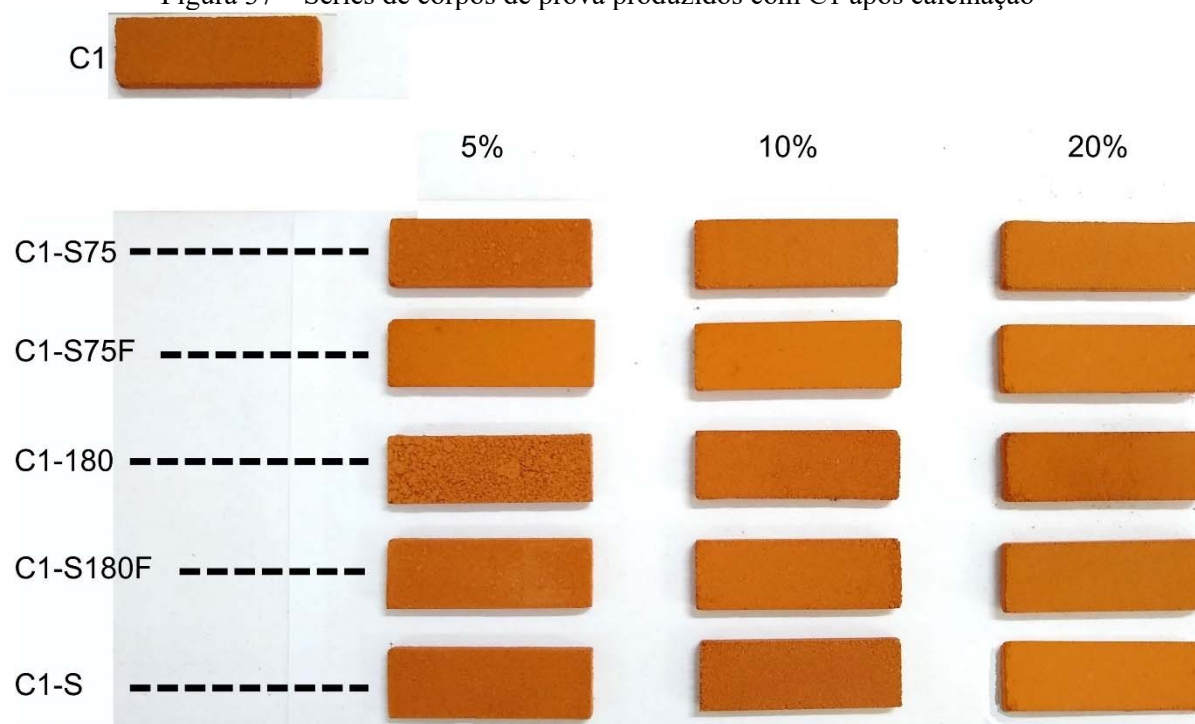
Um dos principais fatores de variação das propriedades dos corpos cerâmicos é temperatura de calcinação empregada. Estudos realizados demonstraram que, temperaturas abaixo de 900 °C resultam em qualidade inferior às temperaturas acima dessa faixa, sendo valores abaixo de 900 °C pouco efetivos em termos de resultados (BENLALLA *et al.*, 2015; OLIVEIRA; HOLANDA, 2008; REIS *et al.*, 2014; TEIXEIRA *et al.*, 2011; VIEIRA, MARGEM;

MONTEIRO, 2008). Desta forma, foi empregada a temperatura de calcinação igual a 950 °C, uma vez que, segundo Santos (1989) esta também é a temperatura de calcinação usual de cerâmicas vermelhas.

Os corpos de prova das diversas misturas foram submetidos à calcinação a 950 °C em uma mufla no Galpão de Engenharia Civil, da UFPE. A rampa de aquecimento estabelecida foi igual a 10 °C/min. Após atingir a temperatura máxima, 950 °C, a calcinação continuou por 3 horas e, após esse período, a mufla foi desligada e esperou-se por cerca de 12 horas até o resfriamento do equipamento e retirada dos corpos de prova.

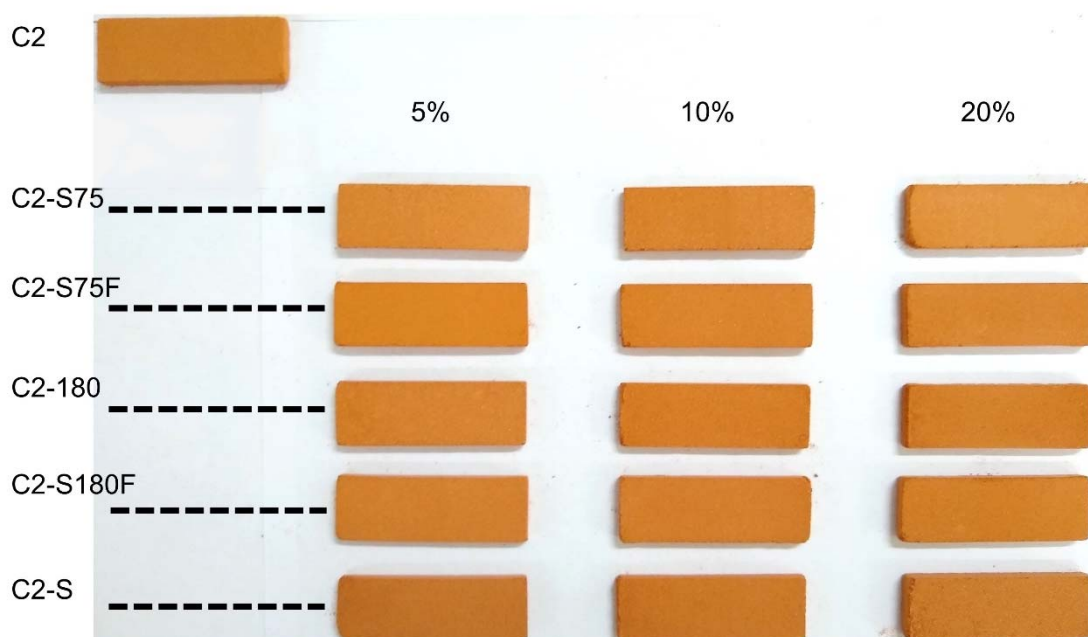
Observou-se que os corpos de prova produzidos com C1, que apresentavam uma coloração mais escura, adquiriram uma cor alaranjada após a calcinação, se assemelhando àqueles produzidos com C2 (Figuras 37 e 38). O sistema de cores de Munsell, classifica os corpos de prova produzidos com C1 como vermelhos (2.5 YR 4/8) e com C2 como vermelhos claros (2.5 YR6/6), variando a saturação da cor quando incorporado 20% de lodo (2.5 YR6/8).

Figura 37 – Séries de corpos de prova produzidos com C1 após calcinação



Fonte: A autora (2023).

Figura 38 – Séries de corpos de prova produzidos com C2 após calcinação



Fonte: A autora (2023).

5.4.3.1 Perda relativa de massa após calcinação

A perda de massa após a calcinação dos corpos de prova tem interferência direta na qualidade do material estudado. Uma alta perda de massa, pode estar relacionada com uma alta retração e com a formação de fissuras que provocam prejuízos na resistência mecânica.

Estudos realizados confirmam, por meio de análise termogravimétrica que, os últimos picos térmicos associados à perda de massa do lodo e da argila ocorrem por volta dos 930 °C, associado à dissociação da metacaulinita, decomposição do carbonato e transformação alotrópica do quartzo-β em tridimita (MONTEIRO *et al.*, 2008; TANTAWY; MOHAMED, 2017). Logo, com a calcinação dos corpos de prova a 950 °C, a maior parte do material suscetível ao aumento de temperatura já tem sido consumido. Rodrigues (2016), ainda afirma que, esta perda de massa é compatível com os resultados de perda ao fogo dos materiais.

A perda relativa de massa dos corpos de prova após a calcinação pode ser calculada por meio da Equação (1).

$$PM_c (\%) = \frac{M_s - M_c}{M_c} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

PM_c: Perda relativa de massa na calcinação (%);

M_s: Massa do corpo de prova seco (g);

M_c: Massa corpo de prova calcinado a 950 °C (g).

5.4.3.2 Massa específica aparente

A massa específica aparente dos corpos de prova após a sinterização foi calculada com base em (2).

$$MEA (\%) = \frac{PA}{AA} \quad (2)$$

Onde:

PA: Porosidade aparente (%);

AA: Absorção de água. (%).

5.4.3.3 Retração após calcinação

Os corpos de prova calcinados, foram medidos com o auxílio de um paquímetro em sua longitude, e a retração após a calcinação foi calculada com base na Equação (3):

$$RL_c (\%) = \frac{L_s - L_c}{L_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

RL_c: Retração linear após calcinação (%);

L_s: Comprimento do corpo de prova após secagem a 105 ± 5 °C (m).

L_c: Comprimento do corpo de prova após calcinação a 950 °C (m).

5.4.3.4 Absorção de água

Os corpos de prova foram pesados e, após isso, submersos em água destilada por 24 h. Depois desse período, foram pesados novamente para cálculo de sua massa saturada, de acordo com a Equação (4).

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

AA: Absorção de água (%);

M_u: Massa do corpo de prova saturado (g).

M_s: Massa do corpo de prova seco após calcinação a 950 °C (g).

5.4.3.5 Tensão de ruptura à flexão dos corpos de prova calcinados

Foram realizados ensaios de tensão de ruptura à flexão nos corpos de prova calcinados em uma prensa de compressão numa velocidade de carregamento de 0,45 mm/min (Figura 39). O ensaio foi realizado no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. A tensão de ruptura à flexão foi calculada pela Equação (5).

Figura 39 – Ensaio de tensão de ruptura à flexão



Fonte: A autora (2023).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5)$$

Onde:

σ : Tensão de ruptura à flexão (MPa);
 P: Carga aplicada (N);
 L: Distância entre os cutelos de apoio (m);
 b: Largura do corpo de prova (m);
 d: Espessura do corpo de prova (m).

5.4.3.6 Composição mineralógica e microestrutura dos corpos de prova calcinados

Após a calcinação dos corpos de prova, foram escolhidas séries para observação de sua composição mineralógica por difração de Raios-X. Das séries produzidas com C1 foram analisadas a série de referência e as séries com 10% de lodo. Já nas séries produzidas com C2, foram analisadas a série de referência e as produzidas com 20% de lodo. Estas séries foram escolhidas com o objetivo de observar os diferentes métodos de beneficiamento nos corpos de prova produzidos. Os corpos de prova foram moídos até se obter uma fração passante na peneira n° 200. Com este pó, foram realizados ensaios de DRX no LabTag da UFPE.

Das séries analisadas por DRX, foram selecionadas C1, C1-S 10%, C2 e C2S180F 20% para a observação em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE, em um equipamento JEOL JSM 6460 com espectrômetro de dispersão de comprimento de onda (WDS; Marca Oxford). Em materiais cerâmicos, o MEV auxilia na observação da formação de novas fases, identificando os mecanismos de transformação no processo de sinterização e as morfologia das fases cristalizadas (RAVISHANKAR; CARTER, 1999).

Os corpos de prova usados no ensaio de tensão de ruptura à flexão foram observados na superfície de fratura, revestida com carbono, com o objetivo de observar sua microestrutura e confirmar a presença dos produtos formados durante a calcinação.

5.4.4 Análise dos resultados

A influência da redução do tamanho de grão e da calcinação das amostras de lodo na composição da cerâmica foi analisada por meio de uma análise de regressão. O objetivo deste método é observar os ajustes do modelo observado às respostas obtidas por meio dos ensaios (BARROS NETO, SCARMINIO; BRUNS, 2001).

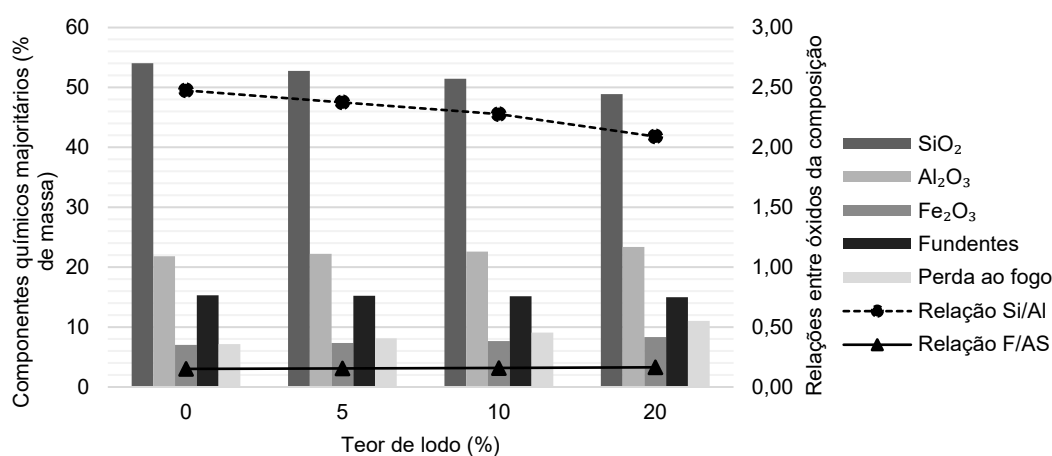
Foram elaboradas tabelas para análise de regressão e de análise de variâncias (ANOVA). Foram consideradas as seguintes variáveis: tipo de argila (C1 e C2); tamanho máximo de grão do lodo (0,075 mm, 0,180 mm e o lodo bruto); calcinação do lodo (sim ou não) e o teor de lodo (0, 5, 10 e 20%). Foi analisada a dependência de cada variável, para os resultados de massa específica, retração após calcinação, absorção de água e resistência à tração na flexão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 PROPRIEDADES QUÍMICAS, MINERALÓGICAS E MICROESTRUTURAIS

A composição química das séries em estudo é semelhante nas séries com o lodo bruto e com o lodo apenas moído (S, S180 e S75). De forma a entender as propriedades das séries elaboradas, as Figuras 40 e 41 apresentam as composições químicas, com base nos óxidos majoritários, fundentes e perda ao fogo dos corpos de prova produzidos com C1-S, com os diversos teores de lodo.

Figura 40 – Composição química majoritária e mineralógica das séries produzidas com C1



Fonte: A autora (2023).

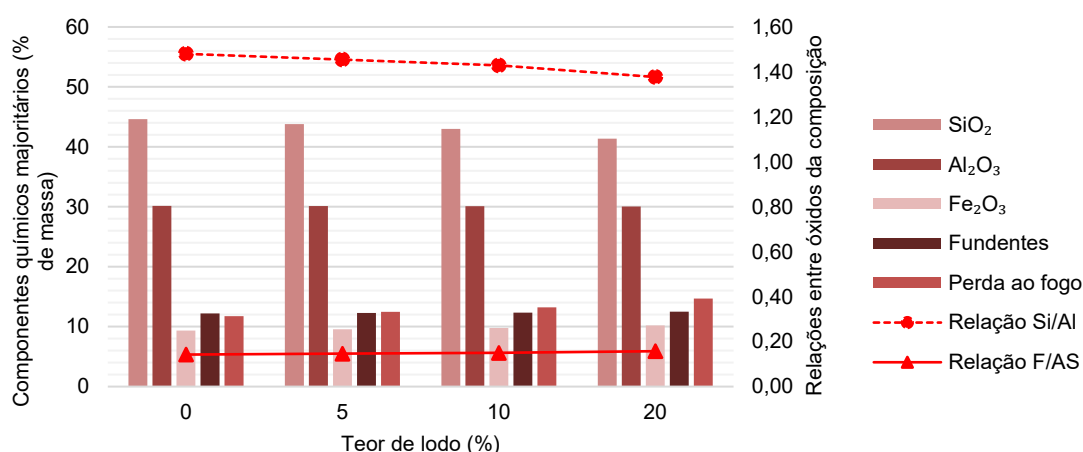
Observam-se poucas variações nos percentuais dos óxidos, contudo, algumas alterações podem ser relevantes. A presença do lodo nas séries produzidas com C1, provoca redução do teor de SiO₂, enquanto aumenta Al₂O₃ e Fe₂O₃ (Figura 40). A redução de SiO₂ bem como o aumento de Fe₂O₃ contribuem para o aumento de retração e absorção nos corpos cerâmicos, como observado em Tartari *et al.* (2011). Já o aumento de teor de Al₂O₃ não está relacionado ao aumento de argilominerais nas séries produzidas, mas à presença de sulfato de alumínio no lodo de ETA. Observa-se também que houve pouca alteração no teor de fundentes, uma vez que C1 tem 15,30% e C1-S, com 20% de lodo tem 14,98%. Contudo houve variação de 7,5% para 11,02% da perda ao fogo quando adicionado 20% de lodo. Essa variação é significativa uma vez que pode representar o aumento da porosidade após a calcinação.

As relações entre os óxidos presentes nas composições demonstram que há redução da relação Si/Al, e pouca variação de F/AS. Analisando a relação entre os óxidos das composições em relação à revisão bibliográfica, observa-se que com C1 são semelhantes ao encontrado em Benlalla *et al.* (2015) e Monteiro *et al.* (2008), havendo redução da relação Al/Si, pouca

alteração da relação F/AS e redução do teor de fundentes. Para os autores estudados, essas características influenciam na formação de uma cerâmica porosa, com formação de poros maiores e aumento da absorção (CHIANG, CHIEN; HWANG, 2008).

A incorporação do lodo à C2 reduziu o teor de SiO_2 , aumentou o teor de Fe_2O_3 , havendo pouca variação de Al_2O_3 (Figura 41). A redução no teor de SiO_2 pode facilitar a interação do lodo com a argila uma vez que o quartzo possui pouca afinidade com a água. Há pouca variação no teor de fundentes, cerca de 2%, quando comparados os percentuais de C2 e C2-S 20%. A incorporação de lodo aumenta a perda ao fogo em cerca de 17%, entre C2 e C2-S 20%, podendo resultar no aumento de falhas na estrutura da cerâmica. A relação Si/Al é menor nas composições com o lodo, o que pode ocasionar o aumento do tamanho dos poros, a exemplo das composições com C1. De mesmo modo, houve pouca alteração na relação F/SA.

Figura 41 – Composição química majoritária e mineralógica das séries produzidas com C2



Fonte: A autora (2023).

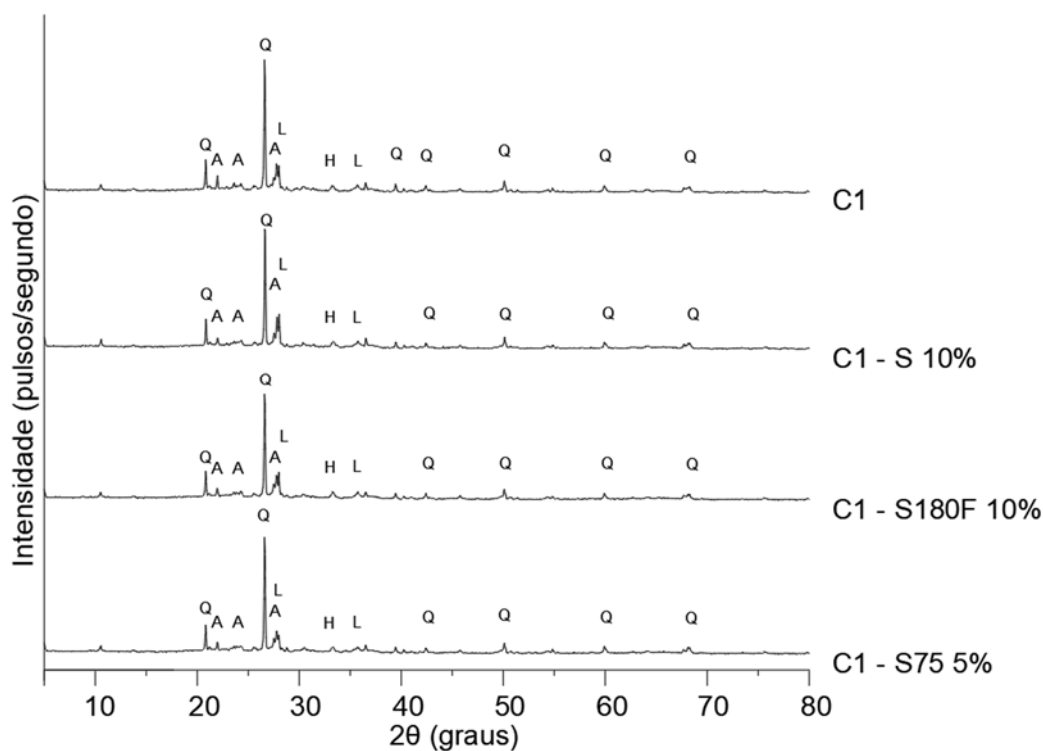
A composição mineralógica das séries produzidas, foi determinada por meio de DRX. Tendo em vista o grande número de misturas e percentuais, foram escolhidas aquelas que poderiam evidenciar o efeito da composição granulométrica e da calcinação do lodo. Das séries produzidas com C1: C1-S 10%, C1-S180F 10% e C1-S75 5%, e das séries produzidas com C2: C2-S 10%, C2-S180F 10% e C2-S75 5%.

A Figura 42 apresenta os difratogramas das séries produzidas com C1. Observa-se que a forma de beneficiamento bem como o teor de lodo incorporado, traz poucas alterações com relação aos minerais formados após a calcinação dos corpos de prova. Os picos de difração observados com C1-S 10%, são mais evidentes que os das demais amostras, podendo estar relacionados a

um aumento de temperatura do sistema, provocado por sua alta perda ao fogo (SILVA NASCIMENTO *et al.*, 2019; VIEIRA; RAMOS; VIEIRA, 2007).

Os minerais que compõem a cerâmica C1 são quartzo, albita, labradorita e hematita, semelhantes aos minerais observados por Kizinievič *et al.* (2013) após análise da cerâmica calcinada a 1000 °C. Devido ao alto ponto de fusão do quartzo (cerca de 2100 °C), ele não sofre transformações na estrutura cerâmica calcinada a 950 °C. A formação de hematita ocorre entre 200 e 463 °C, com a transformação de oxihidróxido férrico hidratado em sua forma cristalina (KIZINIEVIC *et al.*, 2017).

Figura 42 – Difratogramas de séries produzidas com C1. Legenda: Q, Quartzo (SiO_2); A, Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$); L, Labradorita ($(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$); H, Hematita (Fe_2O_3)

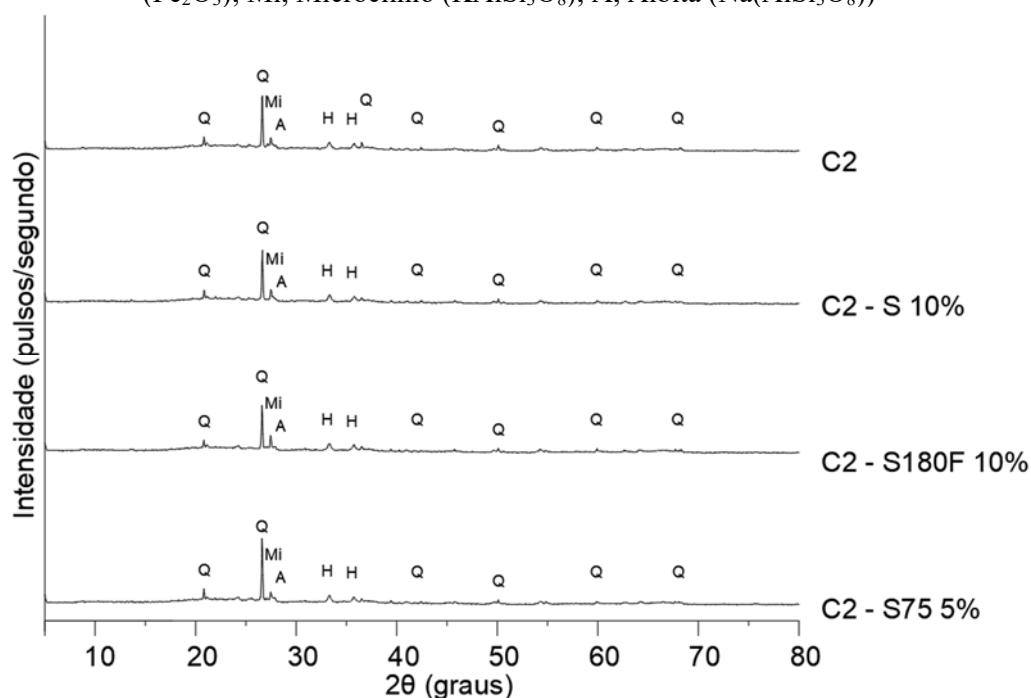


Fonte: A autora (2023).

Das séries produzidas com C2, nota-se a eliminação da caulinita e da muscovita em função da calcinação (Figura 43). Houve manutenção dos picos de quartzo e o surgimento de hematita. Há pouca diferença entre os difratogramas das séries estudadas.

A comparação entre os difratogramas resultantes de C1 e C2, demonstra que os picos de difração são mais evidentes em C1, indicando uma melhor cristalização do material cerâmico. Essa característica pode ter sido provocada pelo maior teor de fundentes em C1, o que reduz a temperatura necessária para formação de fase líquida (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

Figura 43 – Difratomogramas das séries produzidas com C2. Legenda: Q, Quartzo (SiO_2); H, Hematita (Fe_2O_3); Mi, Microclínio (KAlSi_3O_8); A, Albita ($\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$)



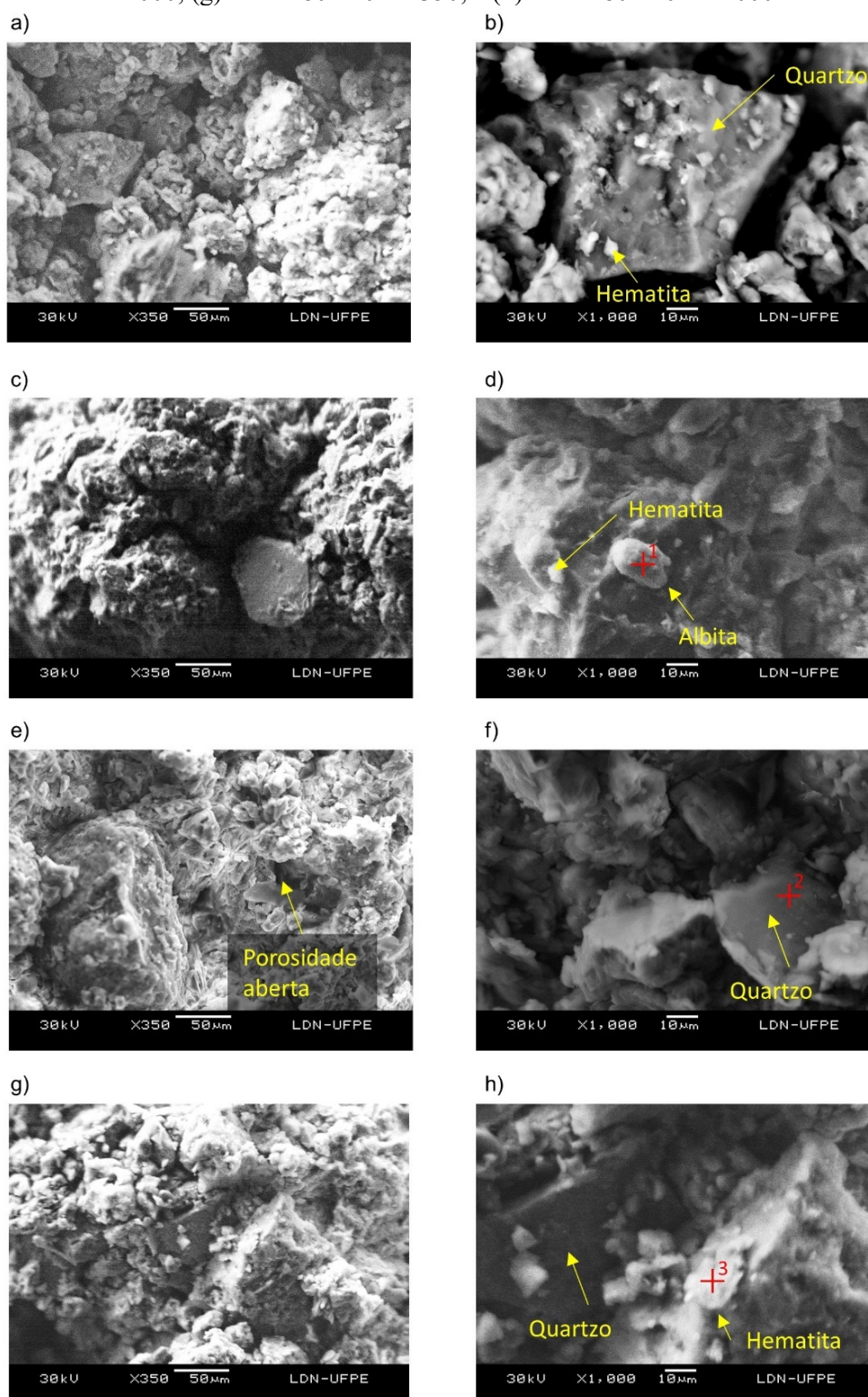
Fonte: A autora (2023).

O quartzo presente nas matérias primas passa por mudanças de fase durante a calcinação, provocando alterações volumétricas que podem influenciar negativamente nas propriedades dos corpos de prova. O aquecimento a 573 °C, resulta em transformação de β -Quartzo para α -Quartzo, causando um aumento de volume de cerca de 1% (HEINRICH; GOMES, 2014). Também há expansão da caulinita em cerca de 0,3% entre 470-550 °C, seguido de contração de cerca de 3% entre 600 e 920 °C, devido à eliminação das hidroxilas (CHAKRABORTY, 2014). Essa movimentação provoca a formação de fissuras no corpo cerâmico, podendo resultar em maior absorção de água em menor resistência.

As imagens de MEV, mostram a aparência granular dos corpos de prova produzidos (Figura 44). A Figura 44a, apresenta a micrografia da amostra C1, na qual observam-se fissuras e formação de poros, decorrentes da eliminação de orgânicos da argila. Em (b) visualizam-se cristais de quartzo, com estrutura trigonal, cobertos com hematita. O cristal solto, indica a fragilidade da estrutura devido à baixa coesão dos minerais e à alta porosidade aberta. A micrografia da amostra C1-S 10% (Figura 44c, d) evidencia a baixa interação entre os grãos de quartzo e a estrutura cerâmica. Contudo, é possível perceber a maior coesão entre os grãos em relação à C1. A micrografia de C1-S indica melhor sinterização da amostra, devido ao aumento de temperatura do sistema, anteriormente descrita. A aproximação da imagem mostra que as

estruturas de C1 (b) e C1-S 10% (d) são semelhantes, mas C1-S 10% têm mais coesão entre suas partículas.

Figura 44 – Imagens de MEV obtidos na superfície de fratura nos corpos de prova sinterizados a 950 °C: (a) C1 $\times 350$, (b) C1 $\times 1000$, (c) C1-S 10% $\times 350$, (d) C1-S 10% $\times 1000$, (e) C2 $\times 350$, (f) C2 $\times 1000$, (g) C2-S180F 20% $\times 350$, e (h) C2-S180F 20% $\times 1000$



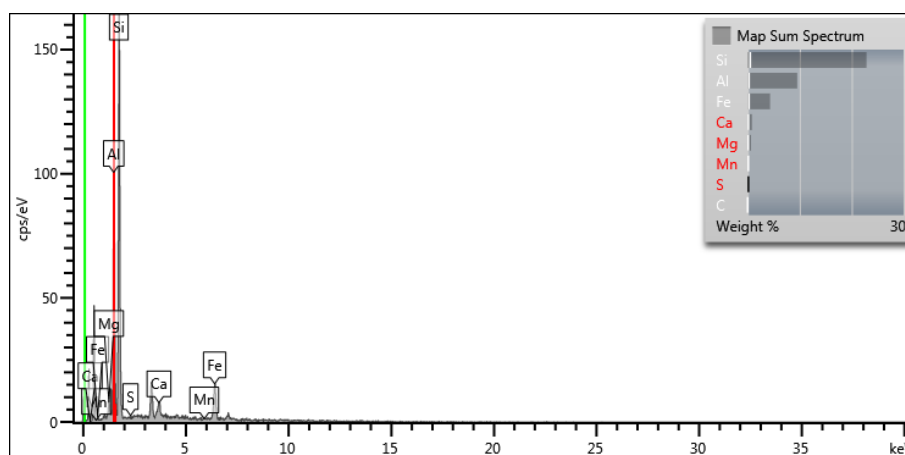
Fonte: A autora (2023).

A micrografia de C2 mostra a alta granulação, indicando uma fraca sinterização. Há uma alta porosidade fechada, resultado da perda de matéria orgânica e da desidroxilação da caulinita (Figura 44e). Do mesmo modo, a micrografia de C2-S180F 20% (Figuras 44f), mostra grãos pouco coesos e baixa cristalização, o que gera o surgimento de uma porosidade aberta, devido ao pouco contato entre os grãos. A eliminação de orgânicos, não resultou, visualmente, em redução da porosidade. A presença de minerais de quartzo, observados na aproximação das imagens, confirma a baixa afinidade deste mineral com a estrutura cerâmica (Figuras 44f, h) (TEIXEIRA, *et al.*, 2006).

As análises por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) são semelhantes entre as amostras analisadas (Figura 45). Observa-se a predominância de minerais como Si, Al e Fe, com sobreposição entre estes sendo possível reconhecer os cristais de quartzo e hematita. Uma vez que há sobreposição de informações, algumas estruturas não foram tão visíveis por meio de EDS, sendo pouco conclusivas. A identificação da estrutura da albita foi comparada com as imagens de MEV obtidas por Rouabhia, Nemamcha e Moumeni (2018).

Figura 45 – Espectro de EDS das amostras: a) 1 – C1-S 10%; b) 2 – C2; e c) 3 – C2-S180F 20%

a)



b)

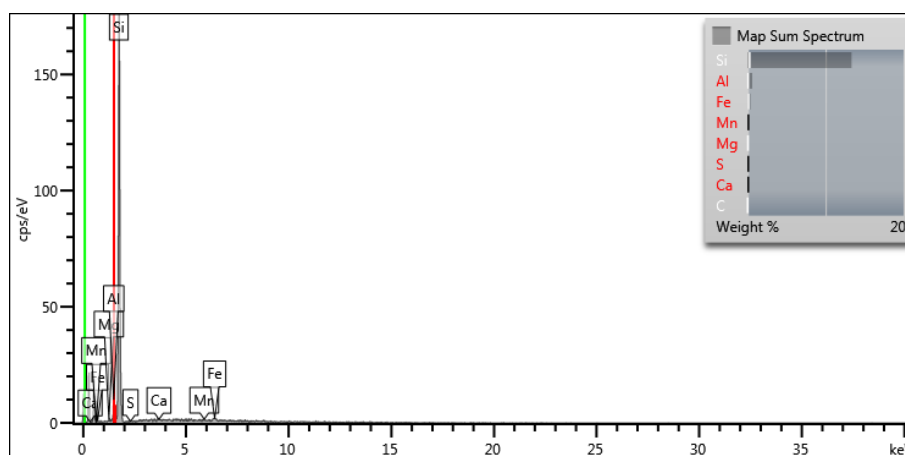
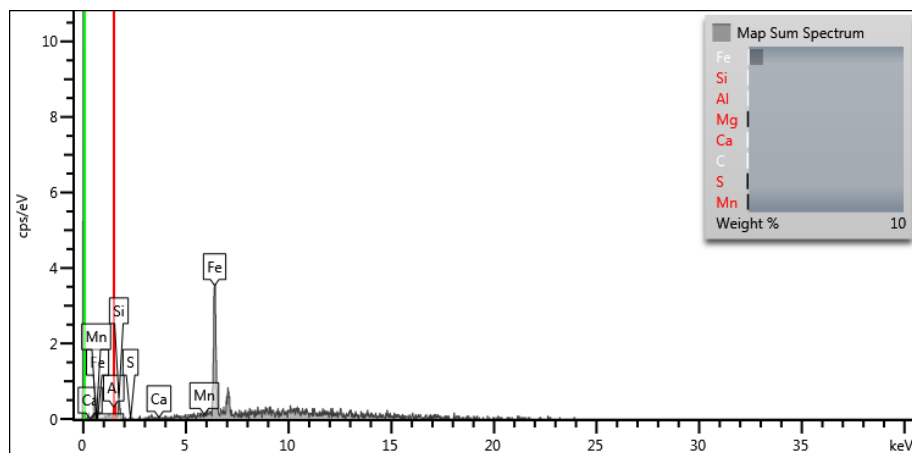


Figura 45 – Espectro de EDS das amostras: a) 1 – C1-S 10%; b) 2 – C2; e c) 3 – C2-S180F 20% (Cont.)

c)



Fonte: A autora (2023).

6.2 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS APÓS CALCINAÇÃO

6.2.1 Perda relativa de massa após calcinação

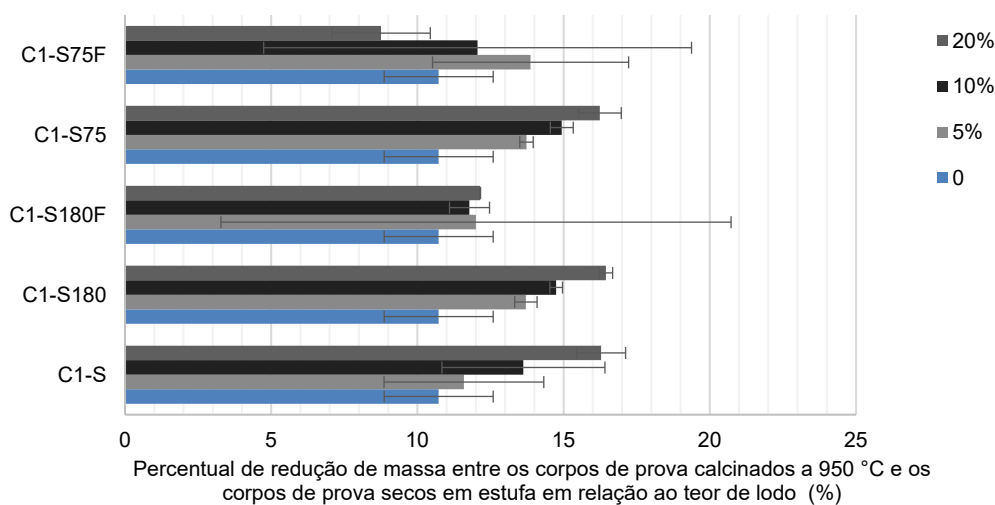
As Figuras 46 e 47 apresentam graficamente a perda de massa nos corpos de prova produzidos com C1 e C2. Os resultados correlacionam os valores médios das massas dos corpos de prova secos em estufa com as massas dos corpos de prova calcinados, resultando em um percentual de perda de massa.

Os corpos de prova produzidos com C1 tiveram perda de massa média igual a 10,73%. Houve aumento da perda de massa com a incorporação de lodo, ressalvadas algumas séries. As séries C1-S180 e C1-S75, apresentaram um padrão semelhante, no qual o aumento do percentual de lodo se relaciona com o aumento de perda de massa, não havendo correlação com o tamanho de grão. A presença do lodo aumenta o teor de orgânicos, resultando em uma maior perda de massa em relação à amostra de referência.

Na série C1-S, observou-se que, apesar do lodo possuir o mesmo teor de orgânicos das séries anteriores, a aproximação das partículas de lodo e argila, influenciada pelo comportamento coloidal do lodo, provocou a densificação desses corpos de prova, principalmente com a incorporação de 5% de lodo.

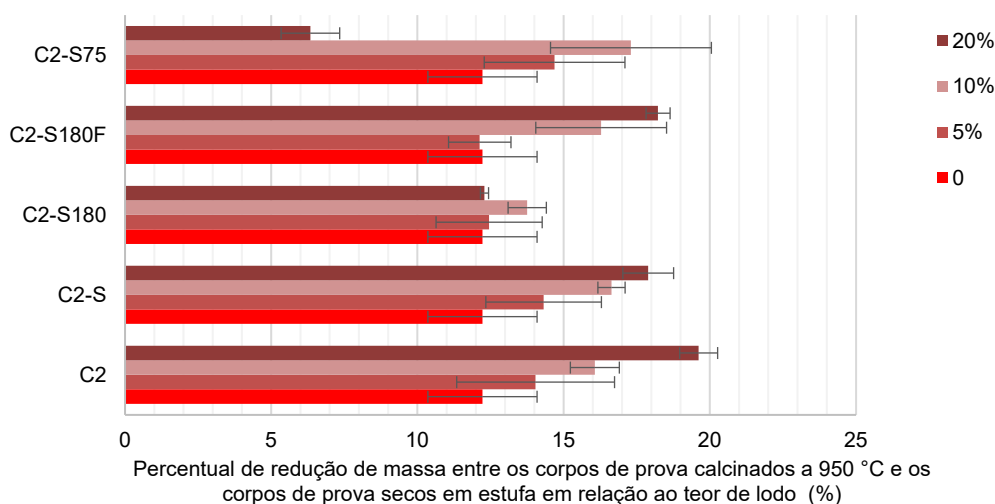
A série C1-S180F mostrou uniformidade das perdas de massa com relação ao percentual de lodo. A série C1-S75F, mostrou comportamento oposto à C1-S75, confirmando a pouca relação do tamanho de grão com a perda de massa nos corpos de prova contendo lodo. A adição de lodo calcinado resultou em uma redução progressiva da perda de massa.

Figura 46 – Perda de massa após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1



Fonte: A autora (2023).

Figura 47 – Perda de massa após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2



Fonte: A autora (2023).

Os corpos de prova produzidos com C2 apresentaram perda de massa média após a calcinação igual a 12,22%, valor superior a C1. Essa diferença deve-se à maior perda ao fogo observada no solo C2 em relação à C1. Além disso, a composição mineralógica de C2 inclui argilominerais do grupo da caulinita, perdendo íons de hidroxila (OH⁻) em temperaturas entre 450 e 650 °C.

Minerais tais como a muscovita e caulinita, presentes em C2, também têm maior capacidade de retenção de água entre as suas camadas estruturais, em relação à minerais como o quartzo e anortita presentes em C1, também contribuem para a maior perda de massa durante a calcinação

Pode-se observar que a incorporação do lodo provocou redução da perda de massa. Os corpos de prova produzidos com C2-S, mostraram redução da perda de massa quando usados 5% de lodo, havendo aumento com percentuais maiores. Essa redução pode ter relação com a aproximação das partículas e densificação do corpo de prova durante a calcinação associada a distribuição do tamanho de partícula.

As séries C2-S75 e C2-S180 demonstram comportamento semelhante ao observado em C1, não havendo relação da perda de massa com o tamanho dos grãos de lodo, mas com o percentual de lodo incorporado, que aumentou o teor de orgânicos na composição.

Também, semelhantemente a C1, C2-S75F e C2-S180F mostram que há interferência na perda de massa quando o lodo é previamente calcinado.

Em geral, a perda de massa dos corpos de prova após a calcinação está principalmente relacionada com a alta perda ao fogo do lodo, o que provocou a eliminação de massa dos corpos de prova durante a calcinação. Não houve relação com o tamanho de grão e não foi possível observar influência da alteração de composição química e mineralógica provocada pela presença do lodo nas substituições de até 20%.

Contudo, entre os solos estudados, C1 e C2, observa-se que a perda de massa tem relação com a mineralogia, uma vez que está associada à estrutura dos minerais, sua capacidade de adsorção de água e atividade físico-química. Logo, a caulinita presente em C2, colabora para que sua perda de massa após a calcinação seja maior que em C1.

6.2.2 Massa específica

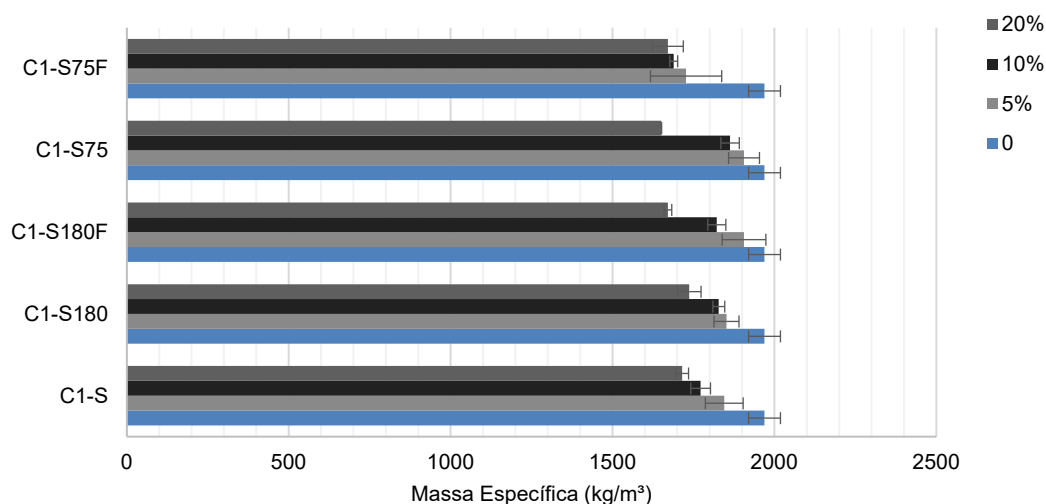
As Figuras 48 e 49 apresentam os resultados dos ensaios de massa específica. Para fins de análise entre os diversos modos de beneficiamento, o gráfico compara as séries com a massa específica referente a cada teor de lodo estudado.

A massa específica média dos corpos de prova produzidos com C1 é igual a 1969 kg/m³. Este valor é reduzido quando há a incorporação de lodo, em qualquer modo de beneficiamento. Também é possível observar uma progressiva redução da massa específica com o aumento do teor de lodo, relacionado com o aumento da perda ao fogo da composição.

Os resultados mostram que há interferência do tamanho do grão na massa específica dos corpos de prova. Quando comparados os valores de C1-S180 e C1-S75, observa-se que o uso de grãos com diâmetro abaixo de 0,075 mm resulta em corpos de prova com maior massa específica (1906 kg/m³) que aqueles cujo diâmetro máximo é igual a 0,180 mm (1852 kg/m³). O aumento

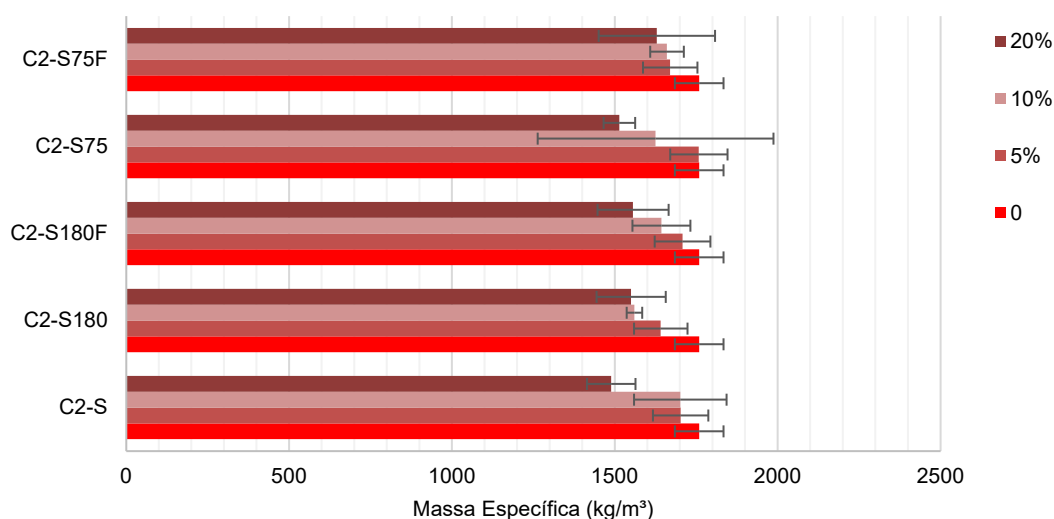
é de aproximadamente 3% quando usado 5% de lodo, 2% com 10% de lodo e redução de 5%, com 20% de lodo. Esse comportamento está associado ao empacotamento dos grãos e a aproximação dos grãos de lodo aos grãos do solo. A incorporação do lodo em C1-S75 aumentou os grãos na faixa do silte enquanto em C1-S180, aumentou os grãos na faixa do silte e da areia em relação à amostra de referência.

Figura 48 – Massa específica após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1



Fonte: A autora (2023).

Figura 49 – Massa específica após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2



Fonte: A autora (2023).

Também pode-se observar interferência da calcinação do lodo na massa específica dos corpos de prova. Os resultados mostram que, com até 5% de lodo, C1-S180F tem massa específica superior (1906 kg/m^3) a C1-S180 (1852 kg/m^3), havendo posterior redução para ambas as séries. C1-S75F apresenta valores inferiores a C1-S75, em cerca de 10%, com 5 e 10% de lodo. Esses resultados mostram que, apesar da influência da matéria orgânica na densificação dos corpos de prova, ela também é fundamental para o aumento na temperatura do sistema (UKWATTA *et al.*, 2015). C1-S apresentou comportamento semelhante às outras séries com redução da massa específica relacionada com aumento do teor de lodo.

Os corpos de prova produzidos com C2 têm massa específica média igual a 1759 kg/m^3 , inferior à média de C1. A baixa densificação de C2 está associada com suas características já mencionadas quando observada a perda relativa de massa após a calcinação. Também deve-se observar que C1 apresenta maior teor de óxidos fundentes (15,30%) que C2 (13,73%), o que facilita a formação de fases desse material.

Houve redução da massa específica em todas as séries produzidas com lodo, independentemente do tipo de beneficiamento utilizado.

O tamanho de grão do lodo teve influência sobre os resultados de massa específica. Quando comparados os valores de C2-S180 e C2-S75, observa-se que houve redução progressiva de massa com o aumento do teor de lodo, mas que essa redução ocorreu de forma distinta quando usados grãos de tamanho diferentes. C2-S75 com 5% de lodo, apresentou resultados semelhantes (1758 kg/m^3) ao da amostra de referência, indicando pouca interferência deste percentual de lodo na matriz argilosa. A incorporação de S180 aumenta o teor de grãos na faixa da areia e reduz na faixa do silte e argila. Já S75 aumenta o teor de grãos na faixa do silte reduzindo areia e argila. Logo, o aumento de grãos com diâmetro máximo igual a 0,180 mm, provocou a baixa interação entre lodo e argila, prejudicando a densificação dos corpos de prova.

Os corpos de prova com o lodo calcinado apresentaram massas específicas superiores à com o lodo apenas moído. Quando comparados resultados de C2-180F com C2-180, observou-se que os valores foram de 5 a 7% maiores quando o lodo foi calcinado.

Os resultados observados nas séries produzidas com C1 e C2 demonstram a influência da perda ao fogo do lodo na densificação dos corpos de prova. A calcinação do lodo se mostrou mais relevante para esta propriedade que a moagem, uma vez que a pré-eliminação de orgânicos e voláteis reduziu a formação de vazios na estrutura do corpo de prova.

Os resultados de massa específica resultam no modelo apresentado na Tabela 20. O poder de explicação do modelo é de 86,8%, definido pelo R^2 . Os testes obtidos podem ser consultados na Apêndice C. O R^2 , com base nos resultados obtidos, demonstra a boa correlação dos resultados com o modelo de regressão. Quanto mais perto de 1 estiver o valor de R^2 , melhor o ajuste do modelo às respostas observadas (BARROS NETO, SCARMINIO; BRUNS, 2001). Este valor, indica que, cerca de 87% da variação total em torno da média é explicada pela regressão, sendo o restante, resíduos do modelo. Logo, há uma boa relação entre os resultados obtidos em todas as séries estudadas e a variação da massa específica é relevante para a compressão dos resultados.

O valor-P que consta na Tabela 20, mostra a relação significativa do tipo de argila e do teor de lodo para os resultados de massa específica. Quando mais perto de 0, mais influência da variável na resposta. Sendo assim, observa-se que mesmo que haja alguma interferência da granulometria e calcinação, são observações pontuais, que podem não estar diretamente relacionadas com os resultados. Essa análise explica o motivo da redução do tamanho de grão e calcinação do lodo, não possuírem comportamento linear em função do teor de lodo da diferença entre os tipos de argila nos resultados obtidos.

Tabela 20 – Resultados do modelo de regressão linear para a massa específica

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1930,242	19,5867	98,54859	2,21E-44	1890,479	1970,005	1890,479	1970,005
Tipo de argila c1=0; c2=1	-164,95	15,90436	-10,3714	3,24E-12	-197,238	-132,662	-197,238	-132,662
Granulometria a 75 =0; 180=1; in natura=2	1,85	11,24608	0,164502	0,870283	-20,9808	24,68076	-20,9808	24,68076
calcinação não=0 sim=1	-6,61667	17,17867	-0,38517	0,702444	-41,4912	28,25789	-41,4912	28,25789
teor de lodo, 0,5,10 e 20	-11,8943	1,075331	-11,061	5,68E-13	-14,0773	-9,71125	-14,0773	-9,71125

Fonte: A autora (2023).

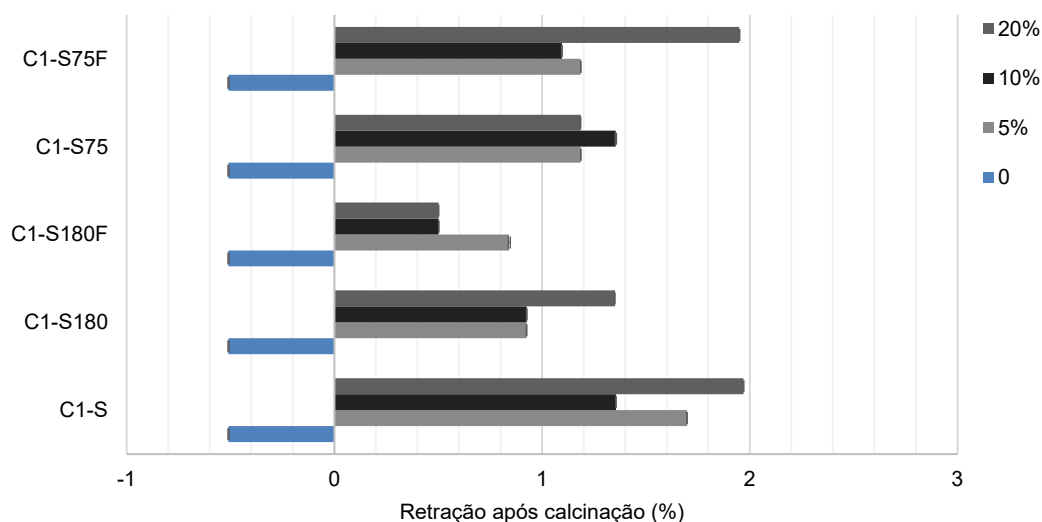
6.2.3 Retração linear após calcinação

As Figuras 50 e 51 mostram os resultados médios das retrações lineares observadas nos corpos de prova produzidos com C1 e C2. Observa-se que C1 sofre uma ligeira expansão (0,51%) após a calcinação.

Os resultados mostram que o tamanho do grão de lodo tem influência sobre a retração dos corpos de prova produzidos com C1. Enquanto C1-S180 tem valores médios de retração entre 0,93 e 1,35%, C1-S75 tem valores entre 1,35 e 1,19%. Essa condição é ainda mais evidente

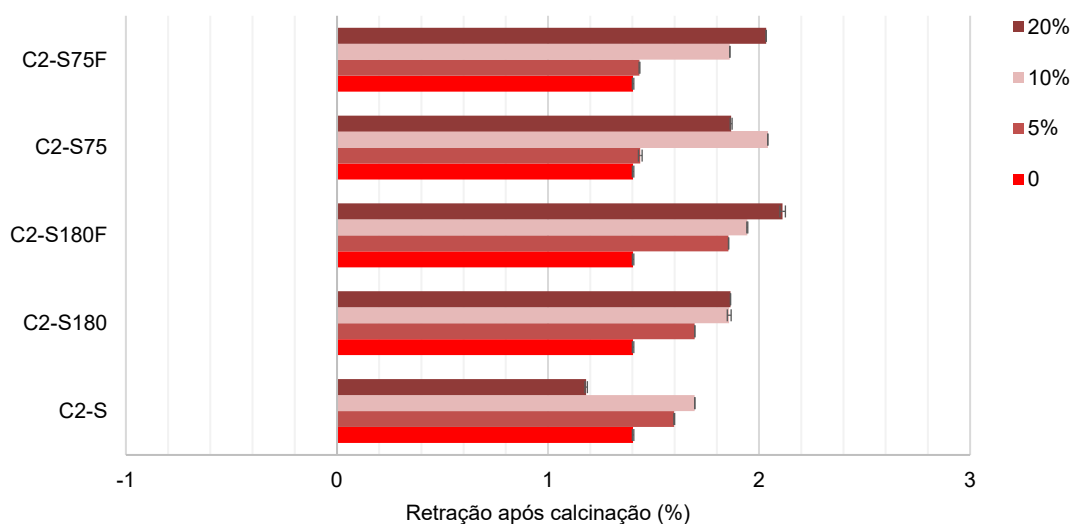
quando comparadas as séries cujo lodo foi calcinado. C1-180F, com 10% de lodo, tem aproximadamente a metade da retração observada em C1-S75F. A redução do tamanho do grão aumenta a aproximação entre as partículas favorecendo as reações durante a calcinação e consequentemente aumentando a retração.

Figura 50 – Retração linear após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1



Fonte: A autora (2023).

Figura 51 – Retração linear após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2



Fonte: A autora (2023).

Os resultados demonstram também que a calcinação do lodo reduz a retração dos corpos de prova das séries estudadas, sendo mais evidente quanto maior o teor de lodo. A retração em C1-

S180 (0,93%) é cerca de 45% superior à observada em C-S180F (0,5%), com 10% de lodo. Quando usado 20% de lodo, essa diferença chega 63%. Já em C1-S75 (1,35%) é cerca de 20% superior à observada em C1-S75F (1,10%), com 10% de lodo. Os menores valores de retração observados nos corpos de prova com lodo calcinado, reforçam que a matéria orgânica facilita o aumento da temperatura no sistema, favorecendo a formação de novas fases.

Os maiores valores de retração após a calcinação foram observados em C1-S. A alta retração pode estar associado com a umidade inicial do resíduo, que é responsável pelo aumento de temperatura na fase inicial da secagem, implicando em altos gradientes térmicos no interior das peças cerâmicas (SILVA NASCIMENTO *et al.*, 2019).

A retração linear observada nos corpos de prova produzidos com C2 é superior à encontrada em C1. C2 tem retração igual 1,40%, o que pode estar associado à sua maior perda ao fogo (11,73%).

Em geral, a adição do lodo provoca aumento da retração nas séries produzidas com C2. Comparando-se C2-S180 e C2-S75, observa-se que houve pouca variação dos resultados em função do tamanho de grão do lodo usado. Quando o teor de lodo é igual a 5%, o uso de grãos menores não favorece a retração. Contudo, se comparadas amostras com o lodo calcinado a retração em C2-S180F (1,86%) é cerca de 20% superior que a observada em C2-S75F (1,43%).

A calcinação do lodo é responsável pelo aumento da retração das séries produzidas com C2. Comparando-se C2-S180F e C2-S180, o aumento da retração é cerca de 9, 5 e 13%, para os teores de lodo iguais a 5, 10 e 20%, respectivamente.

A série C2-S, teve comportamento divergente das demais, uma vez que houve progressiva redução da retração com a incorporação de lodo. Este comportamento deve-se a alteração da composição granulométrica após a incorporação do lodo bruto. Apesar do aumento do percentual de materiais eliminados durante a calcinação, houve um aumento da temperatura do sistema, o que pode ter provocado além da densificação do corpo de prova, a expansão e posterior retração, reduzindo a retração final. Este tipo de comportamento ocorre em função de minerais como a caulinita (GRIM, 1962).

De modo geral, os resultados dos ensaios de retração após a calcinação demonstram que a interferência do lodo, bem como de suas formas de beneficiamento, está relacionada com os solos que foram parcialmente substituídos.

Para esta propriedade a questão principal envolve a composição química e granulométrica do solo. A distribuição granulométrica proporcionada pela presença do lodo foi mais efetiva em C1, no qual a redução do tamanho de grão foi fundamental para redução da retração. Já a composição química e mineralógica foi fundamental para explicar os resultados dos experimentos realizados com C2. O aumento da perda ao fogo provocou o aumento da retração, mas a caulinita presente tanto em C2 quanto no lodo, modificaram a estrutura da cerâmica durante a calcinação, reduzindo os efeitos da composição granulométrica.

Os resultados de retração resultam no modelo apresentado na Tabela 21. O poder de explicação do modelo é de 57,68%, definido pelo R^2 . Os testes obtidos podem ser consultados na Apêndice C. O R^2 , com base nos resultados obtidos, demonstra a boa correlação dos resultados com o modelo de regressão. Este valor, indica que 57,68% da variação total em torno da média é explicada pela regressão, sendo 53,05%, resíduos do modelo, sendo relevante para a compressão dos resultados.

O valor-P que consta na Tabela 21, mostra uma melhor correlação do tipo de argila e do teor de lodo para os resultados de retração após calcinação, sendo as outras variáveis pouco significativas.

Tabela 21 – Resultados do modelo de regressão linear para a retração linear após calcinação

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,388324	0,206583	1,879751	0,068487	-0,03106	0,807709	-0,03106	0,807709
Tipo de argila c1=0; c2=1	0,90047	0,167745	5,368097	5,26E-06	0,55993	1,24101	0,55993	1,24101
Granulometria 75 =0; 180=1; in natura=2	-0,02389	0,118613	-0,20139	0,84156	-0,26469	0,216911	-0,26469	0,216911
calcinação não=0 sim=1	-0,06251	0,181185	-0,34502	0,732144	-0,43034	0,305313	-0,43034	0,305313
teor de lodo, 0,5,10 e 20	0,049122	0,011342	4,331115	0,000119	0,026097	0,072147	0,026097	0,072147

Fonte: A autora (2023).

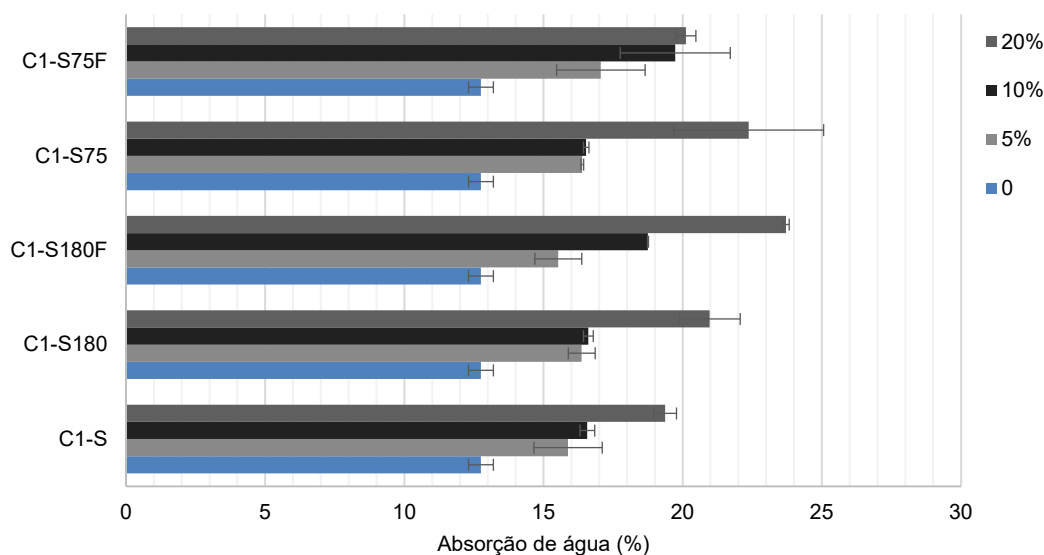
6.2.4 Absorção de água

As Figuras 52 e 53 apresentam os resultados médios de absorção de água dos corpos de prova produzidos com C1 e C2. Há aumento da absorção de água em função do teor de lodo utilizado, em relação às séries de referência, em todas as séries estudadas.

Em relação à redução do tamanho de grão do lodo, há pouca variação entre os resultados de C1-180 e C1-S75 para qualquer teor de lodo. Relacionando os resultados usando 10% lodo

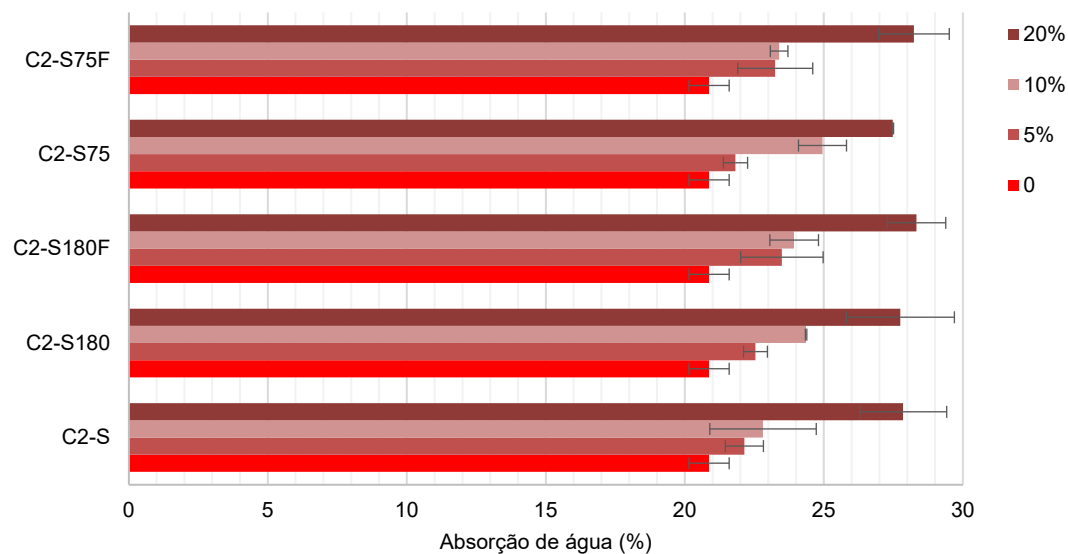
calcinado há aumento de absorção em cerca de 20% quando comparados C1-S75 e C1-S75F, o que reafirma que a matéria orgânica do lodo, apesar de deletéria, auxilia a densificação do corpo de prova. Entre C1-S180 e C1-S180F, com 10% de lodo, esse aumento é de cerca de 13%. C1-S teve valores de absorção próximos aos observados nas demais séries.

Figura 52 – Absorção de água à após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1



Fonte: A autora (2023).

Figura 53 – Absorção de água à após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2



Fonte: A autora (2023).

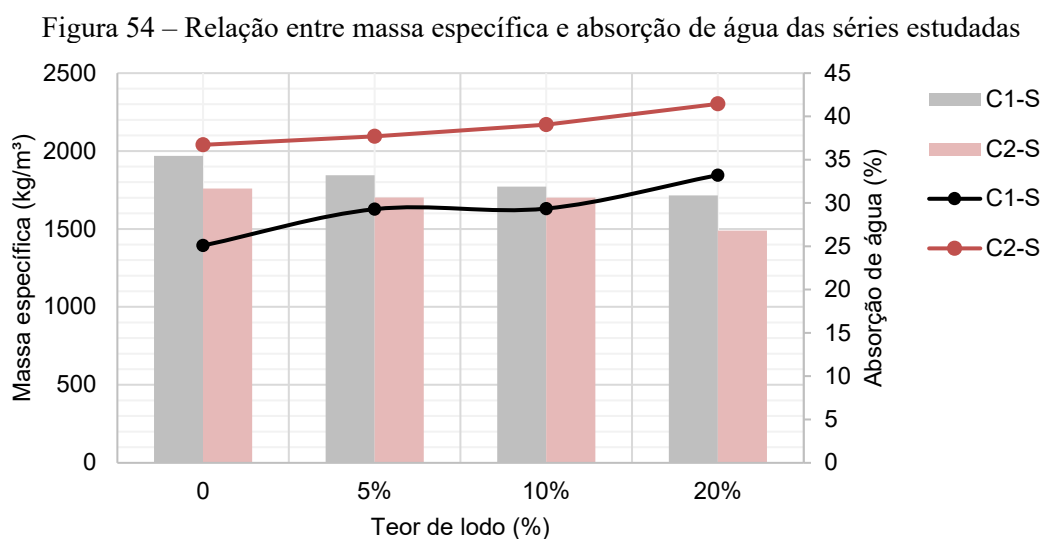
A absorção de água nas séries produzidas com C2 é maior que nas produzidas com C1 (Figura 56). O comportamento em relação ao beneficiamento do lodo é semelhante, sendo também parecido o comportamento das séries que são produzidas com o lodo bruto.

As séries produzidas com C2 têm comportamento semelhante à C1. Contudo, a absorção de água média de C2 é igual a 20,87%, enquanto C1 é 12,75%. A alta perda de massa durante a calcinação e a menor massa específica explicam esse comportamento, uma vez que há formação de poros e fissuras com a eliminação de orgânicos e transformações de fases.

Houve pouca relação da redução do tamanho de grão com a absorção de água nas séries produzidas com C2. Nos corpos de prova com 20% de lodo, por exemplo, a diferença entre os resultados de C2-S75 e C2-S180 é menor que 1% e entre C2-S75F e C2-S180F é igual a 0,32%, demonstrando pouca influência da moagem do lodo nesta propriedade.

A calcinação do lodo também não interferiu nos resultados de absorção das séries produzidas com C2. Uso de lodo calcinado resultou em uma absorção ligeiramente superior quando comparados C2-S75 (21,82%) e C2-S75F (23,25%), e C2-S180 (22,54%) e C2-S180F (23,49%), nas séries com 5% de lodo. C2-S apresentou resultados semelhantes às demais séries.

Os resultados demonstram que a incorporação do lodo provoca aumento da absorção de água de acordo com o teor de lodo usado. A Figura 54 mostra como a redução da massa específica está diretamente relacionada com a absorção do corpo de prova. O gráfico apresenta dados de C1-S e C2-S ilustrando como redução da massa resulta no aumento da absorção. A eliminação da matéria orgânica além da baixa interação entre o lodo e solo durante a calcinação contribui para a formação da porosidade aberta, e dessa forma aumenta a absorção de água.



Fonte: A autora (2023).

Os resultados de massa específica resultam no modelo apresentado na Tabela 22. O poder de explicação do modelo é de 96,13%, definido pelo R^2 . Os testes obtidos podem ser consultados na Apêndice C. Logo, há uma boa relação entre os resultados obtidos em todas as séries estudadas e a variação da absorção de água, sendo relevante para a compressão dos resultados.

O valor-P que consta na Tabela 22, mostra a relação significativa do tipo de argila e do teor de lodo para os resultados de massa específica. O tamanho de grão e a calcinação ou não do lodo para a produção da cerâmica demonstraram pouca influência nos resultados. Em geral, o aumento do teor de lodo, aumenta a absorção de água da cerâmica, e o efeito é melhor percebido em C2, quando o aumento é maior. Observa-se em C2 a semelhança entre os resultados, independentemente do método de beneficiamento empregado, o que pode ser confirmado pelo modelo.

Tabela 22 – Resultados do modelo de regressão linear para a absorção de água

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	13,60768	0,37059	36,71893	1,54E-29	12,85534	14,36002	12,85534	14,36002
Tipo de argila c1=0; c2=1	6,8485	0,300919	22,75864	1,46E-22	6,237603	7,459397	6,237603	7,459397
Granulometria 75 =0; 180=1; in natura=2	-0,19725	0,212782	-0,92701	0,360272	-0,62922	0,23472	-0,62922	0,23472
calcinação não=0	0,548667	0,325029	1,688053	0,100294	-0,11118	1,208511	-0,11118	1,208511
sim=1	0,378989	0,020346	18,62735	9,59E-20	0,337684	0,420293	0,337684	0,420293
teor de lodo, 0,5,10 e 20								

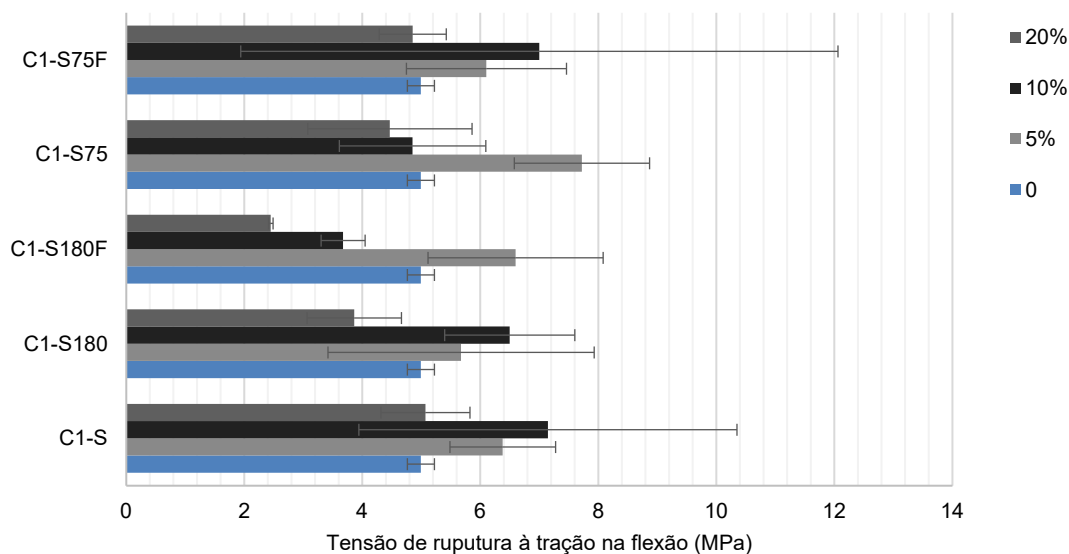
Fonte: A autora (2023).

6.2.5 Tensão de ruptura à flexão após calcinação

As Figuras 55 e 58 mostram as médias dos resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova produzidos com C1 e C2. Observou-se que há aumento de resistência dos corpos de prova produzidos com C1, com adição de lodo em até 5%, em todos os métodos de beneficiamento.

Os resultados de C1-S180 (5,68 MPa) e C1-S75 (7,72 MPa) mostram que houve aumento de resistência com redução do diâmetro do grão em cerca de 30% para os corpos de prova com 5% de lodo. Os efeitos positivos provocados pelo uso do S75 tendem a reduzir quando usados maiores percentuais de lodo.

Figura 55 – Tensão de ruptura à flexão após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C1

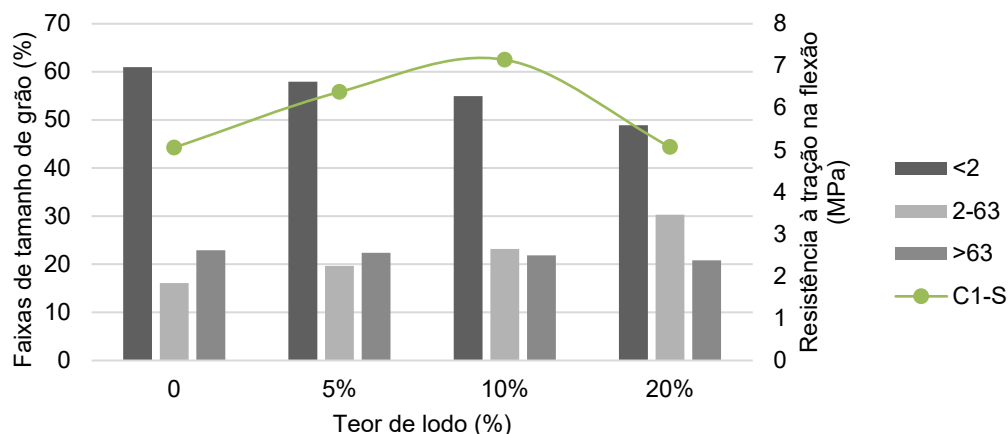


Fonte: A autora (2023).

A calcinação do lodo mostra diferentes comportamentos de acordo com o teor de lodo utilizado. Há redução de resistência quando comparados C1-S180 (6,50 MPa) e C1-S180F (3,67 MPa) de cerca de 43%, com teor de lodo igual a 10%. Quando usado 20% de lodo, essa redução é de cerca de 36%. Por outro lado, a variação de resistência entre C1-S75 (4,85 MPa) e C1-S75F (7,00 MPa) com 10% de lodo é de cerca de 45%, sendo a eliminação de orgânicos positiva nesta granulometria. A avaliação dos resultados indica que, quando o grão usado tem diâmetros maiores (S180), a matéria orgânica é fundamental para o aumento de resistência em C1, aumentando a temperatura do sistema e atuando na aproximação dos grãos de solo e lodo. Com a incorporação de S75, a interação entre os grãos é prejudicada pela formação de poros e microfissuras após a calcinação dos corpos de prova.

A série C1-S mostrou resultados semelhantes às demais apesar de não passar por nenhum método de beneficiamento. O uso de 10% de lodo resultou em uma resistência igual a 7,15 MPa, semelhante à observada em C1-S75F. A Figura 56 mostra a relação entre as faixas de tamanho de grão e das composições de C1-S e as resistências observadas nos corpos de prova.

Figura 56 – Relação entre faixas de tamanho de grão e resistência à flexão dos corpos de prova produzidos com C1



Fonte: A autora (2023).

Com o objetivo de observar os efeitos do beneficiamento do lodo na cerâmica, a Figura 57 apresenta gráficos que comparam as resistências dos corpos de prova em cada método de beneficiamento.

A redução do tamanho de grão no lodo não calcinado (S75) (Figura 57a), resulta em aumento de resistência, quando comparado ao lodo com grãos maiores (S180), se usados 5% de lodo. Embora a tendência de ambas as séries seja de redução de resistência, esta ocorre inicialmente em C1-S75 e posteriormente em C1-S180.

O uso do S75 nas massas cerâmicas aumenta o teor de grãos na faixa do silte uma vez que adiciona à massa argilosa, grãos com diâmetro máximo igual a 0,075 mm. O aumento do teor de silte em C1, provoca a demanda por mais umidade para o desenvolvimento da plasticidade na composição. Com 10% de lodo, C1-S75 possui LP igual a 28% enquanto C1-S180, 26%. O aumento da umidade resulta em maior retração, reduzindo a resistência mecânica da cerâmica. Por outro lado, o efeito da granulometria é diferente nas séries com 20% de lodo. Há redução de resistência de C1-180 em relação à C1-S75, que por sua vez, também está relacionada ao aumento de retração anteriormente observado. A retração provocada por S180 tem relação com o aumento de grãos na faixa da areia, uma vez que há baixa interação com os grãos de argila. Sugere-se que houve uma saturação da massa argilosa com grãos na faixa da areia, resultando em um aumento das tensões internas provocadas pelo aumento de temperatura na calcinação. As linhas de tendência linear construídas com as informações das séries em estudo, demonstram que há tendência de redução de resistência para ambas as granulometrias, conforme incorporação de lodo nas composições.

Pode-se observar que, em relação às duas granulometrias estudadas, a série C1-S, com lodo bruto, demonstrou comportamento semelhante à C1-S180, possuindo, contudo, maiores resistências e menor tendência de redução com o aumento de percentual do lodo.

Caso este mesmo material seja calcinado, seus efeitos na cerâmica ocorrem de uma forma diferente (Figura 57b). A redução do tamanho de grão de lodo calcinado (S75F) provoca aumento de resistência até o percentual de 10%, enquanto observa-se aumento de resistência de C1-180F apenas até 5%. Não foi observada correlação com as demais propriedades. Nota-se, apenas que a granulometria exerce maior influência quando não há matéria orgânica no lodo. De mesmo modo ao observado na Figura 60a, o uso de grãos maiores provoca baixa interação entre os grãos de argila e lodo, reduzindo a resistência da cerâmica produzida. As linhas de tendência apresentadas no gráfico, demonstram que há maior tendência à redução de resistência conforme o teor de lodo, nas composições C1-S180F. Neste gráfico, C1-S assemelha-se a C1-S75, demonstrando a pouca eficiência da calcinação do lodo para melhoria da resistência da cerâmica.

A Figura 57c compara as resistências à flexão entre as séries C1-S180 e C1-S180F, observando os efeitos da calcinação do lodo nestas séries. Há aumento de resistência com a calcinação do lodo até 5% de lodo. Com 10% de lodo, a resistência C1-S180 tende a aumentar, enquanto C1-S180F apresenta redução. Observando a influência da calcinação do lodo, percebe-se que seu efeito é positivo com pequenos teores de lodo. A presença de orgânicos eleva a temperatura de calcinação do sistema, favorecendo o aumento de resistência. Este efeito está combinado com o aumento da retração e redução da absorção de água em C1-S180, o que confirma que a presença de matéria orgânica no lodo favoreceu a densificação do corpo de prova durante a calcinação. Contudo, com 20% de lodo, há tendência de redução para ambas as séries. As linhas de tendência apresentadas no gráfico, confirmam o favorecimento da redução de resistência conforme o teor de lodo, nas composições C1-S180F. A série C1-S, apresenta melhores resultados que ambas as séries presentes na figura.

Quando o tamanho do grão de lodo é inferior a 0,075 mm, observa-se um efeito proveniente da calcinação, diferente do que foi obtido com os grãos com diâmetro máximo igual a 0,180 mm (Figura 57d). Com 5% de lodo, há maior incremento de resistência na série que cujo lodo não foi calcinado (C1-S75), seguido por redução de resistência. Em C1-S75F, há aumento de resistência com até 10% de lodo. Neste caso, a calcinação do lodo foi benéfica até 10% de lodo na composição. Após isso, há pouca diferença entre as séries, uma vez que o lodo, em qualquer condição provoca a redução da resistência. Pode-se associar essa diferença à variação da

retração após a calcinação. Com 10% de lodo em C1-S75F, a retração observada é menor que em C1-S75. As linhas de tendência apresentadas no gráfico, demonstram que há pouca diferença entre as amostras com lodo calcinado e com o lodo não calcinado. Quando comparadas à C1-S, observa-se que há semelhança com a série C1-S75F.

Figura 57 – Comparação dos efeitos do beneficiamento do lodo na resistência à tração na flexão nas cerâmicas produzidas com C1

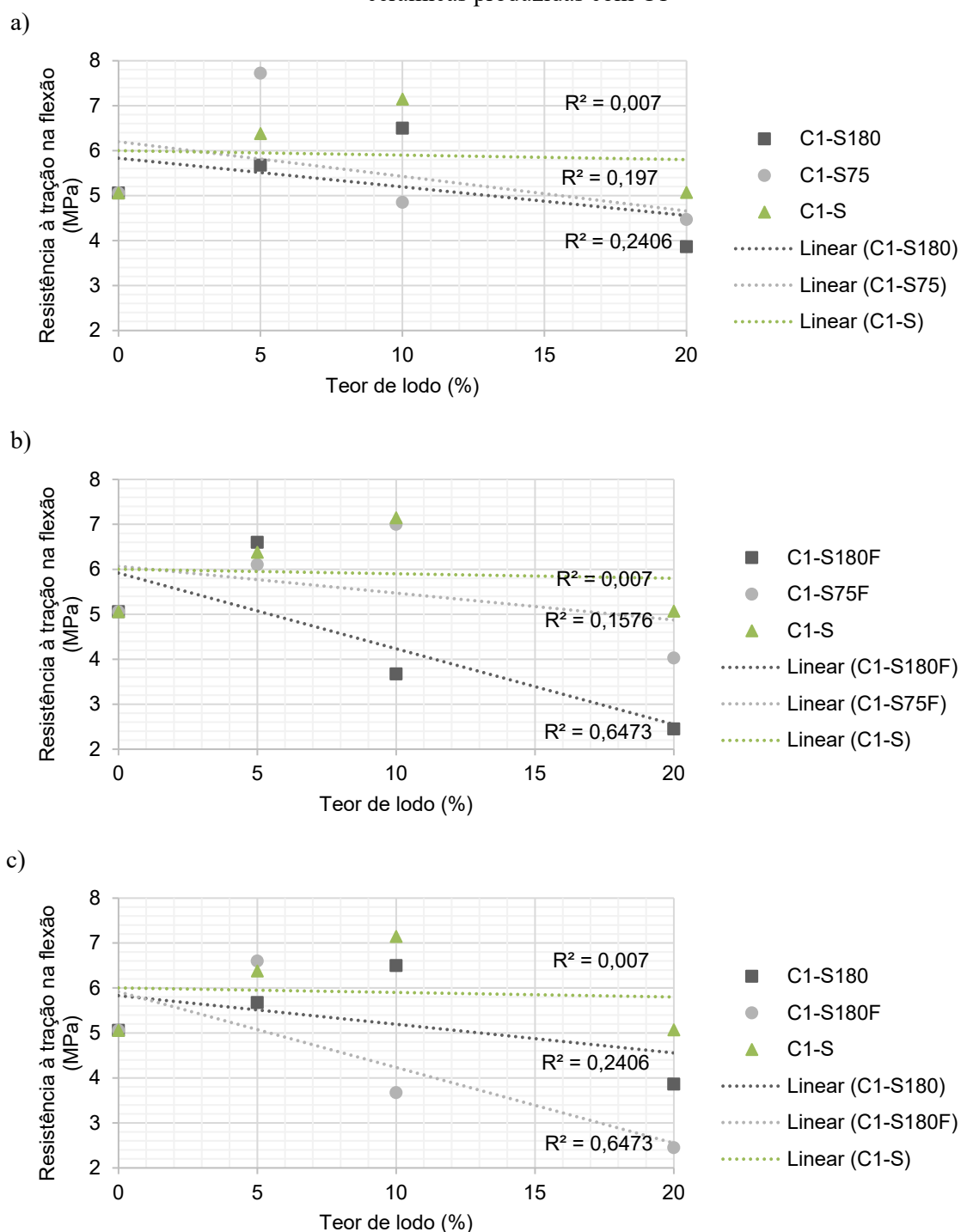
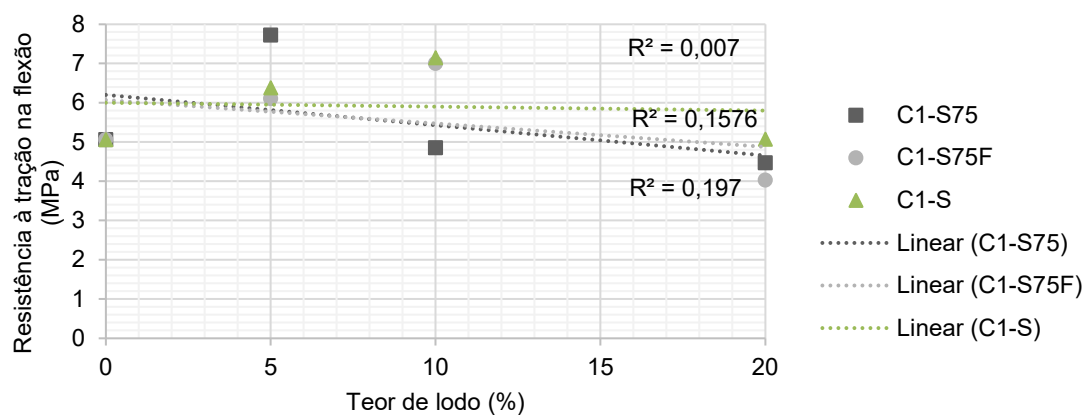


Figura 57 – Comparação dos efeitos do beneficiamento do lodo na resistência à tração na flexão nas cerâmicas produzidas com C1 (Cont.)

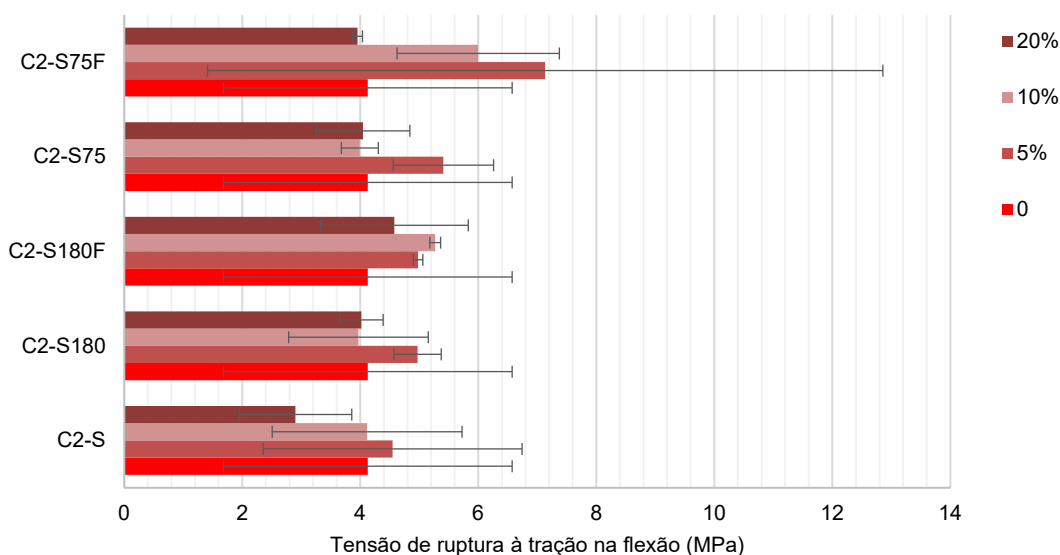
d)



Fonte: A autora (2023).

Os resultados de resistência dos corpos de prova produzidos com C2, mostram que C2 tem resistência à tração inferior à C1 (Figura 58). Os resultados estão relacionados à maior absorção de C2, menor massa específica e ao fato de C1 ter mais agentes fundentes e maior teor de argila, o que resulta em uma maior formação de fases e menor ocorrência de defeitos.

Figura 58 – Tensão de ruptura à flexão após calcinação dos corpos de prova das séries produzidas com C2



Fonte: A autora (2023).

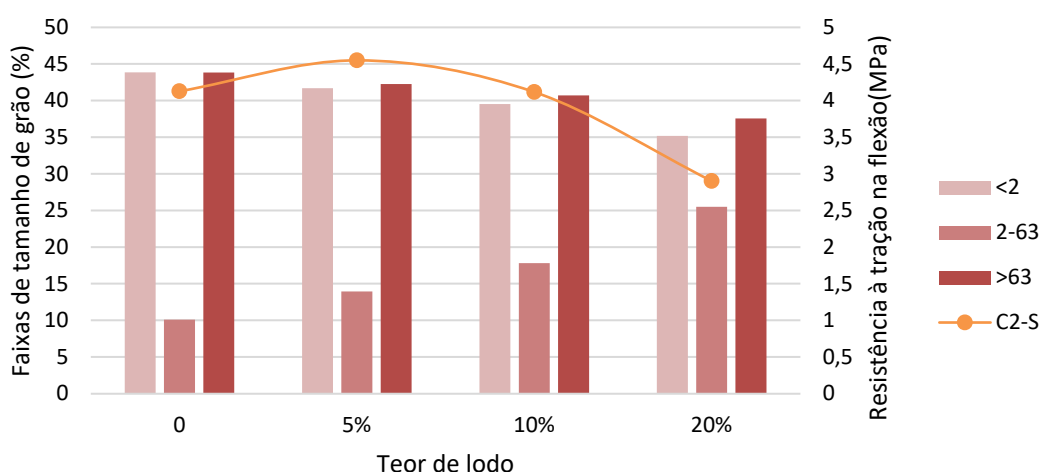
Com relação à redução do tamanho de grão, C2-S180 têm resultados médios inferiores a C2-S75, demonstrando que o uso de grãos menores tem efeito positivo nas séries produzidas com

C2. Contudo, essa variação é pequena e não tem alterações significativas com o aumento do teor de lodo.

Não foi observado um comportamento linear quando usado o lodo calcinado. Comparando-se C2-S180 e C2-S180F, observa-se uma influência positiva da calcinação do lodo, tendo resistência cerca de 20% superior em relação aos corpos de prova com lodo apenas moído.

A série C2-S apresentou os piores resultados de resistência com o solo C2. Com 5% de lodo, a resistência média é igual a 46,38 MPa, superior ao observado em C2. Contudo, há redução de resistência conforme o aumento do teor de lodo. A Figura 59 mostra que a incorporação de C2-S ao solo provoca aumento do teor de silte e redução dos teores de argila e areia. Há um ligeiro aumento de resistência com 5% de lodo, seguido por redução com 10 e 20% de lodo incorporado. Os resultados acompanham a redução da perda de massa e o aumento da absorção de água.

Figura 59 – Relação entre faixas de tamanho de grão e resistência à flexão dos corpos de prova produzidos com C2



Fonte: A autora (2023).

Os gráficos apresentados na Figura 60 mostram os efeitos provocados pelo lodo nos corpos de prova produzidos com C2, e suas variações em função do tratamento dado ao lodo. Observa-se, inicialmente, que o lodo resulta em menores efeitos em C2 que em C1, há menos variação dos resultados obtidos e de suas linhas de tendência.

A Figura 60a mostra os efeitos da moagem do lodo nas composições feitas com C2. A redução de tamanho do grão apresenta melhores resultados até o uso de 5% de lodo, seguido por posterior redução. A redução da resistência com o uso de 10% de lodo em C2-S75, tem relação com o aumento da retração durante a calcinação. Os efeitos provocados pela perda de massa

podem ter provocado falhas na estrutura cerâmica, influenciando na sua resistência. O uso de grãos maiores (C2-S180) resulta em aumento de resistência com 10% de lodo. Ambas as granulometrias são responsáveis por redução de resistência segundo a tendência linear observada no gráfico. O uso de C2-S também provoca redução de resistência, mais acentuada que o observado nas demais composições.

A Figura 60b mostra que há similaridade entre as composições produzidas com o lodo calcinado e o não calcinado, possuindo efeitos semelhantes aos já observados na Figura 56a. Observa-se uma redução da resistência em C2-S75F com 10% de lodo, também associado ao aumento da retração de quase 30% entre 5 e 10%, enquanto ao observado em C2-180F é de cerca de 5%, neste mesmo intervalo.

A Figura 60c, mostra como a calcinação do lodo influencia na resistência dos corpos de prova produzidos com C2. Observa-se que há pouca diferença entre C2-S180 e C2-S180F, mostrando que a calcinação do lodo não resulta em efeitos significativos na cerâmica.

De semelhante modo, quando comparados C2-S75 e C2-S75F (Figura 60d), também não é possível observar alterações significativas na resistência da cerâmica em função da calcinação do lodo. Em todo caso, observa-se que há aumento de resistência com quando até 10% de lodo adicionado C2 é beneficiado, seja por meio de moagem ou calcinação. O uso do lodo bruto em C2 (C2-S) não resultou em efeitos positivos.

Figura 60 – Comparação dos efeitos do beneficiamento do lodo na resistência à tração na flexão nas cerâmicas produzidas com C2

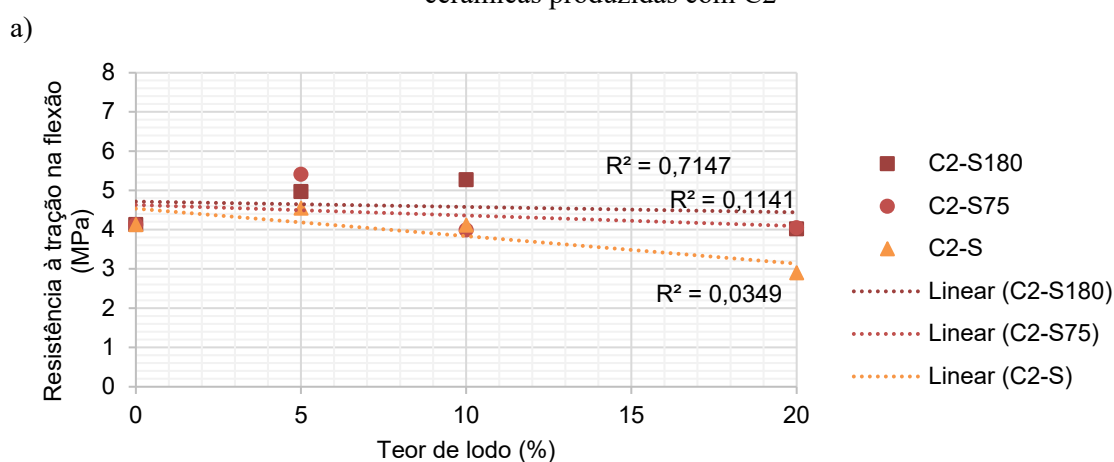
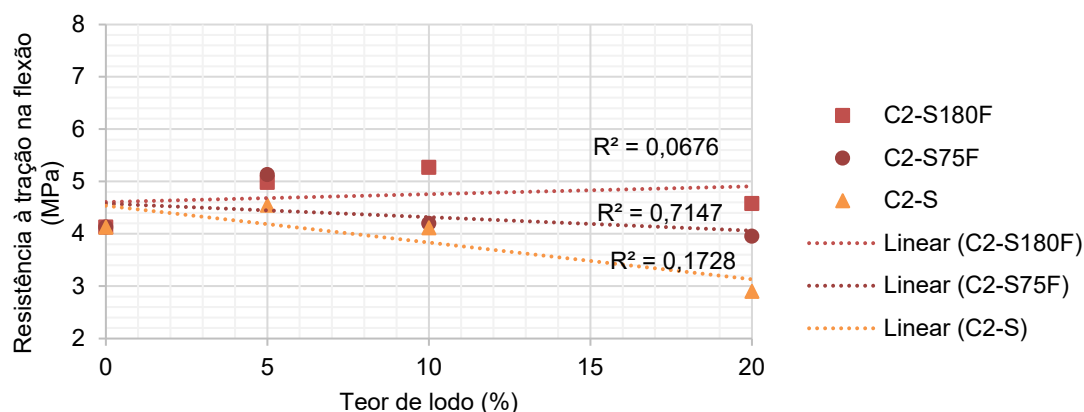
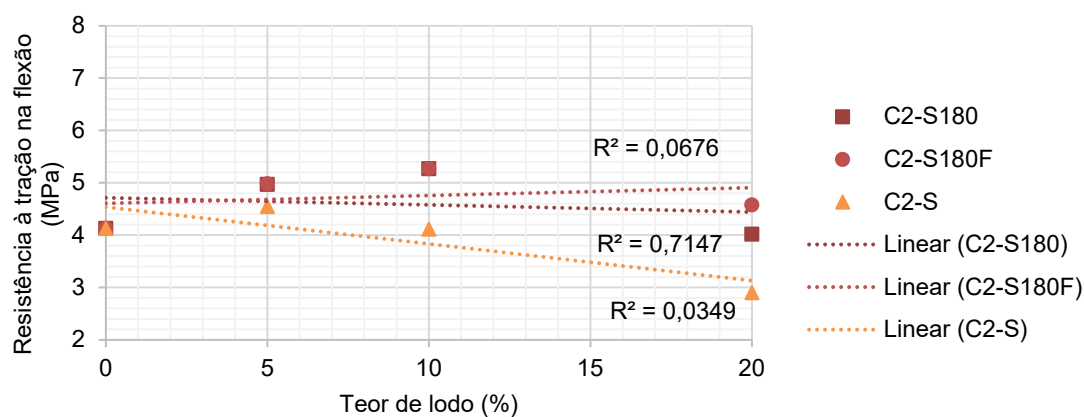


Figura 60 – Comparação dos efeitos do beneficiamento do lodo na resistência à tração na flexão nas cerâmicas produzidas com C2 (Cont.)

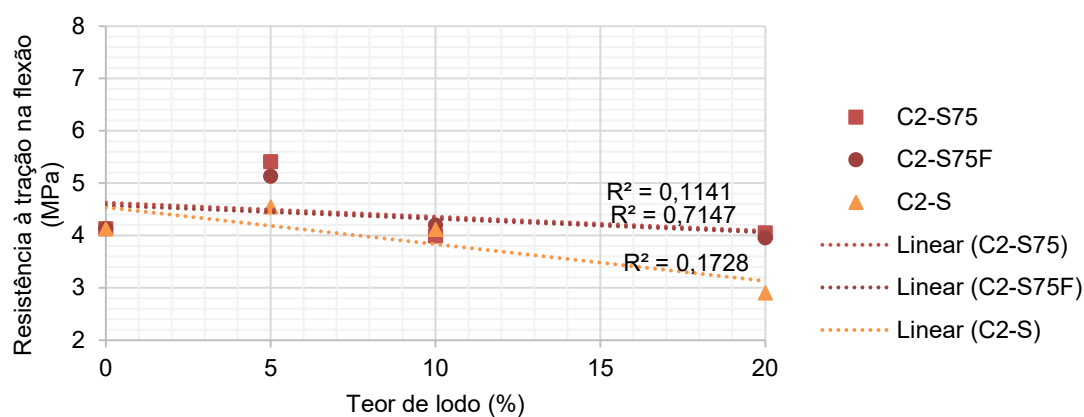
b)



c)



d)



Fonte: A autora (2023).

Os resultados de resistência à tração na flexão resultam no modelo apresentado na Tabela 23. O poder de explicação do modelo é de 0,30%, definido pelo R^2 . Os testes obtidos podem ser consultados na Apêndice C. O R^2 obtido nos ensaios de resistência é o menor observado até

agora, contudo, sendo superior a 0, é válido para explicação do modelo com base nos resultados obtidos.

O valor-P que consta na Tabela 23, mostra que, do mesmo modo que foi observado nas demais propriedades, há relação dos resultados principalmente com o tipo de argila e o teor de lodo empregado na produção da cerâmica. Os resultados de resistências apresentados anteriormente demonstram que o beneficiamento do lodo provoca diferentes efeitos na cerâmica, a depender do teor e da cerâmica empregada, confirmando a análise de regressão.

Tabela 23 – Resultados do modelo de regressão linear para a resistência à tração na flexão

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	5,933133	0,384694	15,42301	3,52E-17	5,152164	6,714103	5,152164	6,714103
Tipo de argila c1=0; c2=1	-0,93973	0,31237	-3,00837	0,004842	-1,57387	-0,30558	-1,57387	-0,30558
Granulometria 75 =0; 180=1;								
in natura=2	-0,08788	0,220879	-0,39789	0,693131	-0,53629	0,360524	-0,53629	0,360524
Calcinação não=0 sim=1	-0,21058	0,337399	-0,62413	0,536591	-0,89554	0,474376	-0,89554	0,474376
Teor de lodo, 0,5,10 e 20	-0,05007	0,02112	-2,37073	0,023391	-0,09295	-0,00719	-0,09295	-0,00719

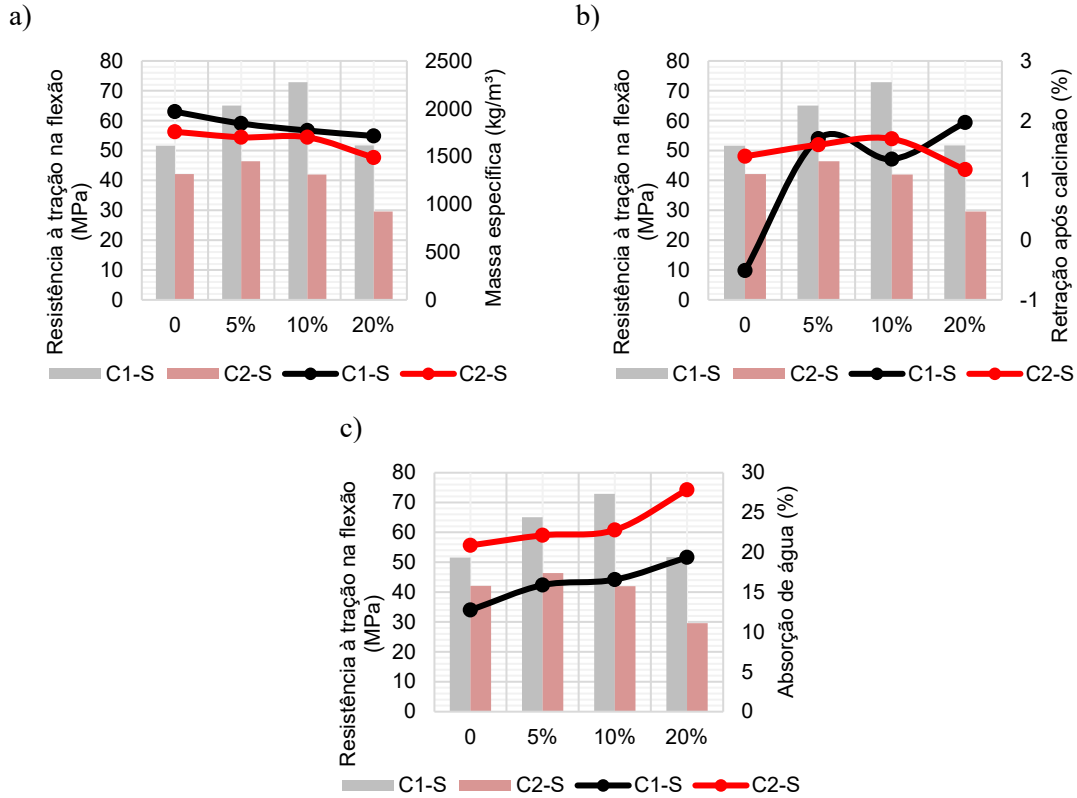
Fonte: A autora (2023).

Apesar de conclusões divergentes, C1 e C2 têm propriedades que podem evidenciar os seus resultados. Apesar da redução do peso específico e aumento da absorção que o lodo provoca em C2, o aumento do teor de Fe_2O_3 , favoreceram a formação de hematita, produto que influencia na formação de fase vítrea, resultando em conglomerados fortes (YATSENKO *et al.*, 2016). Este produto pode explicar o motivo pelo qual o aumento da porosidade provocado pelo lodo não afetou significativamente a resistência dos corpos de prova. Em C1 houve aumento de resistência provocado pelo lodo provavelmente em função do aumento do teor de fundentes. A presença de orgânicos não deve ter sido responsável pelo aumento da temperatura do sistema uma vez que os resultados com lodo calcinado ou não, tiveram tendências semelhantes.

A Figura 61 apresenta a correlação entre as propriedades dos corpos de prova e os percentuais de lodo misturados à C1 e C2. Com relação à massa específica, observa-se que aumento da resistência das séries produzidas com C1, apesar da redução da massa específica do corpo de prova, até 10% de lodo. Em C2, esse aumento foi observado apenas até 5% de lodo. O aumento da retração nas séries produzidas com C1 resultou em aumento de resistência, enquanto, em C2, redução da resistência. A redução da resistência dos corpos produzidos com lodo também está relacionada ao aumento da absorção de água. A série C1 possui menor absorção que C1,

resultando em maior resistência. O uso de 20% de lodo em C1 provoca aumento de absorção de quase 10% em relação à amostra de referência, sem alteração significativa da resistência. O uso de 20% de C2 provoca cerca de 10% no aumento da absorção e redução de 10% da resistência.

Figura 61 – Relação entre a resistência e as demais propriedades físicas dos corpos de prova



Fonte: A autora (2023).

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi estudada a produção de cerâmica com substituição parcial da matéria prima convencional por lodo de Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). Aspectos relacionados às características do lodo, às misturas com os solos e às propriedades das cerâmicas produzidas após a calcinação, formaram as principais conclusões após a análise dos resultados.

O lodo tem propriedades coloidais, que impedem que este seja empregado na produção de cerâmica após a secagem. Observou-se que, o lodo de ETA, quando seco em estufa ou ao ar, tende a formar grumos, que não se dissolvem em água nem são facilmente quebráveis. Logo, é necessário o emprego de moagem para redução de seu tamanho de modo a ser misturado à matéria prima convencional.

Após a moagem, o lodo adquire um aspecto semelhante ao da areia, com caráter não plástico. Sua incorporação à massa cerâmica provoca um aumento na demanda da água de plasticidade. O estudo mostrou que, há aumento da demanda de água em função da moagem do lodo, quanto menor o diâmetro do grão, mais água é necessária, e em função da calcinação do lodo, em que, as séries com lodo calcinado demandaram mais água para desenvolver a plasticidade. Estes aspectos se deram em função, principalmente, da baixa interação do lodo com o solo, associado ao seu aspecto granular.

Com relação aos corpos de prova produzidos com misturas binárias, observou-se que, após a secagem do lodo, a moagem de modo a obter granulações mais finas, com partículas inferiores a 0,075 mm, favoreceu a interação física por meio do empacotamento dos grãos. Houve melhoria das propriedades do solo mais argiloso (C1), contribuindo sobretudo para o aumento da resistência mecânica. A baixa redução da densidade evidenciou a densificação do corpo cerâmico.

Apesar da bibliografia indicar a matéria orgânica presente no lodo de ETA como causa principal da perda de propriedades mecânicas, observou-se que a sua eliminação não contribuiu positivamente para melhoria da qualidade dos corpos cerâmicos. A ausência de matéria orgânica, resultou em corpos cerâmicos com alta absorção de água e baixa densidade, provocados pela redução da temperatura do sistema durante a calcinação, quando comparada às amostras com lodo de ETA não calcinado.

As propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova produzidos com lodo bruto (S) foram semelhantes aos dos corpos de prova com lodo de ETA beneficiado. A maior retração e menor absorção de água, indicam a maior densificação da cerâmica produzida com esta amostra.

Corpos de prova cerâmicos com mais de 10% de lodo de ETA tendem a comportamentos semelhantes independentemente do método de beneficiamento. Esta observação indica que a composição química e mineralógica do lodo de ETA atua como principal influenciador das propriedades cerâmicas, quando o teor de lodo aumenta na mistura. A redução de minerais argílicos dificulta a interação química entre os grãos, prejudicando a formação de fases vítreas durante a calcinação. Comparando-se os dois solos em estudo, observa-se que a interferência do percentual de lodo de ETA no teor de agentes de fundentes de C1, provocou uma variação maior em suas propriedades, em comparação com as variações provocadas pelo teor de lodo de ETA em C2.

As análises realizadas a partir dos resultados, demonstraram a pouca relevância do beneficiamento do lodo para as propriedades das cerâmicas. O tipo de argila usado e o teor de lodo empregado, se mostraram importante para a definição das propriedades das cerâmicas após a calcinação.

Desta forma, conclui-se que, o beneficiamento lodo de ETA em substituição a solos para produção de cerâmica deve observar a composição granulométrica do solo substituído, dando preferência ao uso de grãos menores, até 10% de substituição. Deve-se ainda buscar o equilíbrio com relação ao teor de argila e agentes de fundentes de modo a haver pouca variação em sua composição química, evitando mudanças significativas nas cerâmicas produzidas com lodo de ETA. Observando-se os resultados, deve-se dar preferência para o uso do lodo bruto, buscando não o secar completamente para a produção de cerâmica, evitando a perda de suas propriedades coloidais. O uso do lodo bruto reduz o gasto energético com secagem e moagem, além de facilitar a introdução deste material no processo produtivo.

A argila é um material de baixo custo, apesar de ser um recurso não renovável. É preciso avaliar os benefícios do emprego do lodo de ETA em materiais cerâmicos em função de diversas variáveis tais como, interferência no desempenho da cerâmica, distância das ETA até as olarias e necessidade de alteração do sistema produtivo para inserção de resíduos na matriz argilosa. Apesar do benefício ambiental proporcionado e da comprovada possibilidade do uso do lodo de ETA, uma vez que se remove do meio ambiente, o resíduo gerado no tratamento de água,

prioritariamente outras destinações que demandem menos energia e apresentem menores variações dos produtos gerados.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a durabilidade das cerâmicas produzidas;
- Investigar o uso de temperaturas maiores durante a calcinação e sua interferência na qualidade da cerâmica;
- Comparar benefícios e impactos de diferentes destinações para o lodo de ETA;
- Realizar avaliação do ciclo de vida de artefatos cerâmicos produzidos com misturas binárias de lodo e argila em escala industrial, observando impactos econômicos, sociais e ambientais do material alternativo.

REFERÊNCIAS

- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI. **Estudo técnico setorial da cerâmica vermelha**: Subsídios para a Elaboração do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Cadeia Produtiva de Cerâmica Vermelha. ABID: Brasília, 2016. p. 265.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro: **NBR 6502**, 1995. p. 18.
- _____. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: **NBR 6459**, 2016a. p. 3.
- _____. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: **NBR 7180**, 2016b. p. 3.
- _____. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: **NBR 7181**, 2016c. p. 12.
- _____. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: **NBR 6457**, 2016d. p. 8.
- ACKAH, L. A.; GURU, R.; PEIRAVI, M.; MOHANTY, M.; MA, X.; KUMAR, S.; LIU, J. Characterization of Southern Illinois water treatment residues for sustainable applications. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 5, p. 1374–1387, 2018.
- AGOSTINI, M. **A influência da variabilidade da geração do lodo de estação de tratamento de água nas propriedades da cerâmica vermelha**. 2014. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 9, p. 453–463, 2017.
- ALFAIA, R. G. S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management and Research**, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, 2017.
- ALGAMAL, Y.; KHALIL, N. M.; SALEEM, Q. M. Usage of the sludge from water treatment plant in brick-making industry. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 53, n. 3, p. 504–510, 2018.
- ALMEIDA, K. S.; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E.; ALMEIDA, C. S. M. Diagnóstico ambiental do setor de cerâmica vermelha na região de Oeiras (PI). **Revista em Agronegócio e**

Meio Ambiente, v. 14, n. 2, p. 429–440, 2021.

ALMEIDA, M. A. F. **Diagnóstico da indústria cerâmica vermelha, do município do Paudalho, no Estado de Pernambuco**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

AMARAL, I. B. C.; PRAT, B. V.; REIS, A. B. Effect of iron mining tailings as a red ceramic additive for decreased sintering temperature. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4., 2020.

ARAÚJO, F. C.; SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A.; ANGELIM, R. R. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. **Ceramica**, v. 61, n. 360, p. 450–456, 2015.

ARDILA, M. A. A.; SOUZA, S. T.; SILVA, J. L.; VALENTIN, C. A.; DANTAS, A. B. Geotextile tube dewatering performance assessment: An experimental study of sludge dewatering generated at a water treatment plant. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 19, p. 8129 - 8151, 2020.

ARIPIN, H.; MITSUDO, S.; PRIMA, E. S.; SUDIANA, I. N.; KIKUCHI, H. SANO, S. SABCHEVSKI, S. Crystalline mullite formation from mixtures of alumina and a novel material - Silica xerogel converted from sago waste ash. **Ceramics International**, v. 41, n. 5, p. 6488–6497, 2015.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129–164, 2017.

BACCELLI JÚNIOR, G. Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do seridó - RN. 2010. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. **Informe Setorial Cerâmica Vermelha**. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste -ETENE, 2010.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2001. p. 412.

- BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 171–177, 2015.
- BERDONOSOV, S. S.; PROSVETKIN, N. B.; ALEKSEEVA, Yu. V.; MELIKHOV, I. V. Tubular alumina as a key component of new thermally stable ceramic materials. **Inorganic Materials**, v. 50, n. 10, p. 997–1002, 2014.
- BOSCOV, M. E. G; TSUGAWA, J. K.; MONTALVAN, E. L. T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9848, 2021.
- BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L. C.; SALES, J. C. Qualidade na Indústria de Cerâmica Vermelha: Medidas e Alternativas para o Controle Dimensional. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 5–6, p. 40–43, 2016.
- BRANDT, M. J.; JOHNSON, K. M.; ELPHINSTON, A. J.; RATNAYAKA, D. D. Chapter 13 - Energy Use, Sustainability and Waste Treatment. In: BRANDT, M. J.; JOHNSON, K. M.; ELPHINSTON, A. J.; RATNAYAKA, D. D. **Twort's Water Supply**. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. p. 553-580.
- BRASIL. **Resolução CONAMA N° 313/2002**. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. 2002.
- BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico: PLANSAB**. Brasília: Ministério das Cidades, 2019. 240 p.
- BROPHY, J. H.; ROSE, R. M.; WULFF, J. **Ciência dos Materiais 2**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 1972.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. 8. ed. Hoboken: Wiley & Sons, Inc., 2009. 992 p.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). Solos não saturados no contexto geotécnico. 1ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759 p.
- CARGNIN, M.; KAMMER, E. H.; SOUZA, A. A. U.; NONI JUNIOR, A.; SOUZA, S. M. A. G. U. Effect of specimen geometry on kinetics of thermal decomposition of minerals in

porous ceramic tiles. **International Journal Of Applied Ceramic Technology**, v. 16, n. 3, p. 1098-1110, 2019.

CARMO, D.L.; SILVA, C.A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online]. v.36, n.4, p. 1211-1220, 2012.

CHAKRABORTY, A. K.. **Phase transformation of kaolinite clay**. Jadavpur: Springer, 2014, 342 p.

CHEW, C. M.; AROUA, M. K.; HUSSAIN, M. A.; ISMAIL, W. M. Z. W. Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: An industrial scale case study. **Journal of Cleaner Production**, 2016. v. 112, p. 3152–3163.

CHIANG, K. Y.; CHIEN, K. L.; HWANG, S. J. Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 2–3, p. 499–504, 2008.

CREMADES, L. V. V.; CUSIDÓ, J. A. A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1071–1080, 2018.

CRUZ, D. C.; OLIVEIRA, J. S.; ALVARENGA, M. C. S.; LAVALL, R. L. ; OLIVEIRA, C. R. Quality improvement of ceramic bricks by incorporation of sludge from water treatment units. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry - JCEC, Revista de Engenharia Química e Química - REQ**, v.2, n.2, p. 42-56, 2016.

CUNHA, G. D., LIMA, J. A. V., STACHIW, R. Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. **Nature And Conservation**, v. 12, n. 2, p.19-30, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. Informe mineral. Brasília: DIPLAN, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

FEITOSA, A. O. **Influência das variáveis de processamento na cor e propriedades tecnológicas de cerâmicas estruturais**. 2015. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de

Materiais, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS – FIEMG. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha**. Belo Horizonte, 2013. 59 p.

FERREIRA, R. P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. Documentos 63: **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. São Carlos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 34 p. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPPSE/16821/1/Documentos-63.pdf>. Acesso em: 01 out. 2019.

FRANÇA, S. C. A.; COUTO, H. J. B. Capítulo 5: Análise microgranulométrica - Malvern e Sedigraph. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (ed.). Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. p. 101-122.

FREITAS, F. G.; MAGNABOSCO, A. L. **Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil**. Instituto Trata Brasil, 2017. 74 p.

FROTA, T. B. **Análise da viabilidade técnica-financeira de alternativas de processos para desidratação de lodos de estações de tratamento de água**. 2020, 190 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

GENCEL, O.; KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. J.; SUTCU, M.; ERDOGMUS, E.; YARAS, A. Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123843, 2021.

GEORGE, D. B.; BERK, S. G.; ADAMS, V. D.; TING, R. S.; ROBERTS, R. O.; PARKS, L. H.; LOTT, R. C. Toxicity of alum sludge extracts to a freshwater alga, protozoan, fish, and marine bacterium. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 29, n. 2, p. 149–158, 1995.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G.. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 148–159, 2019.

GONÇALVES, W. P.; SILVA, V. J.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.;

SANTANA, L. V. L. Microstructural, physical and mechanical behavior of pastes containing clays and alumina waste. **Applied Clay Science**, v. 137, p. 259–265, 2017.

GRIM, R. E. **Applied Clay Mineralogy**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1962. 422 p.

GUIMARÃES, K. R. L.; HOLANDA, R. M.; SILVA, B. B.; ARAÚJO, L. E.; LORENA, E. M. G. Análise do atendimento aos requisitos ambientais : Um múltiplo estudo de caso nas indústrias de cerâmica vermelha do estado de Pernambuco. **Cerâmica Industrial**, 2018. v. 23, n. 1, p. 33–46.

GUTT, W.; NIXON, P.J. Use of waste materials in the construction industry. **Analysis of the RILEM Symposium by Correspondence**, v. 12, n. 70, p. 255-306, 1975.

HEINRICH, J. G.; GOMES, C. M. **Introduction to Ceramics Processing**. Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal, 2014. 222 p.

HENRIQUES JUNIOR., M.F.; RODRIGUES, J.A.P. (Org.). Cerâmica vermelha: Projeto EELA no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – INT/MCT, 2017. 135 p.

HOLANDA, R. M.; SILVA, B. B. Cerâmica Vermelha – Desperdício na Construção Versus Recurso Natural Não Renovável: Estudo de Caso nos Municípios de Paudalho/PE e Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 872–890, 2011.

HOSSAIN, S. S.; ROY, P. K. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 8, n. 4, p. 984–1009, 2020.

HYMAN, M.; TURNER, B.; CARPINTERO, A. **Guidelines for National Waste Management Strategies: Moving from Challenges to Opportunities**. Naïorobi: UNEP, 2013, 112 p.

IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

ILHAN, B.; YOBAS, B. Measuring construction for social, economic and environmental assessment. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 26, n. 5, p. 746–765, 2019.

INSTITUTO TRATA BRASIL; FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS; INSTITUTO

BRASILEIRO DE ECONOMIA - IBRE. **Desafios do saneamento em metrópoles da Copa 2014**: estudo da Região Metropolitana de Recife. 2011. p. 24. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/pesquisa-recife.pdf>. Acesso em 09 fev. 2018.

INSTITUTO TRATA BRASIL; REINFRA. **Acesso à água nas regiões Norte e Nordeste do Brasil**: desafios e perspectivas. 2018. p. 187. Disponível em: http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/acesso-agua/tratabrasil_relatorio_v3_A.pdf. Acesso em 20 ago. 2020.

KIZINIEVIC, O.; ZURAUSKIENE, R.; KIZINIEVIC, V.; ZURAUSKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41 p. 464–473, 2013.

KIZINIEVIČ, O.; KIZINIEVIČ, V.; BORIS, R.; GIRSKAS, G.; MALAIŠKIENĖ, J. Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 2, p.1228-1238, 2017.

KUASOSKI, M; DOLIVEIRA, S. L. D.; SILVA, A. Q. PANHOCA, L.; SHEVCHENKO, I. Sustainable practices of the red ceramic industry and its influence on local communities. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121765, 2020.

LEE, V. G.; YEH, T. H. Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics. **Materials Science and Engineering A**, v. 485, n. 1–2, p. 5–13, 2008.

LIMA, D. P. Caracterização de lodo da estação de tratamento de água utilizado como agregado na construção civil em elementos de telhas vermelhas. 2016. 72f. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

LIMA, L. K. S.; SILVA, K. R.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L. Microstructural characteristics, properties, synthesis and applications of mullite: a review. **Cerâmica**, v. 68, n. 385, p. 126–142, 2022.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405–418, 2008.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: usos e aplicações**. 2. ed. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990 p.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamentos de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica** **54**, v. 54, p. 411–417, 2008.

MARGEM, J. I. **Caracterização e incorporação de lodo de decantação de estação de tratamento de água (E.T.A) em cerâmica vermelha**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

MARTÍNEZ-GARCÍA, C.; ELICHE-QUESADA, L.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. S343–S348, 2012.

MARTINS, B. E. B. S. **Avaliação da influência do coagulante contido no lodo gerado na eta em corpos cerâmicos**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa De Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MASHEANE, M.; NTHUNYA, L.; MUBIAYI, M.; THAMAE, T.; MHLANGA, S. Physico-chemical characteristics of some Lesotho's clays and their assessment for suitability in ceramics production. **Particulate Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 117–122, 2018.

MEDEIROS, E. N. M.; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. Technical feasibility of the incorporation of rice husk ash, Sludge from water treatment plant and wood ash in clay for ceramic coating. **Revista Escola de Minas**, v. 67, n. 3, p. 279–283, 2014.

MELLO, I. S. C.; MOTTA, J. F. M.; BEZERRA, M. S.; NESI, J. R.; LORETI JUNIOR, R. **Atlas de matérias-primas minerais cerâmicas do Nordeste brasileiro**. São Paulo : CPRM, 2011. 184 p.

MICHELAN, D. C. G. S.; BATISTA, I. F.; BATISTA, D. F.; SANTOS, D. G.; MENDONÇA, L. C.; LIMA, D. M. F. Desempenho das etapas de tratamento de água, da estação de tratamento de água Poxim. **Scientia cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 7–14, 2019.

MILOŠEVIĆ, M.; DABIC, P.; KOVAC, S.; KALUDEROVIC, L.; LOGAR, M.

Mineralogical study of clays from Dobrodo, Serbia, for use in ceramics. **Clay Minerals**, v. 54, n. 4, p. 369–377, 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Boletim do Setor Mineral**. 2. ed. Brasília: MME, 2019. 28 p. 28. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/78404/0/BOLETIM+SETOR+MINERAL.pdf/acb1ca8d-b2bd-825c-03e8-939e87f94682>. Acesso em: 11 jun. 2020.

MONTEIRO, S. N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J. I.; SÁNCHEZ, R.; VIEIRA, C. M. F.

Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. **Construction and building materials**, v. 22, p. 1281-1287, 2008.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Solid state sintering of red ceramics at lower temperatures. **Ceramics International**, v. 30, n. 3, p. 381–387, 2004.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. **Construction and Building Materials** v. 68, p. 599–610, 2014.

MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMESSO, A. M.; LIMA, G. L. Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. **Química Nova**, v.32, n. 8, p. 2085-2093, 2009.

MORENO, M. M. T. **Argilas**: Composição mineralógica, distribuição granulométrica e consistência de pastas. 2012. 125 f. Tese (Livre-Docência em Argilas para Cerâmica) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2012.

MORTULA, M.; BARD, S. M.; WALSH, M. E.; GAGNON, G. A. Aluminum toxicity and ecological risk assessment of dried alum residual into surface water disposal. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 36, n. 1, p. 127–136, 2009.

MOTTA SOBRINHO, M. A.; TAVARES, R. G.; ARRUDA, V. C. M.; CORREA, M. M.; PEREIRA, L. J. R. Generation, treatment and final disposal of the waste of water treatment stations in the state of Pernambuco, Brazil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 761–771, 2019.

MUÑOZ VELASCO, P.; MORALES, M. P.; LETELIER, V.; MENDÍVEL, M. A. Fired clay bricks made by adding wastes assessment of the impact on physical, mechanical and thermal

properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 241–252, 2016.

Munsell soil color charts. New Windsor: Kollmorgen Instruments-Macbeth Division, 1994.

MYMRIN, V.; ALEKSEEV, K.; FORTINI, O. M.; CATAI, R. E.; NAGALLI, A.; RISSARDI, J. L.; MOLINETTI, A.; PEDROSO, D. E. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 145, p. 367–373, 2017.

NIGAY, P. M.; SANI, R.; CUTARD, T.; NZIHO, A. Modeling of the thermal and mechanical properties of clay ceramics incorporating organic additives. **Materials Science & Engineering A**, v. 708, p. 375–382, 2017.

OLIVEIRA, E. A.; LEITE, J. C. Use of Clay Sludge Water Treatment Plant Sludge to Produce Ceramic Brick. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, n. 12, p. 281–293, 2018.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J.N.F. Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 54, p.167-173, 2008.

OLIVEIRA, G.; SCAZUFCA, P.; PIRES, R. C. Ranking do saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2017. 122 p. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/estudos/ranking/relatorio-completo-2014.pdf> 5Cnhttp://www.tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento. Acesso em: 09 fev. 2018.

OLIVEIRA, M. D.; BIANCHI, D. P. Z.; FONSECA, J. F. R.; GORZA JÚNIOR, N. A.; LIBÂNIO, M. Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 4, p. 613–625, 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE – OMS. **Summary and policy implications Vision 2030** : the resilience of water supply and sanitation in the face of climate change. Geneva, 2009. 48 p.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE – OMS. Water sanitation hygiene: Economics. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/economics/en/. Acesso em: 02 nov. 2019.

ORLOV, A.; BELKANNOVA, M.; VATIN, N. Structural ceramics modified by water

treatment plant sludge. **Materials**, v. 13, n. 22, p. 1–11, 2020.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Efeito da incorporação do lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. *Cerâmica*, v. 54, p. 63-76, 2008.

PAZ, Y. M.; HOLANDA, R. M.; EL-DEIR, S. G. Uso da argila no processo produtivo da cerâmica vermelha: Um estudo de caso no município de Paudalho, Pernambuco. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 283–289, 2015.

PEI LING, Y.; OOI, C.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Properties evaluation and fabrication of green clay reformulated from water sludge. **Ceramics International**, v. 44, n. 2, p. 1411–1419, 2018.

PETTERLE, A. R.; SANTIAGO, G. G; CHONG, W.; SOMENSI, L.; TAMBORIM, S. M. Ceramic plates containing sludge from a water treatment plant and the rice husk ash: Relation between physical-chemistry properties and microstructure. **Quimica Nova**, v. 41, n. 10, p. 1117–1126, 2018.

PHONPHUAK, N.; CHINDAPRASIRT, P.. Types of waste, properties, and durability of pore-forming waste-based fired masonry bricks. In: PACHECO-TORGAL, F.; LOURENÇO, P. B.; LABRINCHA, J. A.; KUMAR, S.; CHINDAPRASIRT, P. (ed.). **Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: design, properties and durability**. Sawston: Elsevier, 2015. Cap. 6. p. 103-127.

PINTO, C. S. **Curso básico mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, p. 31–35, 1997

RANGEL, R. N. **Coloides: Um estudo introdutório**. São Paulo: LCTE Editora, 2006. 168 p.

RAVISHANKAR, N.; CARTER, C. B. Application of SEM to the study of ceramic surfaces. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales(Venezuela)**, v. 19, p. 7–12, 1999.

REIS, A.; SOUZA, J.; PERINI, B. L. B.; UENO, O. K. Influência da adição de lodo, de uma estação de tratamento de água (ETA), nas propriedades mecânicas em cerâmica vermelha. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT, 21., 2014, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá, 2014. p. 1716-1722.

REIS, A. S. **Produção de telha cerâmica com incorporação simultânea de resíduo de beneficiamento de granito, lama de alto forno e resíduo de massa cerâmica crua**. 2015, 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de água**: Tecnologia atualizada. 1a. ed. São Paulo: Editora Blücher Ltda., 1991, 332 p.

RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Edgar Blucher, 2001. 112 p.

RODRIGUES, L. P. **Preparação e caracterização de piso cerâmico vitrificado incorporado com resíduo de estação de tratamento de água**. 2016. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.

ROUABHIA, F.; NEMAMCHA, A.; MOUMENI, H. Elaboration and characterization of mullite-anorthite-albite porous ceramics prepared from Algerian kaolin. **Ceramica**, v. 64, n. 369, p. 126–132, 2018.

SANTANA, L. N. L.; GOMES, J.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; SEGADÃES, A. M. Microstructure development in clays upon heat treatment: Kinetics and equilibrium. **Applied Clay Science**, v. 135, p. 325–332, 2017.

SANTOS, I.V.S.; RAMIRES, M.V.V.; KAZMIERCZAK, C.S.; SILVA, H.C.; KERN, A.P.; CAMARGO, S.A. Reciclagem do resíduo (lodo) da estação de tratamento de água do município de São Leopoldo-RS, visando a produção de componentes cerâmicos. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 45., 2001, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis, 2001. p. 0401201-0401214.

SANTOS, J. J. H. **Utilização do lodo gerado na ETA de Alvorada-RS na fabricação de blocos cerâmicos**. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2016.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas, aplicada às argilas brasileiras**. 2. ed., v. 1. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 340 p.

SCHNEIDER, C. L.; NEUMANN, R.; SOUZA, A. S. Determination of the distribution of

size of irregularly shaped particles from laser diffractometer measurements. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p. 30–40, 2007.

SCRIBOT, C.; MAHERZI, W.; BENZERZOUR, M.; MAMINDY-PAJANY, Y.; ABRIAK, N. A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 21–31, 2018.

SENFETER, T.; FRITSCH, L.; BERGER, M.; KOFLER, T.; MAYERL, C.; PILLEI, M.; KRAXNER, M. Sludge thickening in a wastewater treatment plant using a modified hydrocyclone. **Carbon Resources Conversion**, v. 4, p. 132–141, 2021.

SHACKELFORD, J.F., DOREMUS, R.H. (org.). *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*. Springer: Davis, 2008. 209 p.

SILVA, E. L. G. **Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em corpos cerâmicos**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, São Luís, 2014.

SILVA NASCIMENTO, J. J.; LUNA, C. B. B.; COSTA, R. F.; BARBIERI, L. F. P.; BEZERRA, E. O. T. Evaluation of red clay and ball clay drying using transient three-dimensional mathematical modeling: volumetric shrinkage and moisture content. **Materials Research Express**, v. 6, n. 9, p. 095206, 2019.

SILVA, R. G.; SILVA, V. P. Produção mais limpa: Contributos teórico-práticos para a sustentabilidade da cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, n. 368, p. 494–507, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, 2019, p. 186.

_____. **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, 2020, p. 190.

_____. **Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral ano de referência 2020**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, 2021, p. 191.

SOUSA, L. L.; SALOMÃO, R.; ARANTES, V. L. Development and characterization of porous moldable refractory structures of the alumina-mullite-quartz system. **Ceramics**

International, v. 43, n. 1, p. 1362–1370, 2017.

SUTCU, M.; GENCEL, O.; ERDOGMUS, E.; KIZINIEVIC, O.; KIZINIEVIC, V.; KARIMIPOUR, A.; VELASCO, P. M. Low cost and eco-friendly building materials derived from wastes: Combined effects of bottom ash and water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126669, 2022.

TANTAWY, M. A.; MOHAMED, R. S. Middle Eocene clay from Goset Abu Khashier: Geological assessment and utilization with drinking water treatment sludge in brick manufacture. **Applied Clay Science**, v. 138, p. 114–124, 2017.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, v. 57, p. 288–293, 2011a.

TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; DÍAZ-MORA, N. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 387–394, 2011b.

TARTARI, R. Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Toledo, 2008.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 561–565, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A.; DIAS, F. C. Influência da data de coleta do lodo de ETA incorporado em massas cerâmicas, nas suas propriedades tecnológicas. In: Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society, 48., 2004, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2004. p. 1-12.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A.; SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006.

- TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações nas suas propriedades pela adição de resíduos sólidos**. 2006. 182 f. Tese (Livre docência em Física) - Departamento de Física, Química e Biologia da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2006.
- TORRES, P.; HERNÁNDEZ, D.; PAREDES, D. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. **Revista Ingenieria de Construccion**, v. 27, n. 3, p. 145–154, 2012.
- TOYA, T.; NAKAMURA, A.; KAMESHIMA, Y.; NAKAJIMA, A.; OKADA, K. Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant. **Ceramics International**, v. 33, n. 4, p. 573–577, 2007.
- UKWATTA, A; MOHAJERANI, A.; SETUNGE, S.; ESHTIAGHI, N. Possible use of biosolids in fired-clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 86–93, 2015.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **ABC of SCP: Clarifying Concepts on Sustainable Consumption and Production**. Paris: UNEP, 2010. 59 p.
- VASCONCELOS DA SILVA, A. M. DELGADO, J. M. P. Q.; GUIMARÃES, A. S.; BARBOSA DE LIMA, W. M. P.; SOAREZ GOMEZ, R.; PEREIRA DE FARIAS, R.; SANTANA DE LIMA, E.; BARBOSA DE LIMA, A.G. Industrial Ceramic Blocks for Buildings: Clay Characterization and Drying Experimental Study. **Energies**, v. 13, n. 2834, p. 1–22, 2020.
- VIEIRA, C. M. F.; MARGEM, J. I.; MONTEIRO, S. N. Microstructural changes of clayey ceramic incorporated with filter sludge from water treatment plant. **Revista Matéria**, v. 13, n. 2, p. 275–281, 2008.
- VIEIRA, S. C.; RAMOS, A. S.; VIEIRA, M. T. Mullitization kinetics from silica- and alumina-rich wastes. **Ceramics International**, v. 33, n. 1, p. 59–66, 2007.
- VITORINO, J. P.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 55, p. 385–392, 2009.
- XU, G. R.; ZOU, J. L.; LI, G. B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$. **Water Research**, v.

43, n. 11, p. 2885–2893, 2009.

XU, H.; PEI, H.; JIN, Y.; MA, C.; WANG, Y. SUN, J.; LI, H. High-throughput sequencing reveals microbial communities in drinking water treatment sludge from six geographically distributed plants, including potentially toxic cyanobacteria and pathogens. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 769–779, 2018.

YANG, F.; LI, C.; LIN, Y.; WANG, C. Effects of sintering temperature on properties of porous mullite/corundum ceramics. **Materials Letters**, v. 73, p. 36–39, 2012.

YATSENKO, N. D.; YATSENKO, E. A.; ZAKARLYUKA, S. G. Phase composition and properties of building ceramic as a function of the contents of calcium carbonates and iron oxides. **Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)**, v. 73, n. 9–10, p. 319–322, 2017.

YUAN, N.; WANG, C. WENDLING, L. A.; PEI, Y. Ecotoxicological assessment of dewatered drinking water treatment residue for environmental recycling. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 38, n. 18, p. 2241–2252, 2017.

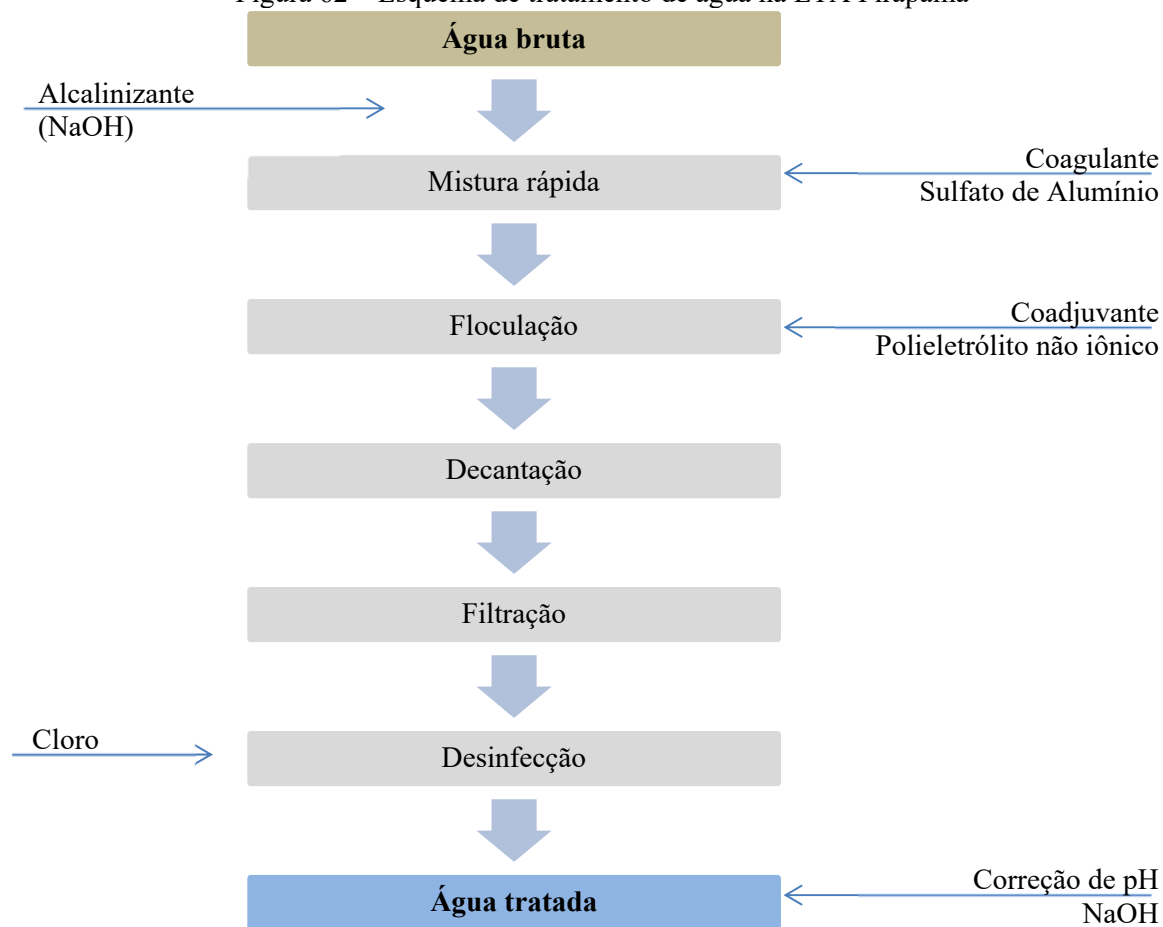
ZAMAN, N. K.; ROHANI, R.; YUSOFF, I. I.; KAMSOL, M.; BASIRON, S.; RASHID, A. A. Eco-Friendly Coagulant versus Industrially Used Coagulants: Identification of Their Coagulation Performance, Mechanism and Optimization in Water Treatment Process. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, v. 18, n. 17, p. 9164, 2021.

ZOUAOUI, H.; BOUAZIZ, J. Physical and mechanical properties improvement of a porous clay ceramic. **Applied Clay Science**, v. 150, n. June, p. 131–137, 2017.

APÊNDICE A – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE PIRAPAMA

A ETA Pirapama é a estação mais recente a entrar em funcionamento na RMR, sendo responsável pelo abastecimento da maior parte da região, com uma produção de cerca de 4,5 m³/s. O sistema é abastecido exclusivamente pela Barragem de Pirapama, possuindo mais três tomadas, que podem ser utilizadas no futuro. O esquema do tratamento de água pode ser observado na Figura 62.

Figura 62 – Esquema de tratamento de água na ETA Pirapama



Fonte: A autora (2023).

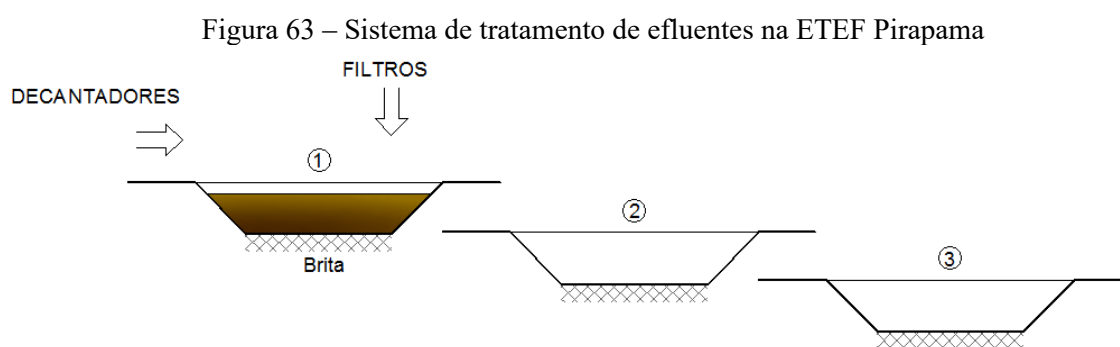
No início do tratamento, a água recebe soda cáustica a fim de corrigir a alcalinidade da água. No vertedouro de mistura rápida, a água recebe o sulfato de alumínio de atua como agente floculante e nos floculadores, recebe um polieletrólito não iônico, que atua como coadjuvante, ajudando a tornar os flocos maiores. Os floculadores usados são mecânicos, possuindo três gradientes de velocidade.

Dos flocculadores a água segue para os decantadores. No caso de Pirapama, o decantador é de remoção contínua, isto é, não existe sistema de descarga e todo o lodo gerado é encaminhado diretamente para os adensadores e posteriormente para as lagoas de lodo.

Da etapa de decantação a água segue para os filtros. A captação de água filtrada se dá por meio de dutos furados (Manifold). Logo, quando há o entupimento desses orifícios (colmatação) é necessário que estes sejam limpos. Essa limpeza é feita com água e ar, periodicamente, entre 24 e 48 horas, dependendo da granulometria do resíduo que há na água. A água resultante da limpeza de filtros também vai para os adensadores.

Nos adensadores, a água sobrenadante é recuperada, voltando ao início do tratamento e o lodo é bombeado para as lagoas de decantação. A quantidade de geração de lodo foi estimada com base na AWWA (1999), e tem fundamento na turbidez da água bruta. Em períodos de estiagem estima-se 7,5 NTU e 75 NTU em períodos chuvosos. Contudo, a ETA Pirapama tem recebido água com turbidez que varia de 5 a 300 NTU sendo, desta forma, gerado mais ou menos lodo, dependendo da qualidade da água recebida. O projeto ainda estima que entre 85 e 95% do lodo seja gerado na etapa de decantação e o demais nos filtros.

Com relação ao tratamento de efluentes, na ETEF Pirapama, o espessamento do lodo se dá em lagoas de decantação. Existem três lagoas que funcionam alternadamente (quando uma está cheia, começa-se a utilizar a outra) (Figura 63). Estas recebem o lodo da descarga e lavagem da etapa de decantação e da lavagem de filtros. Quando da lavagem dos filtros, a água filtrada ainda retorna ao processo de tratamento (recuperação).



Fonte: A autora (2023).

As amostras de lodo coletadas para ensaios foram retiradas da parte superior da primeira lagoa de decantação e armazenadas em baldes plásticos vedados até o dia da sua utilização. O material

retirado é muito líquido, e foi removido de uma borda acessível da lagoa visto que não havia acessos construídos para tal (Figura 64).

Figura 64 – ETEF Pirapama: (a) vista da lagoa de decantação; (b) recipiente de coleta



Fonte: A autora (2023).

A coleta foi realizada no mês de maio, período chuvoso no Estado de Pernambuco. O período de coleta do lodo de ETA também é um fator importante para o seu aproveitamento. Teixeira *et al.* (2004) realizaram uma coleta mensal do lodo e verificou que, a quantidade de chuva do período altera granulometria e variação do teor de argila, areia e silte, se houver uma grande variação no nível do rio. Uma vez que, quando há maior incidência de chuvas nos rios, a água é agitada e algumas partículas do leito são suspensas. A areia, que é mais densa, tende a precipitar, enquanto argila e silte permanecem por mais tempo na superfície. Assim, o lodo do período chuvoso é mais argiloso que os de estiagem (TEIXEIRA *et al.*, 2002).

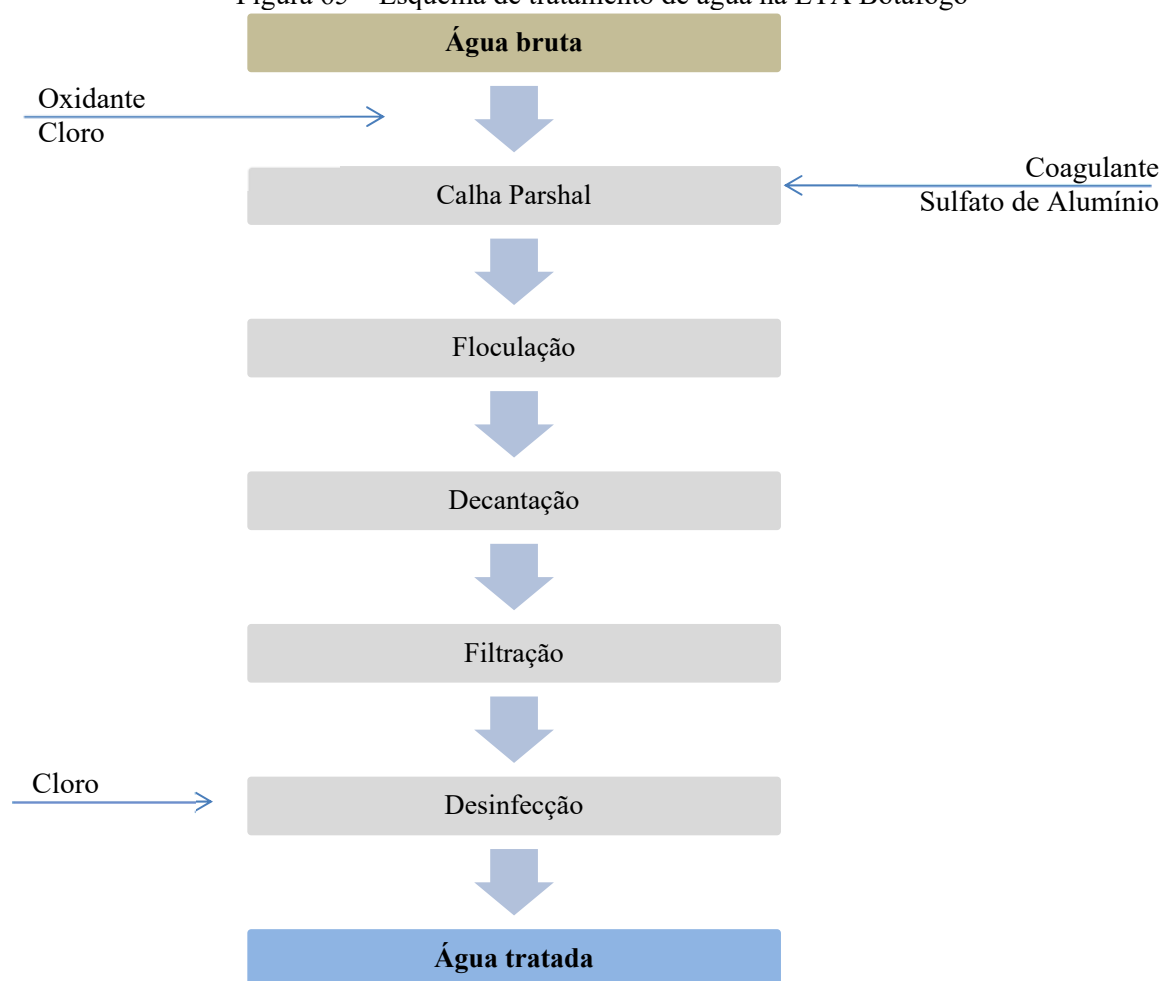
O lodo coletado foi separado de modo que, parte foi seca ao ar, sendo exposto ao sol quando possível, parte foi seca em estufa e parte ficou *in natura*, para experimentos posteriores. A umidade inicial do lodo coletado foi de 735,33%, demorando cerca de 10 dias até que o lodo estivesse totalmente seco ao ar, sem necessidade de estufa.

APÊNDICE B – Estação de tratamento de água de Botafogo

A ETA Botafogo, localizada no município de Igarassu, tem cerca de 30 anos de funcionamento, sendo hoje a principal responsável pelo abastecimento da zona norte da RMR. Na estação são tratados cerca de 1,1 m³/s de água por dia, mas sua capacidade pode ser aumentada para até 2,2 m³/s. O esquema de tratamento da ETA Botafogo pode ser observado na Figura 65.

O sistema é abastecido por três mananciais, que apresentam vazões e características particulares. A água proveniente dos reservatórios de Botafogo e Arpe, por exemplo, é bastante turva e de coloração alaranjada. Segundo o Téc. Samuel, a água é rica em minerais argílicos.

Figura 65 – Esquema de tratamento de água na ETA Botafogo



Fonte: A autora (2023).

A água recebida é rica em ferro, logo, é feita uma pré-cloração para facilitar a posterior formação de flocos. As águas das diferentes fontes se misturam na calha parshal, onde é adicionado o sulfato de alumínio, que funciona como floculante. A velocidade da calha e do sistema ajuda na formação dos flocos.

Após isso, a água segue para os floculadores onde é agitada em quatro estágios. Após a floculação, segue para a decantação e depois aos filtros.

O resíduo gerado durante a floculação fica armazenado nos decantadores. Os decantadores usados na ETA Botafogo são do tipo colmeia (decantadores de alta taxa), acumulando o lodo no fundo. Estes são limpos periodicamente por meio de descarga ou lavagem. Parte do lodo é gerada nesta etapa. A outra parte é obtida a partir da lavagem dos filtros.

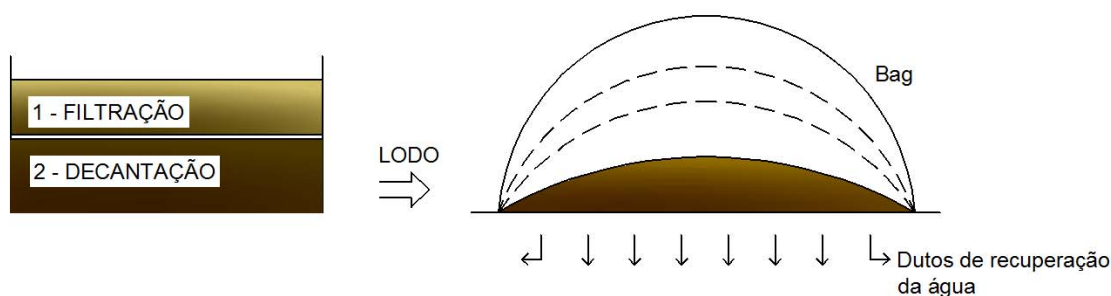
A água que sai dos filtros é tratada novamente com cloro, de onde segue para abastecimento. São feitas análises de qualidade da água a cada duas horas. O resíduo proveniente dos decantadores e da lavagem dos filtros seguem para o adensamento, etapa onde as partículas sólidas se acumulam no fundo dos tanques, e o líquido sobrenadante retorna à primeira etapa do tratamento.

Em Botafogo, o espessamento do lodo se dá em *bags* em duas etapas. Na primeira, há o processo de filtração do resíduo de tratamento, onde a água filtrada é recuperada e o lodo sofre a decantação. Este lodo é colocado em *bags* em contato com o solo, que possui dutos de recuperação da água que percola. Desta forma, quando o lodo está seco, se esvazia o *bag* e retoma o processo do início (Figura 66).

As *bags* só são abertas quando o volume de lodo chega ao máximo suportado. Abaixo das *bags*, existem dutos que também recuperam a água, que é levada novamente ao início do tratamento.

A fim de coletar uma amostra para a pesquisa, a *bag* foi aberta e coletados cerca de 30 l de lodo. Este foi colocado em uma bombona que ficou vedada até a sua utilização. Da mesma forma que foi feito com o lodo da ETA Pirapama, a amostra do lodo da ETA Botafogo foi dividida de modo que parte secou ao ar, parte em estufa e parte se deixou do mesmo modo que foi coletado. A umidade inicial do lodo coletado foi de 311,81%.

Figura 66 – Sistema de tratamento de efluentes na ETEF Botafogo



Fonte: A autora (2023).

APÊNDICE C – Resultados da regressão linear

Tabela 24 – Massa específica – estatística de regressão

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,931666
R-Quadrado	0,868002
R-quadrado ajustado	0,852916
Erro padrão	50,294
Observações	40

Fonte: A autora (2023).

Tabela 25 – Massa específica – tabela de análise de variâncias (ANOVA)

Análise da Variância		SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	582173,9	145543,5	57,53874	6,59E-15
Resíduo	35	88532,04	2529,487		
Total	39	670706			

Fonte: A autora (2023).

Tabela 26 – Retração – estatística de regressão

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,759472
R-Quadrado	0,576798
R-quadrado ajustado	0,528432
Erro padrão	0,530455
Observações	40

Fonte: A autora (2023).

Tabela 27 – Retração – tabela de análise de variâncias (ANOVA)

Análise da Variância		SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	13,42276	3,35569	11,92571	3,23E-06
Resíduo	35	9,848402	0,281383		
Total	39	23,27116			

Fonte: A autora (2023).

Tabela 28 – Absorção – estatística de regressão

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,980477
R-Quadrado	0,961336
R-quadrado ajustado	0,956917
Erro padrão	0,951588
Observações	40

Fonte: A autora (2023).

Tabela 29 – Absorção – tabela de análise de variâncias (ANOVA)

Tabela 27 – Resposta: tabela de análise de variâncias (ANOVA)					
Análise da Variância		SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	788,0157	197,0039	217,5588	3,38E-24
Resíduo	35	31,69322	0,90552		
Total	39	819,7089			

Fonte: A autora (2023).

Tabela 30 – Resistência – estatística de regressão

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,549024
R-Quadrado	0,301428
R-quadrado ajustado	0,221591
Erro padrão	0,987802
Observações	40

Fonte: A autora (2023).

Tabela 31 – Resistência – tabela de análise de variâncias (ANOVA)

Tabela 31 - Resistência		Tabela de análise de variâncias (ANOVA)			
Análise da Variância	SQ	MQ	F	F de significação	
Regressão	4	14,73599	3,683998	3,775545	0,011785
Resíduo	35	34,15135	0,975753		
Total	39	48,88734			

Fonte: A autora (2023).