

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL**

CAMILA NAVARINI NIEVOLA

**CARACTERIZAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MATRIZ CERÂMICA REFRAATÁRIA:
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REFRAATÁRIO**

PATO BRANCO

2019

CAMILA NAVARINI NIEVOLA

**CARACTERIZAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM MATRIZ CERÂMICA REFRAATÁRIA:
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REFRAATÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título Mestre.

Orientador: Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho

PATO BRANCO

2019

N682c Nievola, Camila Navarini.
Caracterização da incorporação de lodo de estação de tratamento de água em matriz cerâmica refratária: uma análise do comportamento refratário / Camila Navarini Nievola. – 2019.
80 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2019.
Bibliografia: f. 71 - 78.

1. Lodo residual. 2. Cerâmica - Resíduos. 3. Água - Estações de tratamento. I. Pereira Filho, José Ilo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n.º 34

“Caracterização da Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água em Matriz Cerâmica Refratária: Análise do Comportamento Refratário”

por

Camila Navarini

Dissertação apresentada às quatorze horas, do dia dez de junho de dois mil e dezanove, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Pato Branco*. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho
(orientador)
UTFPR/PB

Prof. Dr. Geocris Rodrigues dos Santos
UTFPR/PB

Prof. Dr. Márcio Barreto Rodrigues
UTFPR/PB

Prof. Dr. Aline Ferrão Custodio Passini
(participação à distância)
UFSM/RS

Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil - PPGEC/UTFPR

A via original deste termo, devidamente assinada, encontra-se arquivada na Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC).

A minha família por toda dedicação e
compreensão nas horas de ausência.
Fazer da queda um passo de dança, do
medo uma escada, do sonho uma ponte,
da procura um encontro. Um simples
encontro.
(Fernando Sabino)

RESUMO

Estações de tratamento de água (ETA) comportam-se como indústrias, transformando água bruta em água potável, e em consequência disso geram quantidades significativas de resíduos e efluentes. O lodo, oriundo da limpeza dos decantadores e filtros, é classificado como resíduo sólido e não pode ser descartado em corpos d'água. Além disso, a resolução CONAMA nº 430/2011 classifica este material como poluente, em função da sua composição química, a qual tem relação direta com o coagulante empregado no tratamento, basicamente compostos de alumínio e ferro. No entanto, esse material possui em sua constituição argilominerais e siltes o que o aproxima de argilas, potencializando sua incorporação em produtos de cerâmica vermelha. Estudos concluem que a incorporação de até 15% em peso, do lodo, na massa de cerâmica vermelha queimada entre 850°C a 1050°C, não provocou alterações significativas nas misturas, as quais, ainda atendem os requisitos da normatização. Outros concluíram que adições de até 10% de lodo, para temperaturas de queima de até 1000°C, pouco afetam a retração linear, porém há aumento de absorção de água com diminuição de resistência mecânica. Em função desses estudos, somando-se as técnicas de incorporação de resíduos, há o objetivo de valorizar o lodo de ETA através da sua incorporação na fabricação de peças de cerâmica refratárias. As matérias primas foram coletadas no Estado do Paraná, caracterizados fisicamente e quimicamente, misturados em diferentes proporções e queimadas, buscando-se a formulação que apresente melhor relação entre retração linear, absorção de água, resistência mecânica e resistência ao choque térmico e proporcione a valorização desse resíduo em peças para revestimento. A incorporação do lodo na matriz cerâmica provocou aumento da perda ao fogo e da absorção com diminuição da resistência mecânica. Em relação as propriedades térmicas não houve influência negativa do lodo na mistura e com isso conclui-se que é possível incorporar até 10% de lodo na matriz cerâmica sem grandes prejuízos mecânicos.

Palavras chaves: Lodo de ETA, cerâmica refratária, incorporação.

ABSTRACT

Water Treatment Plants (WTP) behave as industries, changing raw water into drinking water and producing significant quantities of residues and effluents as a result. The sludge from the cleaning of inclined plates and filters is classified as solid residue and it cannot be discarded in bodies of water. Furthermore, CONAMA's resolution n° 430/2011 classifies this material as a pollutant, due to its chemical composition, which has direct relation with the coagulant used in the treatment, basically aluminum and iron compounds. However, this material has clay minerals and silts in its constitution that is approximated to clays, optimizing its incorporation to red ceramics products. Studies conclude the incorporation of up to 15%, in weight, of the sludge to the burnt red ceramics mass between 850°C and 1050°C did not provoke significant alterations in the mixtures, which still comply with the standard requirements. Other studies concluded additions up to 10% of sludge have few effects on the linear shrinkage for burning temperature up to 1000°C, but there is an increase of water absorption with decrease of mechanical resistance. Due to these studies, adding the residues incorporation techniques, the objective is to value WTP sludge through its incorporation to the manufacture of refractory ceramics pieces. The raw materials have been collected in the state of Paraná, physically and chemically featured, mixed in different proportions and burned, looking for the formulation that presents the best relation between linear shrinkage, water absorption, mechanical resistance and thermal shock resistance and provides the appreciation of this residue in coating articles. The sludge incorporation into the ceramics matrix caused increasing of loss in the fire and of the absorption with decreasing of mechanical resistance. Regarding to the thermal properties there was not sludge negative influence in the mixture. Thereby, it was concluded that it is possible to incorporate up to 10% of sludge in the ceramics matrix without great mechanical damage.

Keywords: WTP sludge; refractory ceramics; incorporation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES / LISTA DE GRÁFICOS

Figura 1: Fluxograma de funcionamento da ETA	20
Figura 2: Fluxograma de aplicação-classificação dos materiais cerâmicos	30
Figura 3: Classificação quanto a forma	31
Figura 4: Fluxograma da metodologia	33
Figura 5: Argila Coletada.....	34
Figura 6: Argila seca a 100°C	34
Figura 7: Argila moída e peneirada	35
Figura 8: Difratoograma de raio X da argila.....	35
Figura 9: Localização da ETA escolhida	36
Figura 10: a) Lodo recém lançado no leito de secagem b) lodo após uma hora de desague	38
Figura 11: Lodo após o desague.....	39
Figura 12: Lodo após o desague e seco ao ar	39
Figura 13: Lodo após moagem e peneiramento.....	40
Figura 14: Difratoograma de raio X do lodo	41
Figura 15: Mistura M2	43
Figura 16: Corpos de prova conformados	44
Figura 17: Forno Mufla marca Jung	45
Figura 18: Corpo de prova durante a execução do ensaio.....	47
Figura 20: Corpos de prova M2 em imersão	56
Figura 21: Cor de queima das misturas	59
Figura 22: Fratura após choque térmico	62
Figura 23: DRX das misturas após a queima	66
Figura 24:MEV a)M0 1200°C b) M0 1300°C c)M1 1200°C d)M1 1300°C e) M2 1200°C f) M2 1300°C	67

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1: Disponibilidade de reservas de argila comum e de argila refratária no Brasil e no Paraná.....	17
Quadro 2: Caracterização da argila.....	36
Quadro 3: Caracterização do lodo.....	42
Quadro 4: Plano de misturas.....	42
Quadro 5: Número de corpos de prova de cada mistura para cada temperatura de queima	45
Quadro 6: Densidade verde e seca dos corpos de prova	49
Quadro 7: Densidade queimada dos corpos de prova	49
Quadro 8: Retração linear de secagem e queima dos corpos de prova.....	50
Quadro 10: Número de ciclos.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

µm: micrómetro

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNER-ME: Departamento nacional de estradas e rodagens – métodos de ensaios

DRX: Difração de raios X

ETA: Estação de Tratamento de água

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

NBR: Norma Brasileira

PAC: PolíCloreto de Alumínio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA	19
2.2 LODO.....	24
2.3 ARGILAS E MATERIAIS CERÂMICOS	27
2.4 CERÂMICA REFRAATÁRIA	30
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA 37	
3.2 DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO IDEAL DE LODO DE ETA NAS MATRIZES CERÂMICAS REFRAATÁRIAS	42
3.3 DETERMINAÇÃO DA INFLUENCIA DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA NA REFRAATIEDADE DA CERÂMICA.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERISTICAS FÍSICAS.....	49
4.1.1 Densidade.....	49
4.1.2 Retração Linear	50
4.1.3 Perda ao fogo	52
4.1.4 Absorção de Água	53
4.1.5 Módulo de Ruptura à Flexão.....	58
O gráfico a seguir apresenta o módulo de ruptura a flexão de cada mistura em relação às temperaturas ensaiadas.	58
4.1.6 Cor após a Queima.....	59
4.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERISTICAS TÉRMICAS	60
4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	64
4.4 MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA	66
5 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS.....	71
APENDICES.....	80

1 INTRODUÇÃO

O Estado do Paraná produz aproximadamente 4.000 toneladas de lodo de Estação de Tratamento de Água seco a cada mês. Sendo que 50% dessa produção vêm das estações de tratamento localizadas na cidade de Curitiba (HOPPEN et al., 2005). Estudos de 2012 apontaram que o estado gerou, aproximadamente, 118 mil litros de lodo por dia (CARNEIRO e ANDREOLI, 2013).

Sistemas de tratamento de água englobam o manancial de captação, a estação de tratamento e a rede de distribuição de água potável (WIECHETECK e CORDEIRO, 2002). As estações de tratamento de água (ETA) captam água bruta e a tornam potável, através de processos físicos e químicos, com emprego das etapas de aeração, remoção de impurezas grossas, pré-cloração, controle de vazão, coagulação, floculação, decantação, desinfecção, correção de pH e fluoretação (TEIXEIRA et al., 2006).

Essa transformação faz com que as estações de tratamento de água assemelhem-se a indústrias, transformando a matéria-prima, que é a água bruta, em produto final, que é a água potável, gerando nesses processos resíduos em diversas etapas, que se relacionam com as características da matéria-prima, com os produtos químicos adicionados, com a planta e as condições de tratamento (CORDEIRO, 2001; WIECHETECK e CORDEIRO, 2002).

Portela et al. (2003) afirmam que a dosagem de produtos químicos para o tratamento se dá em função da qualidade da água bruta. Quanto pior, maior será a necessidade de aplicar maior concentração de produtos para atingir a qualidade esperada do produto final, conseqüentemente o volume de lodo gerado aumenta.

O lodo de ETA é o resíduo composto de água e sólidos suspensos, oriundo da fonte de água, mais os produtos resultantes dos reagentes adicionados à água no processo de tratamento. As etapas de decantação (ou flotação) e filtração são as que mais geram esse resíduo (RICHTER, 2001). Para Hegazy et al. (2012) o lodo de ETA é composto das impurezas removidas e precipitadas de água bruta mais os resíduos químicos do tratamento empregado.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) NBR 10004/2004, a qual trata da classificação dos resíduos sólidos, aponta o lodo de ETA como resíduo

sólido, classe II-A, não inerte. Sendo esse um dos fatores que contribuiu para o aumento do cuidado na disposição final desse resíduo.

A disposição e destinação correta desse tipo de lodo são de extrema importância, visto que, em função de sua composição química com teores de metais pesados, uma destinação incorreta pode provocar degradação do meio ambiente (DI BERNARDO, 2002).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12305/10) coloca a destinação final ambientalmente adequada como a “destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes [...] entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos”.

Entretanto, no Brasil, a maior parte desses lodos, é lançada nos sistemas hídricos mais próximos, sendo poucas as ETAs que possuem sistema de tratamento e disposição do resíduo (DI BERNARDO, 2002; OLIVEIRA e HOLANDA, 2008).

O descarte do lodo no corpo d'água provoca o aumento das concentrações de alumínio na água (HEGAZY et al. 2012), pois os coagulantes mais utilizados são à base de alumínio e ferro (DELGADO, 2016). Podendo ocasionar também o aumento de sólidos em suspensão e assoreamento, prejudicando a qualidade dessa água e a biodiversidade aquática (BARBOSA et al., 2000).

No entanto, em função do maior rigor das leis e políticas nacionais, há uma nova sistematização de disposição final, que visa mitigar os impactos ambientais oriundos desse lodo (OLIVEIRA e HOLANDA, 2008).

Richter (2001) cita, entre outros métodos, o lançamento desse lodo em sistemas de coleta de esgoto sanitário, disposição em aterros sanitários, utilização de lagoas com largo tempo de detenção e aproveitamento em subprodutos da construção civil, como em materiais cerâmicos e para tijolos refratários, agente plastificador em cerâmica, produção de cimento, dentre outros.

Com relação à incorporação do lodo de ETA em materiais cerâmicos, pode-se apontar que esse setor possui alta capacidade e potencial para absorver novos materiais, principalmente resíduos industriais (ARAÚJO, 2008). Essa condição incentiva a pesquisa sobre a incorporação do lodo em matrizes cerâmicas de diversos tipos. Quanto aos metais presentes nos resíduos e lodos ficam

incorporados nas diferentes fases do produto cerâmico, não retornando para o meio ambiente (BASEGIO et al., 2001).

Os lodos de ETAs apresentam, muitas vezes, características físicas e químicas análogas às matérias primas utilizadas na fabricação de tijolos, que são as argilas naturais (MEGDA et al., 2005).

Diversos estudos analisaram a influência da incorporação do lodo de ETA em matriz cerâmica. Observa-se a predominância em pesquisar os efeitos dessa incorporação em matrizes de cerâmica vermelha, voltadas para a fabricação do tijolo cerâmico convencional.

Paixão et al. (2008) estudou as consequências de incorporar o lodo de ETA seco em massa argilosa vermelha, adicionando 0; 2; 5 e 10% do resíduo na mistura e queimando a 950, 1000 e 1050°C. A adição de lodo causou diminuição da resistência à flexão e redução de retração linear. Na mistura com 5% de lodo a resistência mecânica foi, aproximadamente, 35% menor que a mistura sem lodo.

Ainda no mesmo estudo o lodo foi calcinado a 1000°C por 3 horas e adicionado 5% na massa argilosa vermelha. Nessa situação houve redução de 22% da resistência mecânica, quando comparada a mistura sem lodo.

Apesar da redução das resistências mecânicas obtidas por Paixão et al. (2008), os resultados mostram-se satisfatórios, pois atendem a norma NBR 15270-1 de produção de tijolos cerâmicos.

Teixeira et al. (2006) caracterizaram o lodo quanto às propriedades físicas, químicas e mineralógicas e avaliou a incorporação dele em massa cerâmica para produção de tijolos. Concluíram que, no geral, a adição de lodo priora as propriedades da massa cerâmica, porém os valores obtidos permanecem dentro dos limites apontados pela NBR 15270-1 para a produção de tijolos cerâmicos. E apontaram a proporção de 10% de lodo em relação à massa cerâmica como a que apresentou os melhores resultados, em uma temperatura de queima acima de 950°C.

Oliveira e Holanda (2008) estudaram a influência da adição do lodo nas propriedades de microestrutura da cerâmica vermelha onde concluíram que a incorporação de até 15% em peso de resíduo de ETA não provoca variações significativas nas propriedades tecnológicas e pouco influência na microestrutura das peças.

Ramadan et al. (2008) estudaram a substituição da argila pelo lodo gerado pelas estações de tratamento de água do Egito na fabricação de tijolos e concluíram que há a possibilidade de se produzir tijolos com o lodo, pois esse é semelhante as argilas utilizadas na fabricação das peças, porém a temperatura de queima deve ser maior, quando comparada ao processo sem lodo. Apontaram também que há a necessidade de calcinação do lodo para a diminuição do material orgânico visando diminuir a perda ao fogo das peças.

Miara (2014) afirma que quando se incorpora lodo na argila como matéria-prima, há a aplicação de técnicas de destinação correta e reciclagem do resíduo, diminuindo a demanda por extração de recurso natural, nesse caso a argila.

A preferência em incorporar o lodo de ETA em massas para a fabricação do bloco cerâmico convencional é explicada pelos parâmetros tecnológicos que a norma NBR 15270-1 exige para o produto. A resistência mecânica de um bloco sem função estrutural é de, no mínimo, 1,5 MPa e há um amplo intervalo para a absorção de água onde o valor mínimo é de 8% e o máximo de 22%. Com isso, mesmo que a adição de lodo piore os parâmetros tecnológicos, ainda há, em grande parte dos estudos, o atendimento da norma.

Estudos semelhantes em diferentes regiões justificam-se pelo fato de que o lodo produzido varia de acordo com a localização da estação de tratamento de água, a qualidade da água bruta e com o coagulante utilizado e de que, a argila, por ser uma matéria-prima natural, tem composição variada em função da localização da jazida.

Scalizer et al. (2015) caracterizaram o resíduo de estação de tratamento de água buscando sua utilização em materiais de construção e concluíram que o alto teor de alumínio na composição do lodo gerado na ETA, colabora com o aumento da resistência do material cerâmico após a queima. Complementando, Teixeira et al. (2006) afirmam que a presença de alumina na argila aumenta a refratariedade do produto final.

Apesar do lodo de ETA conter altos teores de alumina, que potencializam a refratariedade de argilas, poucos estudos foram desenvolvidos com objetivo de caracterizar a incorporação desse resíduo em matrizes cerâmicas refratárias.

Ewais et al. (2017) produziram tijolos refratários isolantes com lodo da estação de tratamento de água central de El-Kureimat (Giz, Egito) e com cinza de casca de arroz, os quais foram queimados em diferentes temperaturas entre 800 e

1200 °C. Os mesmos concluíram que a utilização do lodo na produção de refratários é uma opção econômica e ambientalmente viável, onde o lodo pode ser utilizado em sua forma original, evitando tratamento adicional.

Em função do potencial refratário do lodo buscou-se a incorporação em matriz cerâmica refratária, visando diminuir a quantidade de matéria prima empregada no produto final.

Esse trabalho justifica-se ainda em função do artigo 12 da resolução SEMA n.º 021/2009, a qual dá prazo de 10 anos, a partir da data de publicação da resolução, para sistemas de tratamento de água com vazão superior a 30 L/s e inferior a 500 L/s, executarem unidades de tratamento e disposição final do lodo gerado durante o processo de potabilidade da água. A ETA fornecedora do lodo desse estudo, a qual possui vazão de tratamento de 94,5 L/s (GERVASONI, 2014) ainda não possui unidade de tratamento e disposição final do efluente, porém o projeto para implantação de um leito de secagem do lodo está pronto e deve ser executado até o fim do ano de 2019, quando finda o prazo dado pela resolução.

Escolheu-se estudar o comportamento do lodo de ETA em matrizes de argila refratária em função da limitação de disponibilidade desse material, pois jazidas de argila refratária são mais raras do que as de argila vermelha. O último Anuário Mineral Brasileiro data de 2010 e aponta que há no Brasil 2.003.547.578 toneladas de reservas lavráveis de argila comum enquanto de argila refratária há apenas 453.382.090 toneladas. O quadro 1 apresenta alguns dados desse Anuário Mineral Brasileiro.

		Reservas			
		Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
BRASIL	Argila comum (t)	4.435.694.879	1.583.805.615	1.076.805.613	2.003.547.578
	Argila refratária (t)	1.151.085.947	349.262.910	91.772.711	453.382.090
PARANÁ	Argila comum (t)	411.096.764	159.026.541	39.784.303	170.783.485
	Argila refratária (t)	12.509.916	2.987.533	6.918.046	5.903.456
LAPA-PR	Argila refratária (t)	1.641.746	-	-	1.302.750

Quadro 1: Disponibilidade de reservas de argila comum e de argila refratária no Brasil e no Paraná
Fonte: Anuário Mineral Brasileiro - 2010

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água nas propriedades da cerâmica refratária.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar o lodo gerado por uma estação de tratamento de água em ciclo completo, a qual utiliza coagulante a base de alumínio;
- b) Estabelecer a proporção ideal de adição de lodo de ETA nas matrizes de cerâmicas refratárias com base na absorção de água, retração linear, perda ao fogo e módulo de resistência;
- c) Determinar a influência da adição de lodo de ETA na refratariedade da cerâmica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRATAMENTO DE ÁGUA

O sistema de abastecimento de água é o conjunto de obras, equipamentos e serviços, que tem como objetivo promover o abastecimento de água potável para fins domésticos, industriais, entre outros (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

A água, abundante no planeta Terra, raras vezes encontra-se em condições adequada para o consumo humano. Diversas leis, portarias, resoluções, entre outras, vigentes, determinam os padrões de potabilidade da água para consumo, sendo que, atualmente, as Portarias do Ministério da Saúde 518/2004 e 2914/2011 são as que controlam a qualidade dentro das estações de tratamento de água convencionais.

Para atender esses padrões, após a captação, a água bruta é submetida a uma série de processos físico-químicos de tratamento (SANTOS, 2008). Sendo que o grau de tratamento e a tecnologia empregada é função direta da finalidade de uso, das características da água captada, do número de pessoas que serão abastecidas, dos recursos financeiros disponíveis e das facilidades de operações e manutenção (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O tratamento de água é a remoção de partículas coloidais e suspensas, microrganismos, matéria orgânica, e outras substâncias prejudiciais à saúde humana, que possam estar presentes nas águas naturais, aos menores custos de implantação, operação e manutenção, gerando assim um menor impacto ambiental (LIBÂNIO, 2010).

No Brasil, o processo mais recorrente de tratamento é o convencional ou completo, que engloba as etapas de peneiramento/gradeamento, aeração, coagulação química, floculação, decantação/flotação, filtração, desinfecção, fluoretação, correção do pH para enfim distribuir (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991). O tratamento completo é aplicado em função dos altos índices de turbidez e cor com presença de matérias coloidais na água bruta (TARTARI, 2008).

A denominação tratamento convencional, ou tratamento em ciclo completo, surgiu em 1890 no estado de Ohio (EUA), quando foi recomendada por George Fuller a etapa de clarificação precedendo a filtração para as águas turvas do rio

Ohio. A partir dos anos 80, O processo em que se aplica coagulante na unidade de mistura rápida, seguida de floculação, sedimentação e filtração, é denominado convencional (LIBÂNIO, 2010). A figura 1 a seguir demonstra o fluxograma de funcionamento de uma estação de tratamento de água em ciclo completo com tratamento convencional.

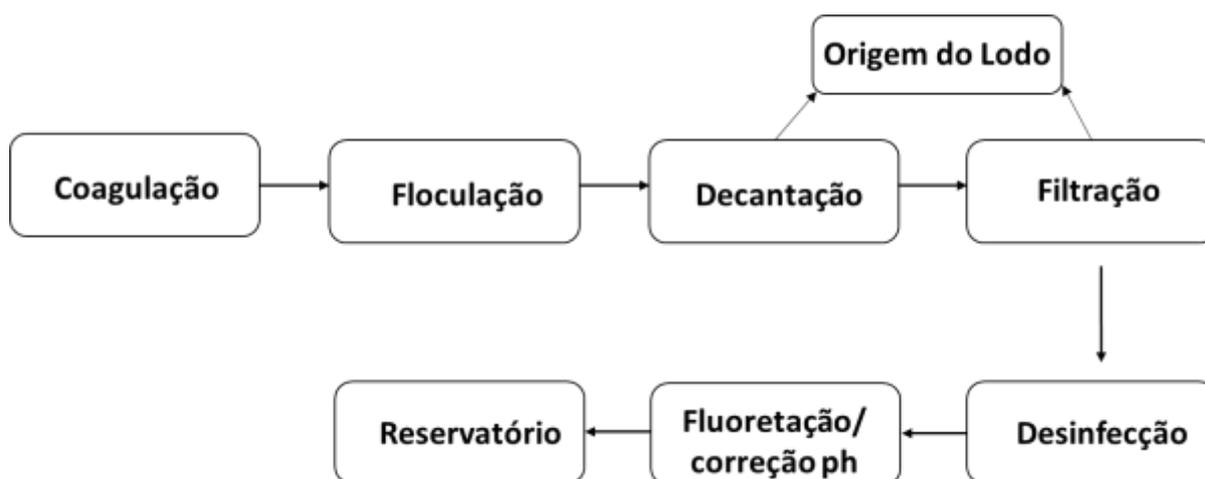


Figura 1: Fluxograma de funcionamento da ETA

O peneiramento ou gradeamento consiste na instalação de grades, de diferentes malhas, na entrada da adução da água bruta, com objetivo de separar o material grosseiro.

A aeração é o processo de injeção de oxigênio na água e remoção de substâncias voláteis e gases indesejáveis dissolvidos (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991). O método de aeração mais empregado é a queda de água em cascata, por períodos de variam de um a dois segundos (SANTOS, 2008). É empregada quando a água contém excesso de gás carbônico, ácido sulfídrico, ferro dissolvido facilmente oxidável e substâncias voláteis de origem vegetal, como por exemplo, águas subterrâneas e provenientes de partes profundas de grandes represas (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991). Águas oriundas de mananciais mais superficiais têm a dispensa da etapa de aeração.

Os termos coagulação e floculação são constantemente utilizados como sinônimos, apontando para a aglomeração de partículas (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991). Porém representam etapas diferentes dentro do processo de tratamento de água.

Pavanelli (2001) define a coagulação como a “desestabilização da dispersão coloidal, obtida por redução das forças de repulsão entre as partículas com cargas negativas”, por meio da adição de produto químico apropriado, conhecido como coagulantes, seguida por agitação rápida, para homogeneização da mistura.

Richter e Azevedo Neto (1991) simplificam afirmando é o processo de adição dos coagulantes à água bruta, reduzindo as forças que tendem a manter as partículas separadas. A água bruta possui impurezas e partículas coloidais com carga superficial negativa, o que impede a aproximação entre as mesmas, permanecendo no meio se suas características não forem alteradas (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). É um processo essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas (LIMA, 2010).

A coagulação é realizada nas unidades de mistura rápida, as quais podem ser hidráulicas ou mecanizadas, sendo a calha Parshall o dispositivo de mistura rápida hidráulica mais empregado nas ETAs do Brasil (DI BERNARDO, 2002). O objetivo é promover a dispersão do coagulante à água, a qual deve ser a mais homogênea e rápida possível (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991).

Os coagulantes mais utilizados nas estações de tratamento de água são sais à base de alumínio e ferro, como por exemplo, o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso e o PAC (Policloreto de Alumínio) que é um coagulante inorgânico, pré-polimerizado, o qual consegue uma formação de flocos em velocidade superior aos demais e com maior peso, em consequência disso à precipitação é mais rápida, mais eficiente e o consumo do coagulante é menor (TARTARI, 2008). O policloreto de alumínio tem a vantagem de trabalhar em uma faixa mais ampla de pH, quando comparado ao sulfato de alumínio (LOPES, 2011).

O uso de coagulantes inorgânicos apresenta a desvantagem de deixar residual no lodo gerado pelo processo de tratamento, sendo que a composição química do lodo é consequência direta do coagulante empregado na etapa de coagulação de água bruta.

Após a coagulação a próxima etapa é a floculação, a qual é definida por Richter e Azevedo Neto (1991) como a “aglomeração das partículas por efeito de transporte de fluido, de modo a formar partículas e maior tamanho que possam sedimentar por gravidade”. É um fenômeno físico e diretamente ligado à temperatura da água, as condições de intensidade e período de agitação impostos à água em tratamento (DI BERNARDO, 2002).

A floculação deve ocorrer com agitação relativamente lenta, para proporcionar o encontro entre as partículas e formar o floco. Na ETA são fornecidas condições para que as partículas, desestabilizadas na coagulação, formem o floco com tamanho e massa específica que proporcionem sua remoção por sedimentação (DI BERNARDO, 2002).

Em escala macroscópica, a floculação transforma as partículas coaguladas, de tamanho sub-microscópico em tamanhos visíveis, para que a remoção seja por ação, principal, da gravidade, na etapa de decantação (TARTARI, 2008).

A avaliação da eficiência dessa etapa é medida em função das características da água decantada, monitorando a turbidez e a cor aparente (LIBÂNIO, 2005).

As unidades de floculação podem ser hidráulicas ou mecanizadas. Em ambos os casos, geralmente, são empregados canais ou câmaras em série para que seja possível iniciar a floculação com gradiente de velocidade mais elevado e reduzir até o fim da operação (DI BERNARDO, 2002). Os floculadores hidráulicos são mais comuns nas estações de tratamento por apresentarem menor custo de implantação, operação e manutenção em relação aos mecanizados (LIMA, 2010).

A próxima etapa do tratamento em ciclo completo é a decantação, a qual é definida por Di Bernardo (2002) como o “fenômeno físico em que as partículas em suspensão apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade”. A decantação é a separação das fases sólidas e líquidas, em consequência há a clarificação da água.

A sedimentação ou decantação, com coagulação prévia, é um processo de clarificação empregado na grande maioria das ETAs, com o objetivo de reduzir a quantidade de sólidos na fase de filtração. Pois as partículas que não sedimentam, em função ou do pequeno peso ou da densidade próxima à da água, são removidas na fase de filtração (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991).

Os flocos depositam-se no fundo dos decantadores, unidades onde acontece a decantação, formando uma camada de lodo (MARGEM, 2008), a qual pode ser removida de forma contínua ou intermitente (RICHTER, 2001).

Os decantadores representam a primeira fonte mais importante de geração de lodo nas estações de tratamento, seguido da água de lavagem dos filtros (RICHTER, 2001).

Nos filtros acontece a finalização do processo de remoção de impurezas da água bruta, que é a filtração, a qual remove as partículas suspensas e coloidais e

microrganismos pelo escoamento em um meio granular (DI BERNARDO, 2002). A composição mais recorrente do meio granular filtrante é carvão antracito, areia e pedregulho (MARGEM, 2008).

Posteriormente a filtração, a água é conduzida para os reservatórios de contato, onde acontece a desinfecção com cloro ou ozônio (DELGADO, 2016). A desinfecção tem o objetivo de inativar organismos patogênicos (BABBITT *et al.*, 1976).

A desinfecção é utilizada, pois não é possível assegurar a remoção total dos microrganismos pelos processos físico-químicos anteriores. O cloro é o agente desinfetante mais empregado nas estações de tratamento devido a sua facilidade de aplicação, baixo custo, fácil disponibilidade, larga faixa de aplicação e, principalmente, por deixar um residual em solução de concentração facilmente determinável, que não apresenta risco ao ser humano (RICHTER e AZEVEDO NETO, 1991).

A fluoretação é a aplicação de compostos de flúor a água, objetivando a proteção do esmalte dos dentes da população (MARGEM, 2008). Não é uma etapa do tratamento de água propriamente, mas é uma recomendação do Ministério da Saúde, para auxiliar no combate à cárie dentária (DELGADO, 2016).

A correção do pH também, não é uma etapa do processo de clarificação da água. A correção do pH é necessária em função da acidez que o coagulante provoca na água, no início do tratamento (MARGEM, 2008). O pH é corrigido para próximo de 7,0, ficando o mais próximo possível da neutralidade, evitando a corrosão, quando o pH fica baixo e conseqüentemente ácido e o incrustamento quando o pH fica alto e conseqüentemente básico. Esta etapa finaliza o processo de tratamento de água em ciclo completo. Tratada, a água é levada aos reservatórios de distribuição e chega as redes para atender a população.

Segundo Cordeiro (2001) há no Brasil cerca de 7500 ETAs em ciclo completo, que utilizam as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, as quais geram rejeitos, lodos, nos decantadores e filtros e não possuem sistema de tratamento para esse efluente, sendo que, em muitos casos, o destino final do resíduo é o curso d' água mais próximo, o que agrava a situação ambiental.

O tratamento de água é de extrema importância para o saneamento básico urbano, gerando inúmeros benefícios sociais e econômicos, porém, como todo processo industrial, sua operação pode gerar impactos ao meio ambiente

(RICHTER, 2001). No caso específico do processo de tratamento da água bruta, o principal impacto é a produção do lodo que possui difícil destinação final. E durante muito tempo, esses impactos negativos, que envolve a geração do lodo, foram desconsiderados pelos gestores (GERVASONI, 2014).

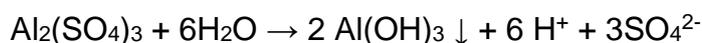
2.2 LODO

O lodo é o produto da coagulação da água bruta, e assim, tem em sua composição resquícios do produto utilizado neste processo. É o resíduo do tratamento, composto de água e sólidos suspensos (RICHTER, 2001).

Metais como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo, magnésio e, principalmente, alumínio estão presente no lodo gerado nas ETAs, e possuem ações tóxicas, o que dificulta a destinação final desse resíduo (BARROSO e CORDEIRO, 2001). Tsutiya e Hirata (2000), Megda et al. (2005) e Castilho, et al. (2011), afirmam que o lodo possui características semelhante a solos, contendo em sua composição argila, silte, areia, coagulantes e matéria orgânica removidas durante o tratamento.

Ainda em relação à composição do lodo, Portela et al. (2003) concluíram que os elementos predominantes são alumínio, sílica e ferro. O alumínio é o elemento em maior quantidade, o qual representa 22,8%, sílica representa 13,42% e ferro 7,98%, coincidindo com valores apresentados nas demais literaturas.

Richter (2011) afirma que as reações que ocorrem com a adição dos coagulantes a base de alumínio à água podem ser simplificadas como segue:



O mesmo autor exemplifica ainda que 1 mg/l de sulfato de alumínio comercial ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) contém 17% de Al_2O_3 formando 0,26 mg/l de hidróxido $\text{Al}(\text{OH})_3$.

As características do lodo também influenciam na disposição final, pois, conforme afirma Di Bernardo e Dantas (2005) essas características sofrem variação em função dos produtos utilizados no tratamento, do sistema de tratamento e da qualidade da água bruta.

Richter (2001) afirma que a destinação final do lodo é uma das tarefas mais difíceis para o serviço de tratamento de água, pois além dos custos de manuseio, envolve também os custos de transportes, disposição final e enfrenta diversas restrições ambientais.

A qualidade da água bruta, além de influenciar nas características do lodo, afeta diretamente a quantidade de lodo gerado. Água com índice maior de turbidez gera mais lodo. Sandoval et al. (1989) afirmam que nos sistemas mexicanos de tratamento o volume de lodo varia entre 0,3 a 1% da água tratada. Richter (2001) diz que esse volume médio, no Brasil, é de 0,2 a 5% do volume tratado. E Silva e Isaac (2002) apontam que cerca de 60 a 95% desse lodo é oriundo dos decantadores, sendo o restante proveniente da etapa de filtração.

Em sua pesquisa, Gervasoni (2014) afirma que a maioria dos sistemas de tratamento que descartam o lodo gerado em corpos de água. Os dados da última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, feita pelo IBGE em 2008, comprovam essa situação, e aponta que 74,4% do lodo gerado na região Sul do Brasil tem como destinação final os corpos de água e apenas 2,5% do lodo é encaminhado para reaproveitamento (fabricação de peças de cerâmica vermelha, agricultura como recompositor da camada superficial do solo).

A Lei Estadual n.º 12493/99 determina que o lodo deve ser minimizado, reutilizado ou então reciclado, proibindo o descarte em corpos d'água. Somasse a isso o artigo 12º da resolução SEMA n.º 021/2009, estabelecida pela Secretaria de Meio Ambiente, que exige e dá prazo para que as ETAs implantem sistemas de tratamento e disposição final dos efluentes líquidos gerados, incluindo os lodos.

A legislação dos Estados Unidos também considera o lodo de ETA como um resíduo industrial, e que sofre restrições legais, de acordo com a "National Pollutant Discharge Act" desde 1972 (RICHTER, 2001). Evidenciando assim que a globalização do problema gerado pelo lodo resultante do processo de tratamento de água. Megda et al. (2005) apontam que em diversas partes do mundo, o tratamento e a disposição dos lodos de ETA vêm sendo tratados como oportunidades de mercado, gerando redução de custos e impactos ambientais com a incorporação, estabilização e solidificação desse resíduo.

O lodo gerado apresenta alto índice de umidade, Portela et al. (2003) encontraram umidade média de 87% nas amostras estudadas mesmo após a centrifugação. Por isso, uma das primeiras medidas de tratamento é o desague desse lodo. Tsutiya e Hirata(2000) afirmam que o método empregado é função direta do teor e sólidos do lodo e, que de modo geral, há o processo natural e o mecânico para o desaguamento. O processo natural envolve leitões de secagem ou

lagos de lodo e o processo mecânico envolve o uso de filtro prensa ou centrifugas (TSUTIYA e HIRATA, 2000; RICHTER, 2001; WIECHETECK E CORDEIRO, 2002).

Após a redução do volume do lodo, com a retirada da água livre, a próxima etapa é a destinação final. Estudos de Tsutiya e Hirata (2000), Hoppen (2004), Megda et al. (2005), Paixão (2008), Gervasoni (2014), Delgado (2016), Ewais et al. (2017) dentre outros, apontam o potencial de incorporação desse lodo em peças cerâmicas, em função da semelhança da sua composição com as matérias primas empregadas na indústria de cerâmicas. Pois o lodo de ETA, quando seco, pode ser classificado como um resíduo sólido rico em argilominerais, silte e areia (OLIVEIRA et al., 2004).

A solidificação/estabilização é uma opção de tratamento para o lodo gerado pelas estações de tratamento. A solidificação é a técnica de encapsular resíduos perigosos em uma matriz sólida com grande integridade estrutural, enquanto a estabilização é a técnica que estabiliza resíduos perigosos e os transforma em materiais menos poluentes (PRIM, 1998; HEREK et al., 2005). Herek et al. (2005) afirmam ainda, que a argila é utilizada como matriz sólida em função de suas características de boa resistência mecânica, capacidade de suportar altas temperaturas e boa estabilidade.

Basegio et al. (2001) contribuem afirmando que a indústria de cerâmica vermelha tem destaque na incorporação de resíduos como matéria-prima, em função da heterogeneidade das massas argilas, constituídas de argilominerais e matérias não argilosos, com ampla variação mineralógica.

Herek et al. (2005) e Ramos et al. (2009) solidificaram e estabilizaram os metais (Al, Fe, Mn, Na, Pb, Cu, Cr e Zn) presente no lodo de indústria têxtil em matrizes cerâmicas com proporções de até 20% e 25%, respectivamente, de lodo em relação a massa seca de argila e concluíram que o processo permitiu que os metais ficassem encapsulados na matriz após a queima de 800°C a 850°C, possibilitando o uso do bloco cerâmico na construção civil, sem que haja riscos de contaminação durante o período de uso e descarte desse bloco.

Silveira et al., (2013) estudaram a disposição final do lodo de ETA em aterro sanitário, em relação a lixiviação dos metais pesados presentes no lodo desidratado e concluíram, após ensaio do lodo em colunas de lixiviação, que o lodo pode ser disposto como cobertura de células em aterros sanitários, pois os metais presentes

não foram disponibilizados quando em contato com a água, mesmo para a situação crítica ensaiada e por isso, não oferece risco de contaminação ao meio ambiente.

Mas em função das características química do lodo de ETA, o qual possui elevador teor de alumínio, em consequência do coagulante utilizado no tratamento, ele apresenta potencial refratário, podendo colaborar nas características e propriedades de transferência de calor de cerâmicas refratárias. Sendo assim, o lodo será incorporado e solidificado em matriz cerâmica refratária para avaliação dessas influências.

Além disso, a incorporação de resíduos na produção de materiais também pode reduzir o consumo de energia, reduzir a poluição gerada, e muitas vezes, a produção de materiais com melhores características técnicas (KAMINATA, 2008).

2.3 ARGILAS E MATERIAIS CERÂMICOS

Argila é uma rocha constituída, basicamente, por minerais argilosos e não argilosos, além de matéria orgânica e impurezas. É um material de origem natural, terroso com granulometria fina, que, quando umedecida adquire plasticidade, quando seca se torna rígida e consistente e quando submetida a queima, em temperaturas superiores a 800°C, adquire dureza (SANTOS, 1989; VIEIRA COELHO et al., 2007).

Santos (1989) afirma ainda que as argilas podem ser compostas de apenas um argilomineral ou da combinação de diversos. Argilominerais são silicatos de Al, Fe e Mg hidratados, que possuem estruturas cristalinas em camadas, podem ser chamados de “silicatos em camadas”.

Existem, cerca de, 40 argilominerais e quando proporcionam alguma propriedade peculiar ou muito específica, conferem a argila maior valor tecnológico, classificando-as como argilas industriais ou argilas especiais. Argilas industriais são aquelas utilizadas em grande escala pelas indústrias de processamento, como caulim, “ball clay” (argila plásticas empregada na indústria de cerâmica branca), argilas refratárias, bentonita, argila para fins de construção civil (produtos de cerâmica vermelha, e produção de cimento). Enquanto argilas especiais são aquelas comercialmente raras, que ocorrem em quantidades e localidades restritas e que possuem elevado valor agregado (VIEIRA COELHO et al., 2007).

Os argilominerais são os responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade (CANNON e WYNN, 1999; RIBEIRO et at, 2004; SCHIMITZ et al., 2004). A

plasticidade é a propriedade fundamental que permite a conformação das peças e possibilita o emprego de diferentes técnicas como extrusão e prensagem, permitindo a produção de peças de diversas formas geométricas e com resistência verde que permite o manuseio sem danos ao produto (MOTTA et al., 2001; ABAJO, 2000).

Argilas com granulometria fina possuem boa plasticidade, mas requerem maior quantidade de água no processo para conseguir desenvolver todo o potencial dessa plasticidade, sendo que isso pode prejudicar o processo produtivo. Como solução, mistura-se outras matérias-primas, normalmente, não plásticas, para corrigir a granulometria e conseqüentemente a plasticidade com menor consumo de água (PRACIDELLI e MELCHIADES,1997).

Além da plasticidade, características como o desenvolvimento de resistência mecânica adequada após a queima, a exigência de técnicas de processamento simples e por existirem grandes jazidas, proporcionam que as argilas sejam empregadas em diversos segmentos da indústria de produtos cerâmicos, como por exemplo, revestimentos, blocos e tijolos de cerâmica vermelha, cerâmicas brancas, refratárias entre outros, sendo a principal matéria-prima dessas indústrias (VIERA et al., 2000; MOTTA et al., 2001; ALVES, et al., 2004).

A indústria cerâmica tem a argila como a matéria-prima natural principal e predominante, mas os produtos finais resultam da mistura de mais insumos, matérias-primas beneficiadas, sintéticas ou de característica controlada, pois cada produto tem características específicas, que, por diversas vezes, não é possível atingir apenas com uma argila. Em função disso surge a necessidade de provas e estudos experimentais com essas argilas e demais matérias-primas (PRACIDELLI e MELCHIADES,1997; TARTARI, 2008;).

A complexidade envolvida nesses estudos exige que haja familiaridade com técnicas e métodos específicos de caracterização como a difração de raios X (DRX), a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a caracterização química do material, os ensaios de resistência, entre outras, pois caracterizar uma argila, com o objetivo de descrever seu potencial tecnológico, é conhecer a variabilidade de suas propriedades (SANTOS, 1989). O conhecimento da granulometria da matéria-prima também é requerido, pois ela interfere diretamente nas propriedades (PRACIDELLI e MELCHIADES,1997).

O processo produtivo das peças cerâmicas é caracterizado por possuir diversas etapas de produção, incluindo a preparação da matéria prima e da massa, conformação e processo térmico, que envolve a secagem e queima (DONDI, 2006).

A preparação da matéria prima envolve a redução granulométrica por forças mecânicas, o fracionamento granulométrico e a produção da mistura com adição de água ao processo. A etapa de conformação é quando as peças são formadas, sendo que cada produto exige uma conformação diferenciada, que pode ser por extrusão, moldagem ou prensagem (SANTOS, 1989).

O processamento térmico é de fundamental importância na fabricação do material cerâmico. O próprio termo “cerâmica”, que deriva do grego “keramikos”, que significa matéria-prima queimada já indica essa importância (CALLISTER, 2002).

Na etapa de processamento térmico são obtidas as transformações na estrutura e na composição, visando atingir as características desejadas dos produtos, como por exemplo, a resistência mecânica (SANTOS, 1989). Cada produto exige um processo térmico diferenciado. Tijolos, telhas, louça sanitária e de mesa exigem ciclos lentos de queima, enquanto cerâmicas para revestimento de pisos e paredes necessitam de um ciclo rápido de queima. Além disso, as temperaturas de queima são diferenciadas, produtos porosos exigem temperaturas de queima mais baixa que produtos compactos (SANTOS, 1989; DONDI, 2006).

Os produtos cerâmicos podem, ainda, ser divididos em cerâmicas tradicionais e cerâmicas avançadas. As tradicionais são resultantes de matérias-primas naturais como argila e areia, e temos os tijolos, telhas, porcelanas de louça como exemplo. Já as cerâmicas avançadas derivam de óxidos, nitretos e carbonetos de alta pureza, com composição definida, tamanho e forma das partículas bem controladas (PADILHA, 2000; CALLISTER, 2002).

Callister (2002) afirma ainda que a maioria dos materiais cerâmicos se enquadra no fluxograma de aplicação-classificação apresentado na figura 2.

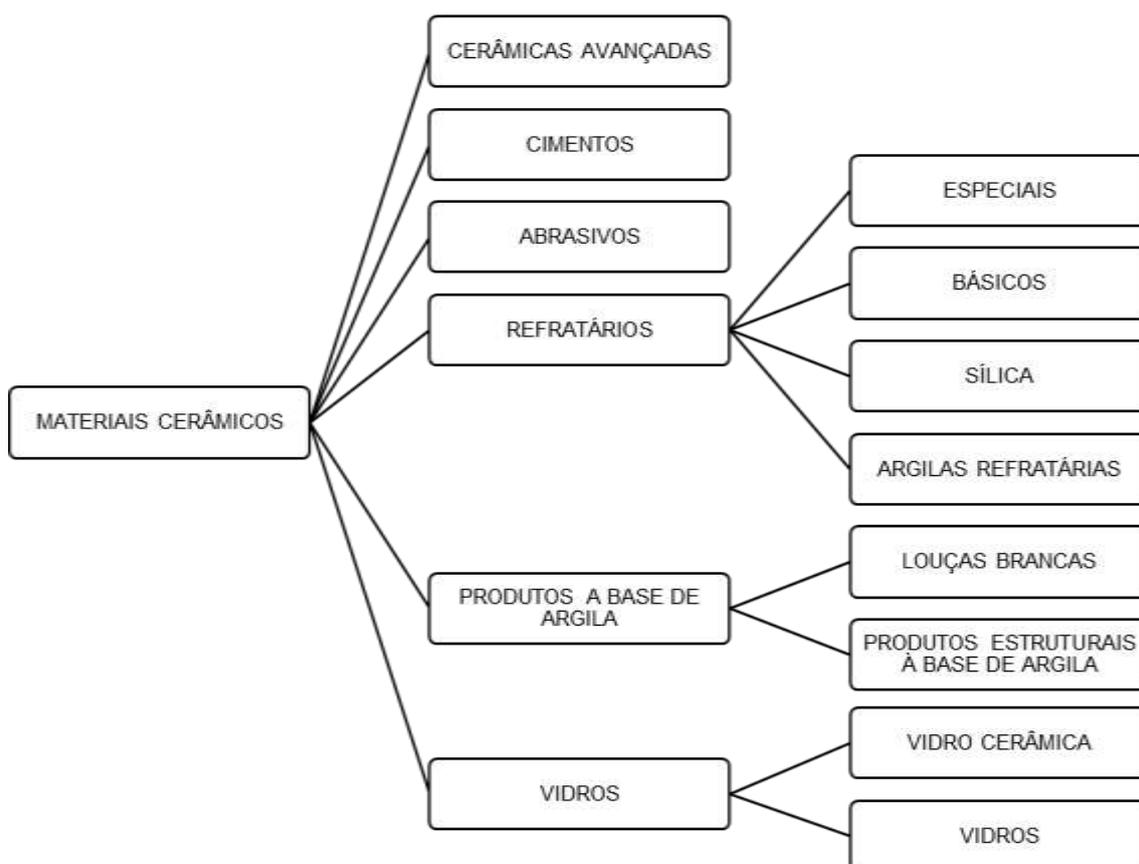


Figura 2: Fluxograma de aplicação-classificação dos materiais cerâmicos
 Fonte: Callister (2002)

A figura 2 mostra também que as cerâmicas refratárias representam uma classe com características distintas dentro dos materiais cerâmicos. Sadik et al. (2014) afirmam que as argilas refratárias são materiais consumíveis e são projetados e fabricados para que suas propriedades sejam apropriadas a determinadas aplicações.

2.4 CERÂMICA REFRATÁRIA

A principal matéria prima das cerâmicas com potencial refratário são as argilas refratárias, as quais, possuem alto índice de pureza, são predominantemente caulínicas, constituídas essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), possuem capacidade de resistir as altas temperaturas, fundem acima de 1450°C , podendo ou não possuírem plasticidade e apresentam baixo coeficiente de condutibilidade

(SANTOS, 1989; PETRUCCI, 2003; MARGEM, 2008). Além de manter as características de material inerte e não-reativo quando submetidos a ambientes agressivos (CALLISTER, 2002).

A NBR 8826/2014 define como refratário o material que pertence ao grupo dos materiais cerâmicos, que pode ser natural ou artificial, conformado ou não, geralmente não-metálico, que mantem a forma física e retém a identidade química quando submetido a elevadas temperaturas.

Em relação à forma física, os materiais refratários são classificados em conformados ou não conformados. Os conformados têm sua forma e dimensões definidas durante a fabricação, já os não conformados podem ser moldados no local de aplicação, e tem sua forma definida nesse momento (NBR 10237/2001; PEREIRA, 2016). A figura 3 apresenta um resumo das formas apontadas na NBR 10237.

Grupo	Classe	
Conformados	Formatos padronizados	Arco
		Cunha
		Paralelos
		Radiais
	Formatos especiais	
Não conformados	Argamassas	
	Concretos densos e isolantes	
	Massas de socar	
	Massas plásticas	
	Massas de projeção	
	Massas granuladas secas	

Figura 3: Classificação quanto a forma
Fonte: ABNT – NBR 10237/2011

Porém, a forma mais comum são os tijolos para aplicações em revestimento de fornos de beneficiamento de metais, da fabricação de vidros e para os tratamentos térmicos metalúrgicos (CALLISTER, 2002). A técnica de conformação desses tijolos é por prensagem uniaxial (PETRUCCI, 2003).

As composições e misturas de matérias-primas são feitas para atingir o desempenho desejado. A porosidade e a resistência mecânica são parâmetros importantes que influenciam nesse desempenho e dependem do comportamento

individual de queima das fases e das interações entre essas fases em alta temperatura (SADIK et al., 2014). A composição química da matéria-prima também tem forte influência no desempenho do produto final.

A porosidade é uma variável microestrutural que deve ser controlada para que se produza um tijolo adequado e, varia em função da utilização do produto final, pois quanto maior a porosidade, melhores são as condições de isolamento térmico e resistência aos choques térmicos, porém a resistência e capacidade de suportar cargas e ao ataque por materiais corrosivos diminuem com o aumento da porosidade (CALLISTER, 2002; PETRUCCI, 2003).

Em relação à composição química, há diferentes classificações. Petrucci, (2003) e Pereira (2016) classificam os refratários em ácidos, básicos e neutros. Já Callister (2002) classifica em argila refratária, refratários de sílica, refratários básicos e refratários especiais. Sendo que as definições e enquadramento são semelhantes, porém com nomes distintos.

Os refratários de argila têm como matéria-prima argilas refratárias de alta pureza com mistura de alumina e sílica. Esses tijolos refratários são empregados na construção de fornos para confinar atmosferas quentes e para isolar termicamente elementos estruturais. Nessas peças a resistência mecânica não é o foco, pois não receberão cargas estruturais, porém a estabilidade física da forma e um índice de porosidade maior são requeridos (CALLISTER, 2002).

Os refratários a base de sílica têm como principal componente a sílica e são conhecidos como refratários ácidos e por possuírem capacidade de suportar cargas em temperaturas elevadas, por isso são empregados, principalmente, em tetos de fornos em arco para fabricação de aços e vidros. Possuem de 50% a 70% de SiO_2 , de 20% a 40% de Al_2O_3 e cerca de 10% de fundentes (ABAJO, 2000; CALLISTER, 2002; PETRUCCI, 2003; DUARTE, 2005; SADIK et al., 2014).

Segundo os mesmos autores os refratários básicos são aqueles que possuem mais de 50% de Al_2O_3 ou os ricos em magnésio (MgO). São resistentes ao ataque por escórias e são empregados em fornos de soleira aberta para fabricação de aços. E os refratários especiais que são óxidos com purezas elevadas que geram produtos com baixa porosidade e são empregados em elementos de aquecimento por resistência elétrica como cadinhos e componentes internos de fornos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais, os métodos e os procedimentos experimentais utilizados para a concretização desse estudo e para que os objetivos propostos fossem atingidos. A figura 4 a seguir apresenta o fluxograma da metodologia que foi desenvolvida.

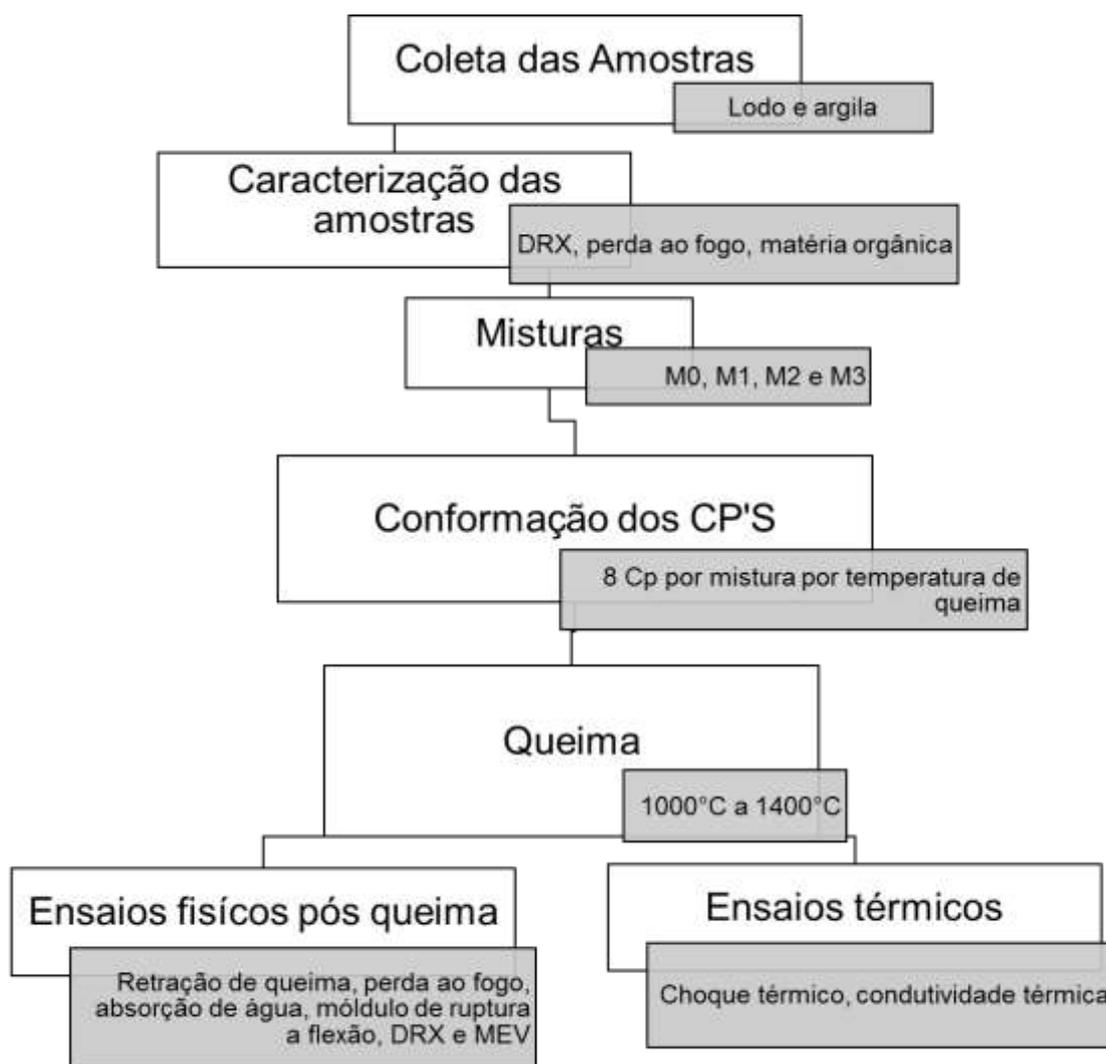


Figura 4: Fluxograma da metodologia

A argila foi coletada na cidade da Lapa, no estado do Paraná, na data de 17 de abril de 2018, diretamente no depósito da indústria fornecedora da amostra. Essa argila foi escolhida por apresentar características refratárias e por já ser utilizada como matéria prima base de tijolos refratários. A figura 5 mostra a argila logo após a coleta.



Figura 5: Argila Coletada

Após coletada a argila foi seca do ar, destorroada, homogeneizada e quarteada, após separou-se uma porção para a execução dos ensaios, a qual foi seca em estufa a 100°C por 24 horas, moída em moinho de bolas e peneirada em malha de abertura de 600 μm , considerando o material passante como a amostra a ser estudada.

A figura 6 mostra a argila seca e a figura 7 mostra a argila após a moagem e peneiramento.



Figura 6: Argila seca a 100°C



Figura 7: Argila moída e peneirada

Uma pequena quantidade da amostra foi peneirada em malha 150 μm para a caracterização mineralógica por difração de raios X (DRX) com o objetivo de conhecer as fases presentes na argila coletada, gerando o difratograma a seguir, que é apresentado na figura 8.

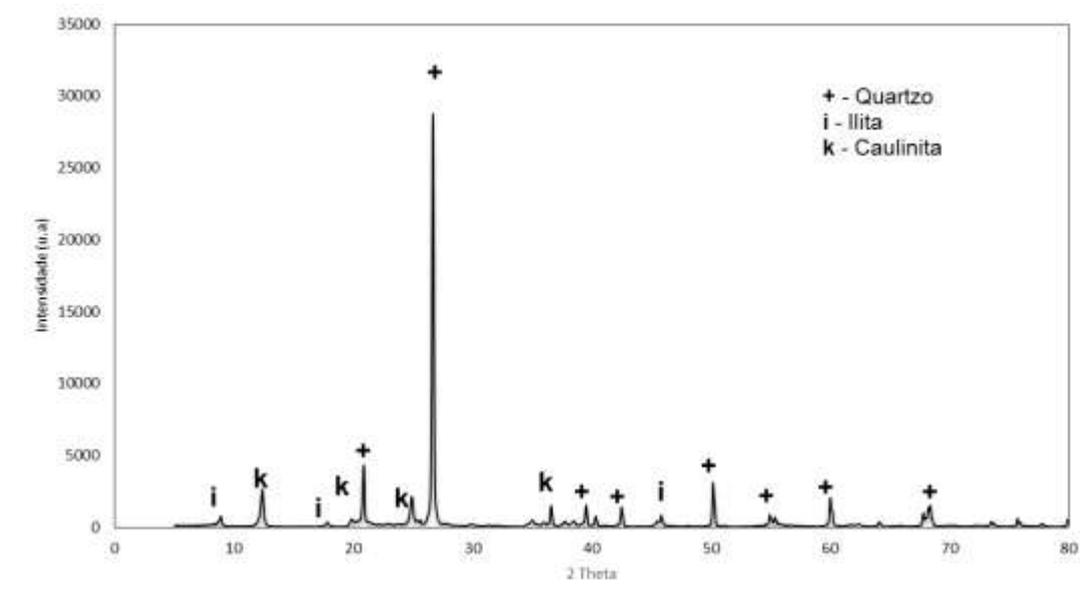


Figura 8: Difratoograma de raio X da argila

A argila possui pico predominante de quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Segundo Abajo (2000) a caulinita é o mineral responsável pelo

desenvolvimento da plasticidade da argila em mistura com água e apresenta um maior tamanho de partícula em comparação com outras classes de argilominerais. A presença predominante de caulinita aponta o potencial refratário dessa argila, pois tem a alumina associada à presença desse mineral.

O quadro a seguir apresenta a caracterização da argila coletada.

	Matéria Orgânica (%)	Perda ao fogo (%)
Argila	1,13	2,00

Quadro 2: Caracterização da argila

A argila possui baixa concentração de matéria orgânica, 1,13% e baixa perda ao fogo, 2,00% que é devido à combustão de materiais orgânicos e também a decomposição de minerais argilosos.

A escolha da Estação de Tratamento de Água para a coleta do lodo baseou-se nos seguintes critérios:

- a) Ciclo completo de tratamento de água;
- b) Utilização de coagulantes metálico a base de alumínio;
- c) Proximidade geográfica;
- d) Não possuir sistema de coleta, tratamento e disposição final do lodo gerado;

A figura 9 mostra a localização da cidade de Marmeleiro no Estado do Paraná e a localização da ETA fornecedora do lodo estudado.

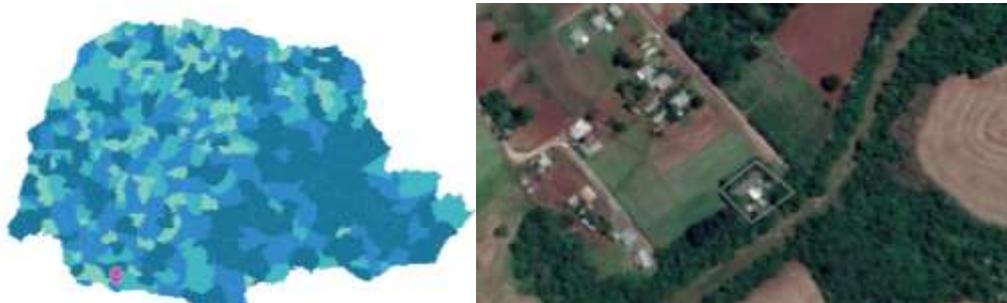


Figura 9: Localização da cidade de Marmeleiro no Estado do Paraná e localização da ETA escolhida
Fonte: IBGE e Google maps 2018

A ETA escolhida fica na cidade de Marmeleiro, na região sudoeste do Paraná. Utiliza coagulação hidráulica, com aplicação direta na calha Parshall,

utilizando o coagulante PAC (PoliCloroeto e Alumínio). A floculação é mecânica, rotineiramente sem utilização de auxiliar de floculação, a decantação é por placas, com filtração descendente, desinfecção no tanque de contato com uso de cloro gasoso.

Gervasoni (2014) levantou em seu estudo que a ETA Marmeleiro produz 70 m³ de lodo por mês, com vazão de tratamento de água bruta de 94,2 L/s. A ETA Iguaçú, uma das estações da cidade de Curitiba possui vazão de tratamento de 2650,0 L/s com geração de 1800 m³ de lodo por mês e faz o deságue desse lodo com uso de prensa parafuso. O volume de água bruta tratada na estação em estudo permaneceu estável após o período avaliado por Gervasoni (2014).

Na ETA Marmeleiro a remoção do lodo acontece uma vez por semana, aos domingos pela manhã. A remoção é feita através da abertura da tubulação de descarga de fundo, aonde os decantadores são esvaziados e ao fim do processo o lodo, acumulado no fundo, é lançado para fora dos decantadores, e, como afirma Gervasoni (2014), é lançado do curso d'água.

O lodo foi coletado nos meses de abril e maio de 2018, diretamente na descarga de fundo dos decantadores, a qual era aberta para a limpeza dos filtros e decantadores. Após a saída de toda a água decantada, o lodo era coletado e armazenado em baldes plásticos com tampa. Foram 3 coletas, com aproximadamente 100 litros de lodo úmido por coleta, as quais foram homogeneizadas formando a amostra de lodo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Em cada coleta de lodo in natura separou-se, em um recipiente plástico, amostra para determinação do teor de umidade do lodo coletado. Esse ensaio foi executado em duplicata, seguindo os procedimentos da DNER-ME 213/94.

Para o deságue do lodo e retirada da água livre, foi produzido um leito de drenagem e secagem, conforme o proposto por Silveira et al. (2015). Utilizou-se um recipiente plástico retangular de 60x40 cm com 18 cm de altura, o qual teve seu fundo perfurado para saída da água drenada. Executou-se, ao fundo, uma camada drenante em brita ¾" de aproximadamente 8 cm de altura na qual apoiou-se a manta

geotêxtil que recebeu o lodo. A figura 10 mostra o lodo no leito de secagem e após 1 hora de desague.

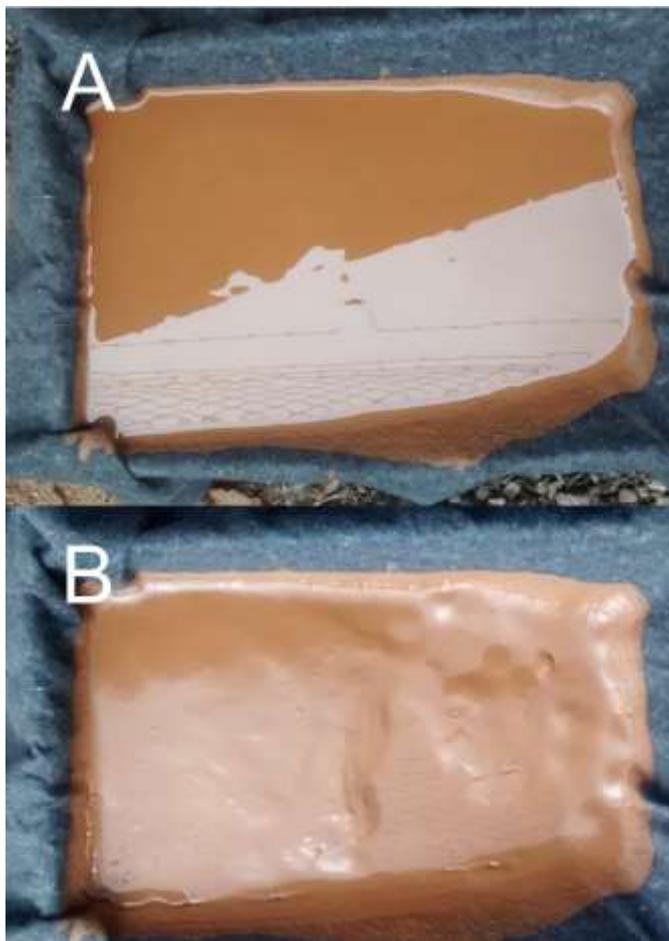


Figura 10: a) Lodo recém lançado no leito de secagem b) lodo após uma hora de desague

A figura 11 mostra o lodo após 24 horas de desague e a figura 12 mostra o lodo após esse desague e seco ao ar.



Figura 11: Lodo após o desague



Figura 12: Lodo após o desague e seco ao ar

Após o desague (aproximadamente 24 horas) o lodo era transferido para um recipiente plástico, para secagem em estufa a 100°C até constância da massa. Seco o lodo foi destorroado, homogeneizado, quarteado e moído, em moinho de bolas, até passagem pela peneira de malha 600 μm . A homogeneização foi realizada com todo o lodo seco em recipiente plástico, garantindo assim uma amostra mais

representativa do material coletado. A figura 13 a seguir mostra o lodo após a moagem e peneiramento.



Figura 13: Lodo após moagem e peneiramento

A caracterização do lodo de ETA foi feita utilizando os ensaios de difração de raios X (DRX) para identificação das fases presentes no material, queima a 600°C para quantificação da matéria orgânica e posterior queima a 1000°C para determinação da perda ao fogo após o material ser submetido a temperatura de queima.

Para a difração de raios X (DRX) a amostra foi peneirada na malha 150 μm para utilização da técnica de caracterização do pó, intervalo de leitura de 5° a 80° (2 θ), passo de 0,02° com tempo de 0,4 segundos para cada passo. As fases cristalinas foram identificadas com base na biblioteca do software e por comparação na literatura que podem ser observadas no difratograma a seguir, na figura 14.

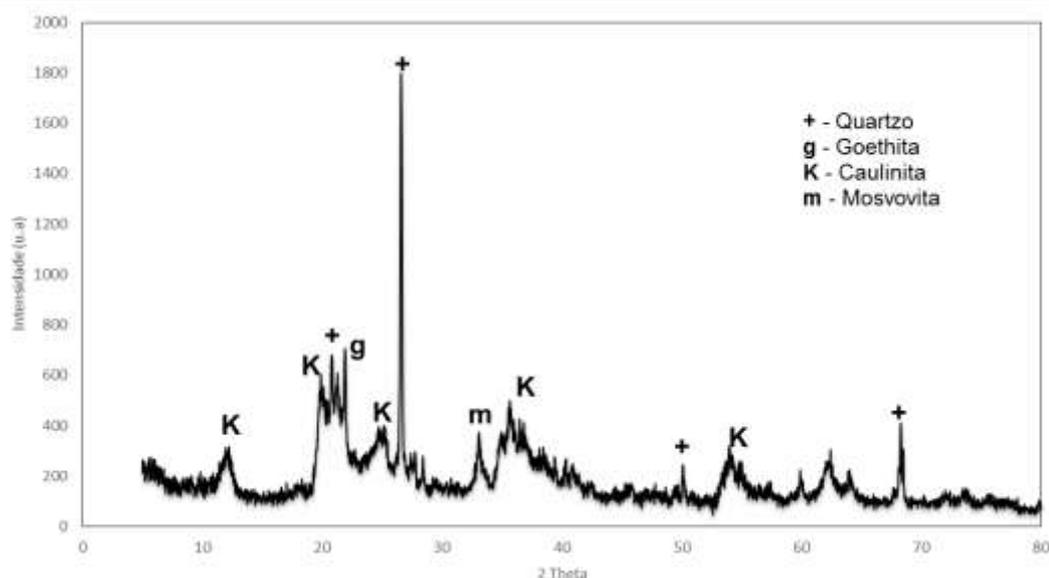


Figura 14: Difratoograma de raio X do lodo

O lodo apresenta fases majoritárias de quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Comprovando assim a semelhança do lodo com as argilas por possui minerais que predominantes das argilas.

Para determinação da porcentagem de matéria orgânica (MO) presente no lodo, foi levada uma amostra ao forno à temperatura de 600°C por 4 horas, com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, a qual foi pesada antes e depois do procedimento, conforme apontado por Tartari (2008). Utilizando a equação 3.1, foi calculada a quantidade em percentual de MO, onde P_i é o peso inicial da amostra e P_f é o peso final da amostra após o aquecimento.

$$MO = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (3.1)$$

A perda ao fogo (PF) foi determinada com a queima de 0°C à 1000°C em forno com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. E obtida com a diferença de massa entre as amostras iniciais e finais do processo, aplicada na equação 3.2.

$$PF = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (3.2)$$

O quadro a seguir apresenta a caracterização do lodo coletado.

	Umidade (%)	Matéria Orgânica (%)	Perda ao fogo (%)
Lodo	99,16	6,47	8,17

Quadro 3: Caracterização do lodo

O lodo apresenta alto índice de umidade, 99,16%, por isso é necessário o desague antes da sua utilização, sendo esse índice semelhante aos apresentados na literatura. Portela et al. (2003) utilizaram lodo umidade média de 87,5% mesmo após a centrifugação desse lodo dentro do processo de tratamento de água.

3.2 DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO IDEAL DE LODO DE ETA NAS MATRIZES CERÂMICAS REFRAATÓRIAS

A incorporação do lodo seco nas matrizes cerâmicas se deu em proporções de 0%, 5%, 10% e 15%. Essas proporções foram escolhidas com base na literatura estudada e em função das conclusões de Teixeira et al. (2006) que compararam incorporação de lodo de ETA a base de alumínio e a base de ferro, e apontaram que é possível incorporar até 10% de lodo a base de alumínio, sem prejuízo para as propriedades físicas do tijolo cerâmico. O quadro 4 apresenta o plano de misturas com as proporções de cada matéria prima.

Misturas	% lodo	% argila
M0	0	100
M1	5	95
M2	10	90
M3	15	85

Quadro 4: Plano de misturas

A figura 15 a seguir mostra a mistura M2 com 10% de argila e 90% de lodo.



Figura 15: Mistura M2

Após as formulações prontas foi adicionado 8% de água em cada mistura como agente plastificante entre as partículas dos argilominerais e foram armazenadas por 24 horas, em potes hermeticamente fechados para melhor distribuição da umidade por toda a massa formulada.

Posteriormente foi feita a conformação dos corpos de prova. Para cada mistura foram conformados 40 corpos de prova por prensagem uniaxial, totalizando 200 corpos de prova. Foi utilizado um molde de dimensões de 20 cm de comprimento por 2 cm de largura e 50 gramas de cada mistura. A conformação foi feita em uma prensa hidráulica da marca BOVENAU de classe B, com dois estágios de prensagem, um com pressão média de 50 kgf/cm² para ajuste do pó dentro do molde e o segundo estágio com pressão de 100 kgf/cm² para compactação da amostra, conforme metodologia apresentada por Praxedes (2013). Ao fim desse processo os corpos de prova foram identificados, pesados e medidos. A figura 16 a seguir apresenta os corpos de prova logo após a conformação.



Figura 16: Corpos de prova conformados

A queima aconteceu em um forno elétrico do tipo mufla, marca Jung, figura 17, com rampa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, patamar de 120 min na temperatura de queima. As temperaturas de queima foram de 1000°C , 1100°C , 1200°C , 1300°C e 1400°C . Em cada temperatura foram queimados 8 corpos de prova de cada mistura. Antes da queima os corpos de prova ficaram em estufa por 24 horas a 100°C e após a queima foram medidos e pesados. O quadro 5 apresenta a quantidade de corpos de prova que foram queimados, para cada mistura

	1000°C	1100°C	1200°C	1300°C	1400°C	Total
M0	8	8	8	8	8	40
M1	8	8	8	8	8	40
M2	8	8	8	8	8	40
M3	8	8	8	8	8	40
Total	32	32	32	32	32	160

Quadro 5: Número de corpos de prova de cada mistura para cada temperatura de queima



Figura 17: Forno Mufla marca Jung

Com as medidas e pesos antes e após a queima, foram determinadas as características físicas: densidade a úmido, seca e queimada; retração linear de secagem e de queima; perda ao fogo; absorção de água e módulo de ruptura a flexão.

Para avaliar a retração de secagem, foram utilizadas as medições do corpo de prova verde (logo após a conformação) (L_v), as medições após a secagem em estufa a 100°C (L_s) e a equação 3.3.

$$RLS = \frac{(L_v - L_s)}{L_s} * 100 \quad (3.3)$$

E para avaliar a retração após a queima foram utilizadas as medições feitas após a secagem em estufa a 100°C (L_s), as medições após a queima (L_q) e a equação 3.4.

$$RLq = \frac{(L_s - L_q)}{L_q} * 100 \quad (3.4)$$

A perda ao fogo foi determinada em função da perda de massa do corpo de prova queimado (m_q) em relação à massa do corpo de prova seco em estufa a 100°C (m_s) e com a equação 3.5.

$$PF = \frac{m_s - m_q}{m_s} * 100 \quad (3.5)$$

Após o resfriamento do processo de queima os corpos de provas passaram por novas aferições de massa (m_q) e dimensões para posteriormente serem imersos em água, em temperatura ambiente, por 48 horas, para determinação da absorção de água (AA). Quando retirados da imersão, os corpos de provas foram secos superficialmente e pesados (m_u), e com a equação 3.6 foi determinada a absorção de água de cada mistura em diferentes temperaturas de queima.

$$AA = \frac{(m_u - m_q)}{m_q} * 100 \quad (3.6)$$

Para determinação do módulo de ruptura de flexão foi utilizada uma máquina universal de ensaios, onde os corpos de prova foram colocados sobre dois apoios distanciados 100 mm entre si e foi aplicada uma força com velocidade de 1mm/min. A carga de ruptura foi incluída na equação 3.7 a qual forneceu o módulo de ruptura a flexão.

$$MRF = \frac{3 * P * L}{2 * b * h^2} \quad (3.7)$$

Onde P representa a carga máxima de que ocasionou a ruptura, em N; L é a distância entre os apoios do corpo de prova, em mm; b é a largura do corpo de prova, em mm e h é a espessura média do corpo de prova, em mm. A figura 18 mostra o esquema do ensaio.



Figura 188: Corpo de prova durante a execução do ensaio

Os pares de resultados, mistura e temperatura de queima, que apresentaram os melhores resultados foram submetidos aos ensaios de difração de raios x (DRX) para identificação das fases formadas e alteradas durante a incorporação do resíduo na argila e, de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para visualização da interação do lodo com a matriz cerâmica.

3.3 DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE LODO DE ETA NA REFRATARIEDADE DA CERÂMICA

Para determinação da adição de lodo na refratariedade da argila foram realizados os ensaios de condutividade térmica e de resistência ao choque térmico.

A condutividade térmica retrata a habilidade de o material conduzir energia térmica. Essa propriedade foi ensaiada porque é papel do material refratário retardar a transferência de calor minimizando as perdas desse calor para o ambiente.

A avaliação da condutividade térmica seguiu a metodologia apresentada por Wolf (2015) onde os corpos de prova foram deixados em contato com uma superfície plana aquecida, utilizando um agitador magnético com aquecimento, e foi cronometrado o tempo que a parte superior dos corpos de prova atingiam a mesma temperatura da chapa que era de 100°C. Para esse ensaio utilizou-se uma câmera térmica da SYSTEMS termoCAM, modelo FLIR T360.

A resistência do choque térmico foi determinada por meio de ciclos têmpera, onde o material foi aquecido e resfriado rapidamente em água. Suwak et al. (2013) apontam que nos processos de metalurgia, a degradação por choque térmico representa 20% das ocorrências.

Os pares de valores de mistura e temperatura que obtiveram melhor desempenho nos ensaios físicos foram submetidos ao ensaio de choque térmico, onde 3 corpos de prova das misturas M0, M1 e M2, queimados a 1200°C e 1300°C com rampa de aquecimento de 10°C/min, patamar de 120 min na temperatura de queima, seguindo o método aplicado por Sobroza (2014) e Nunes (2017). Após a queima e resfriamento a temperatura ambiente, os corpos de prova foram, novamente, aquecidos até a temperatura de 1000°C, onde permaneceram por 10 minutos, após foram retirados do forno e lançados em um tanque com água por 5 minutos. Em seguida foram removidos do tanque, ficaram em temperatura ambiente por mais 5 minutos e retornaram ao forno para novo ciclo. O procedimento foi repetido até que os corpos de prova se partiram

A resistência ao choque térmico foi calculada pela equação 3.9:

$$RCT = \frac{A}{B} \quad (3.9)$$

Onde RCT é a Resistencia ao choque térmico; A é o número de ciclos para o aparecimento da primeira trinca e B é o número de ciclos para a ruptura total da amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados e as análises referentes aos ensaios realizados.

4.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

4.1.1 Densidade

Os quadros 6 e 7 a seguir apresentam os resultados de densidade.

Mistura	Densidade verde (g/cm ³)	Densidade seca (g/cm ³)
M0	2,03	1,88
M1	2,02	1,87
M2	1,99	1,85
M3	1,97	1,81

Quadro 6: Densidade verde e seca dos corpos de prova

	Densidade queimada (g/cm ³)							
	M0	Desvio padrão	M1	Desvio padrão	M2	Desvio padrão	M3	Desvio padrão
1000 °C	1,82	0,014	1,77	0,014	1,72	0,008	1,69	0,010
1100 °C	1,81	0,020	1,77	0,020	1,74	0,020	1,71	0,007
1200 °C	2,06	0,015	2,00	0,010	1,97	0,013	1,94	0,017
1300 °C	2,13	0,020	2,08	0,019	2,04	0,010	2,01	0,031
1400 °C	2,10	0,025	2,09	0,014	2,04	0,025	2,02	0,019

Quadro 7: Densidade queimada dos corpos de prova

A adição de lodo na matriz cerâmica provoca queda na densidade aparente. O maior volume do corpo de prova demonstra que o empacotamento dos grãos é prejudicado com a adição de lodo, deixando maior concentração de vazios dentro da matriz. Com isso, há menor grau de compacidade e maior permeabilidade.

Para as temperaturas de queima de 1000°C e 1100°C a densidade queimada é menor do que a densidade seca dos corpos de prova, pois nessa faixa de temperatura há a perda de massa (matéria orgânica e sólidos voláteis) sem a formação de fase vítrea.

Na temperatura de queima de 1200°C para as misturas M0 e M1 e de 1300°C para M2 e M3 a densidade queimada fica maior que a densidade seca, pois há a transformação das matérias-primas não plásticas em fase vítrea, ocupando os poros antes ocupados pelo ar, diminuindo assim a permeabilidade e aumentando a compacidade da amostra. Quanto maior a temperatura de queima, maior será a formação de fase vítrea.

Segundo Kalapathy, Proctor e Shultz (2003) a densidade aparente reflete em importantes propriedades nas matrizes cerâmicas refratárias. Quanto maior a densidade aparente maior é a resistência mecânica, sendo um ponto positivo para a matriz, porém é maior também a condutividade térmica, que é um ponto negativo em matrizes cerâmicas refratárias.

4.1.2 Retração Linear

O quadro a seguir apresenta os dados referente a retração linear.

Mistura	Retração de secagem (%)	Retração de queima (%)		Desvio padrão
M0	-0,07	1000°C	0,06	0,04
		1100°C	0,70	0,19
		1200°C	4,65	0,08
		1300°C	6,26	0,12
		1400°C	6,71	0,09
M1	-0,05	1000°C	0,01	0,08
		1100°C	0,97	0,07
		1200°C	4,70	0,04
		1300°C	6,10	0,05
		1400°C	6,51	0,13
M2	0,01	1000°C	0,01	0,13
		1100°C	0,38	0,35
		1200°C	5,02	0,07
		1300°C	6,46	0,07
		1400°C	6,55	0,19
M3	0,02	1000°C	0,01	0,14
		1100°C	0,65	0,14
		1200°C	5,14	0,07
		1300°C	6,47	0,22
		1400°C	7,02	0,17

Quadro 8: Retração linear de secagem e queima dos corpos de prova

A retração dos corpos de prova após secagem a 100°C em estufa, em todas as misturas, foi baixa, ficando próxima de 0,0%. Nas misturas M0 e M1 a retração assumiu valor negativo, o que é entendido como um erro sistemático na operação de

medição e não uma expansão da peça. As medições foram executadas em triplicata na peça verde e na peça seca, em todas os corpos de prova.

Nas misturas M2 e M3 a retração de secagem foi de 0,01% e 0,02%, valores próximos a 0,0%, demonstrando que as peças não sofrem desestabilização dimensional com a secagem.

O comportamento foi semelhante com a retração de queima a temperatura de 1000°C, onde todas as misturas apresentaram retração menor que 0,06% do comprimento da peça seca. Essa retração linear próxima de 0,0% indica o potencial refratário do material. Com o aumento da temperatura de queima para 1100°C a retração linear fica abaixo de 1%, comprovando o potencial refratário onde o aumento de 100°C na temperatura de queima não causa desestabilização dimensional da peça.

O gráfico 1 a seguir apresenta as retrações lineares de queima de cada mistura.

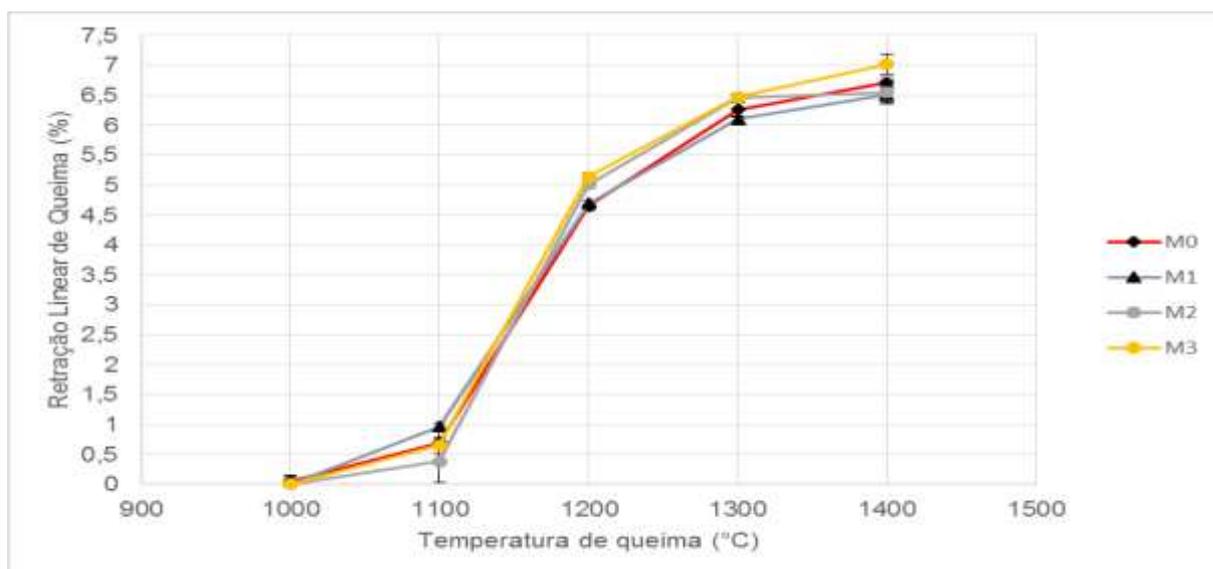


Gráfico 1: Retração Linear de Queima

Conforme houve o aumento de temperatura de queima houve o aumento direto da retração linear, sendo esse o comportamento esperado dos materiais cerâmicos.

O aumento da quantidade de lodo em cada mistura não provocou alteração significativa na retração linear. A 1200°C a retração linear para a mistura sem lodo foi de 6,25% e na mistura M3, com 15% de lodo de 6,47%, aumento de 0,22% em

relação a mistura sem lodo. E na temperatura de 1400°C houve aumento de 0,32% na retração linear da mistura M3 em relação a mistura M0.

4.1.3 Perda ao fogo

O gráfico 2 mostra o comportamento da perda ao fogo de cada mistura em relação às diferentes temperaturas de queima.

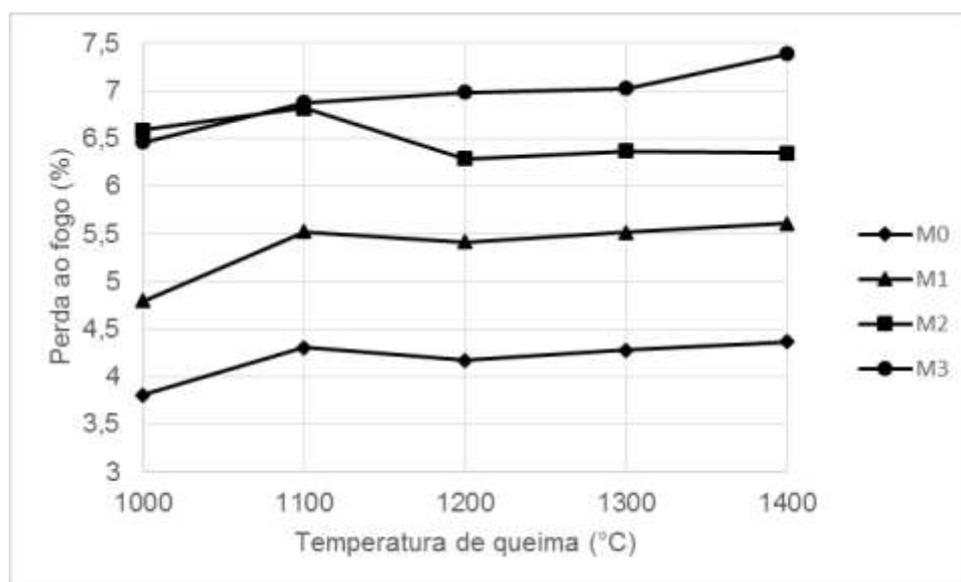


Gráfico 2: Perda ao fogo

O aumento da porcentagem de lodo nas misturas provocou o aumento da perda ao fogo, por possuir maior quantidade de matéria orgânica a ser queimada nas misturas.

A temperatura de 1100°C nas misturas M0, M1 e M2 apresentou maior perda ao fogo do que nas demais temperaturas, em função da não formação de fase vítrea nessa faixa de temperatura. As temperaturas maiores apesar de possuírem eliminação da matéria orgânica e dos sólidos voláteis apresentaram formação de fase vítrea o que diminuiu a perda de massa durante a queima.

A mistura M3, com 15% de lodo, apresentou, em todas as temperaturas, perda ao fogo acima de 6,4% em relação a mistura M0 com 0% de lodo. Isso torna a incorporação de 15% de lodo inviável, pois há uma grande perda de massa de matriz cerâmica durante a queima, em consequência, inviabiliza o processo.

4.1.4 Absorção de Água

A curva de gresificação é a representação gráfica simultânea das variações da absorção de água e da retração linear de queima da peça com a temperatura de queima. Sendo assim, quando definida a faixa de absorção desejada utilizasse a curva para determinar a retração da peça e em qual temperatura é atingida tal característica (MELCHIADES et al., 1996).

Os gráficos a seguir apresentam as curvas de gresificação de cada mistura.

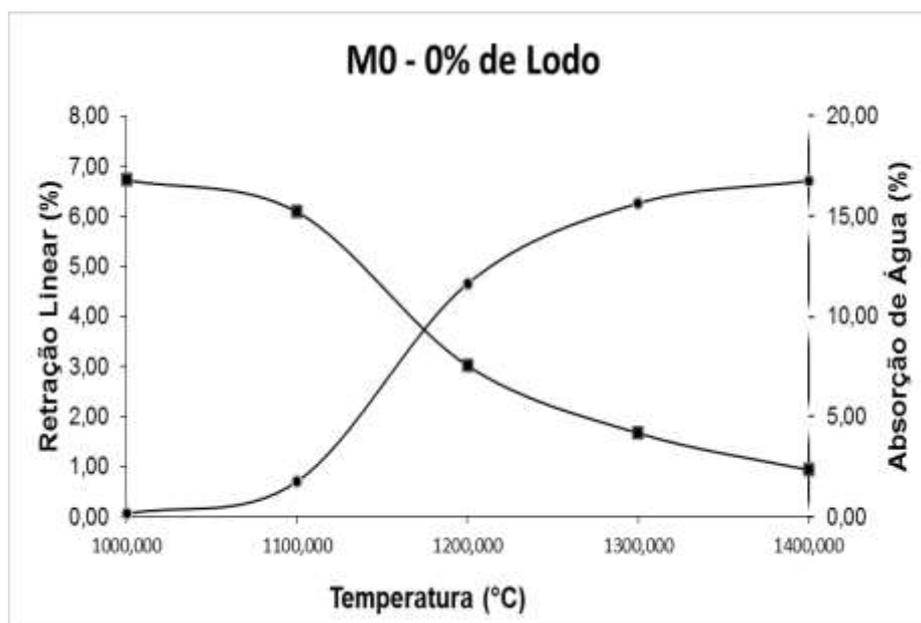


Gráfico 3: Curva de Gresificação de M0

A mistura M0 com 0% de lodo apresenta o comportamento da argila em estudo e comprova seu potencial refratário onde na temperatura de queima de 1000°C até 1100°C a absorção de água foi de 16,81% e 15,22% com retrações lineares menores que 1%.

A 1200°C a absorção ficou em 7,54%, em 1300°C em 4,17% e em 1400°C em 2,32%.

A queda acentuada da absorção na temperatura de 1400°C é explicada pela maior formação de fase vítrea provocando o fechamento dos poros abertos, diminuindo a absorção de água.

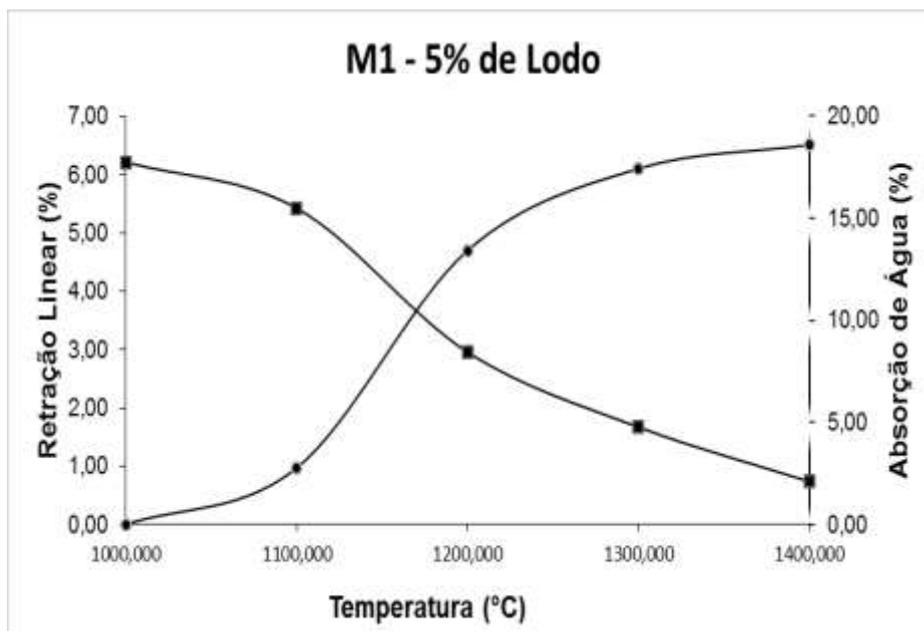


Gráfico 4: Curva de Gresificação de M1

A adição de 5% de lodo na mistura M1 fez com que a absorção de água a 1000°C e a 1100°C subisse para 17,74% e 15,50%, respectivamente, com retrações lineares, também, menores que 1%, reforçando o potencial refratário da argila, onde mesmo aumentando a temperatura de queima não afeta a estabilidade dimensional e não há o fechamento de poros.

A 1200°C a absorção de água ficou em 8,44%, a 1300°C em 4,77% e em 1400°C em 2,10% com retração linear máxima de 6,50%, observada a 1400°C.

Em todas as temperaturas a absorção de água de M1 foi maior que em M0, confirmando o comportamento esperado, de que a adição de lodo, com carga orgânica e sólidos mais voláteis iria provocar maior concentração de poros após a queima desses sólidos.

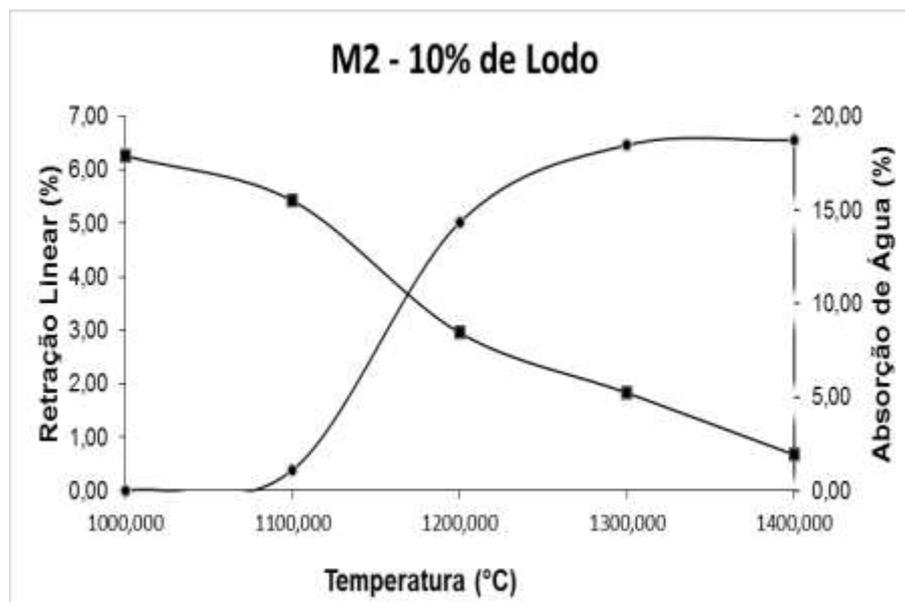


Gráfico 5: Curva de Gresificação de M2

A mistura M2 com 10% reafirma o potencial refratário da argila apresentando absorção de água de 17,89% e 17,33% para as temperaturas de 1000°C e 1100°C.

A 1200°C a absorção de água foi de 8,67%, em 1300°C de 5,23% e em 1400°C de 1,92%.

Comparando as misturas M0, M1 e M2 houve nas temperaturas de 1000° até 1300°C o aumento da absorção de água conforme houve o aumento da incorporação de lodo, seguindo o comportamento esperado, porém a 1400° a absorção de água foi menor em M3 (15% de lodo) do que nas demais misturas, apresentando um comportamento inesperado.

A 1400°C a mistura M0 apresentou absorção de 2,32%, M1 de 2,10% e M2 de 1,92%, valores baixos que são explicados pela formação de fase vítrea nessa temperatura.

Dessa forma, entende-se que é o lodo que fornece a matriz os materiais fundentes, que são os responsáveis pela formação de fase vítrea, a qual provoca o fechamento dos poros abertos. A mistura M2 por possuir maior quantidade de lodo teve em consequência maior quantidade de material fundente, produzindo maior fase vítrea, fechando maior quantidade dos poros abertos e em consequência final, menor absorção de água.

A figura 20 mostra os corpos de prova da mistura M2 em imersão.



Figura 19: Corpos de prova M2 em imersão

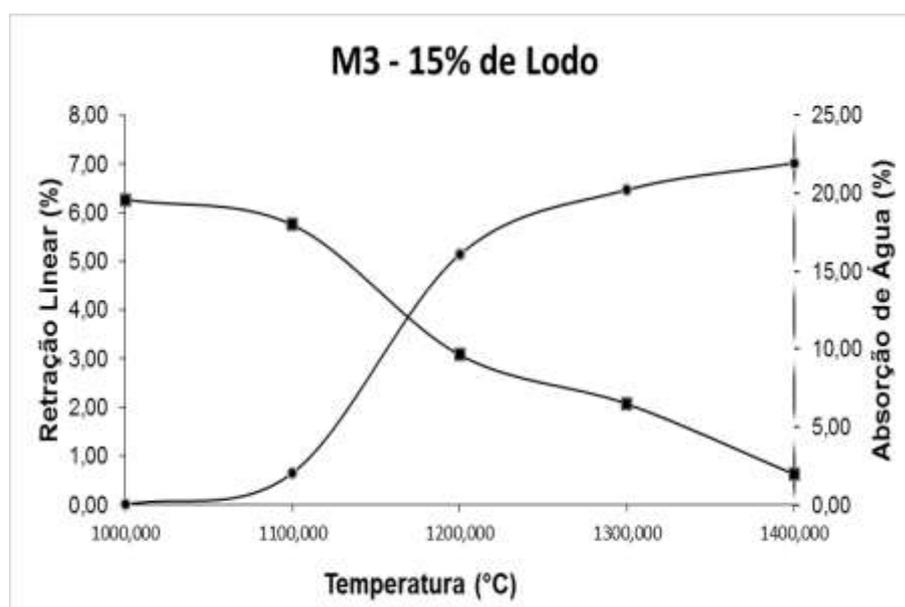


Gráfico 6: Curva de Gresificação de M3

Na mistura M3 os comportamentos anteriores se repetiram. As temperaturas de 1000°C e 1100°C apresentaram absorção de água de 19,60% e 17,98% com retração linear menor que 1%, comprovando assim o potencial refratário da argila.

A 1200°C a absorção de água foi de 9,63% em 1300°C de 6,48% e em 1400°C de 1,97%.

Novamente a temperatura de 1400°C apresentou absorção de água menor que as mistura M0 e M1 comprovando assim que é o lodo que fornece o material

fundente a as matrizes, e produzindo maior fase vítrea para fechamento dos poros abertos.

O gráfico 7 a seguir mostra o comportamento de absorção de água em relação a todas as mituras.

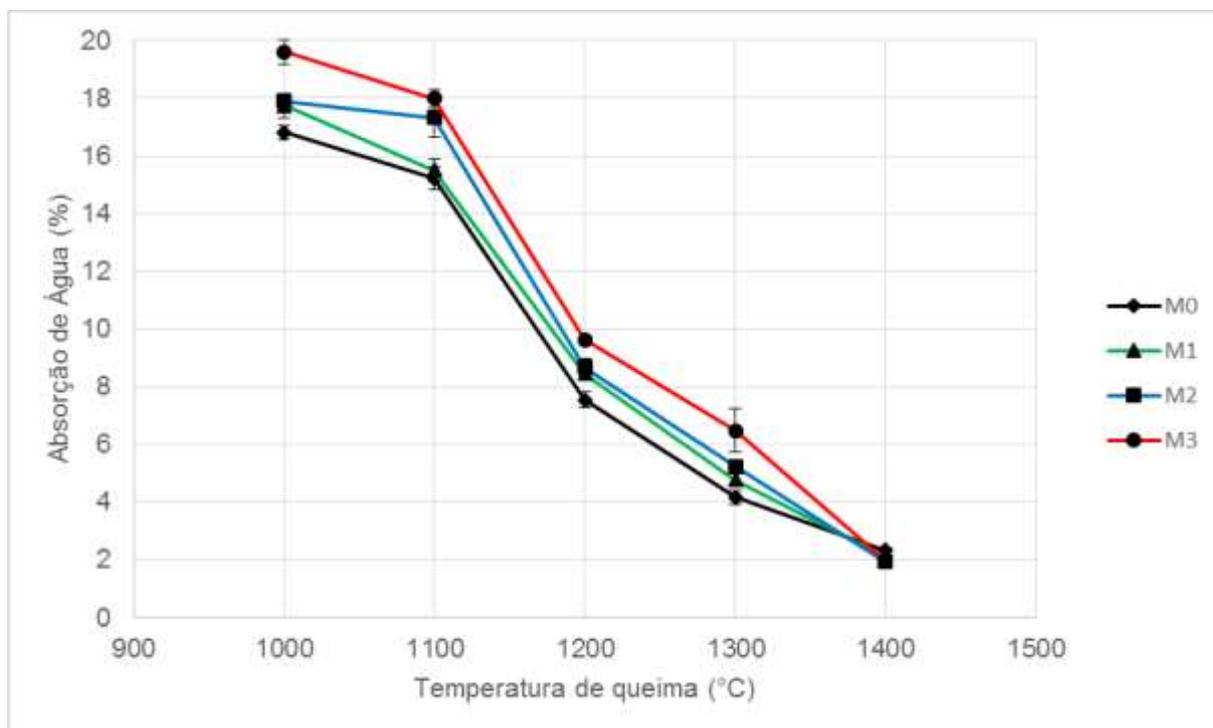


Gráfico 7: Absorção de Água

Em todas as misturas o comportamento da absorção de água foi semelhante. A 1000°C os índices de absorção ficaram entre 16,81% e 19,60%, os quais se mantiveram parcialmente estáveis com o aumento de 100°C na temperatura de queima ficando entre 15,22% e 17,98%, com variação média de 1,50% entre as duas temperaturas, ratificando o comportamento refratário esperado da argila.

4.1.5 Módulo de Ruptura à Flexão

O gráfico 8 a seguir apresenta o módulo de ruptura a flexão de cada mistura em relação às temperaturas ensaiadas.

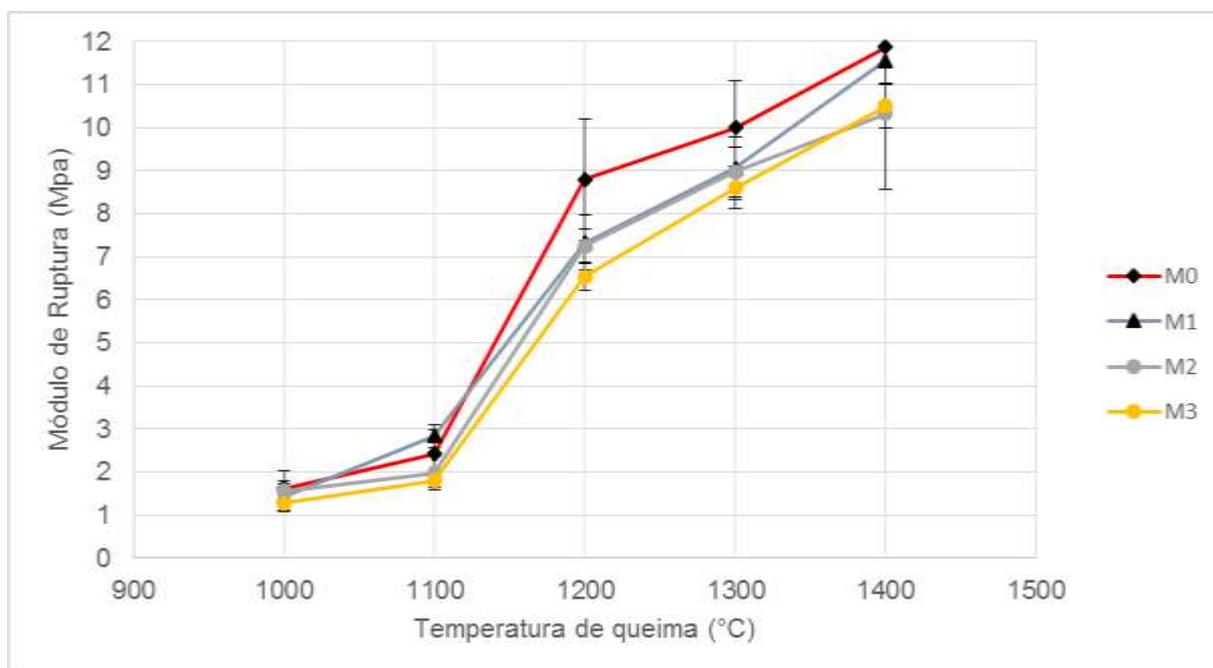


Gráfico 8: Módulo de Ruptura

A mistura M0, com 0% de lodo, apresentou o maior módulo de ruptura a flexão a três pontos e a incorporação do lodo na matriz provocou diminuição do módulo de ruptura, com exceção da mistura M1 a 1100°C que teve módulo de ruptura ligeiramente maior que a mistura M0.

As maiores quedas observadas foram na mistura M3 a 1100°C e 1200°C, onde houve redução de 25,77% e 25,65% em relação a mistura M0. Nas temperaturas de 1300°C e 1400°C para a mesma mistura a redução foi menor, de 13,99% e 11,56%, respectivamente, evidenciando assim a presença de material fundente no lodo e formação de fase vítrea nessas temperaturas. Dessa forma a mistura M3 é prejudicada pela incorporação do lodo pois necessitaria de mais energia de queima para que a resistência final ficasse mais próxima da resistência da peça sem lodo.

O lodo apresentou no ensaio de difração de raios X a fase goethita (FeO(OH)) e com a incorporação levou para a matriz cerâmica o elemento Ferro. Em material refratário o Ferro é visto como uma impureza o qual provoca diminuição do ponto de fusão da matriz. MCGEE e DODD (1961) afirmam que óxidos de ferro e os

sais de potássio são impurezas presentes na composição dos materiais que provocam deformação do refratário causando diminuição da temperatura de trabalho. A perda de resistência à flexão pode ser atribuída, também, ao ferro incorporado na matriz pelo lodo de ETA.

As misturas M1 e M2, nas temperaturas de 1200°C e 1300°C apresentaram redução média do módulo de ruptura de 7,30% e de 9,00% e dessa forma alinhado com os resultados de retração linear, absorção de água e perda ao fogo foram as misturas e temperatura que melhor incorporaram o lodo na matriz e foram submetidas aos ensaios térmicos.

4.1.6 Cor após a Queima

As imagens a seguir mostram a variação da cor em relação as misturas e temperaturas de queima e também possibilita observar a variação da retração linear dos corpos de prova.



Figura 20: Cor de queima das misturas

A cor final da matriz é função direta da temperatura utilizada e da quantidade de lodo presente em cada mistura e é esperado que o produto refratário apresente coloração clara lembrando cor branca com toque rosado.

Em todas as misturas a temperatura de 1400°C tem a coloração mais escura e foi a temperatura que mais apresentou retração linear e deformação do corpo de

prova e por essas características a queima nessa temperatura é inviável, apesar de apresentar a maior resistência a flexão, pois o gasto energético é muito elevado.

A mistura M3 na temperatura de 1400°C teve a deformação mais acentuada das peças, isso se deve a maior presença dos fundentes, principalmente derivados do Ferro, com maior formação de fase vítrea, e pela aproximação a temperatura de fusão do Ferro que é de aproximadamente 1500°C.

A mudança de tonalidade, em todas as misturas, começa na temperatura de 1200°C, comprovando o comportamento refratário da argila, que em 1000°C e 1100°C não apresentou variação dimensional significativa e nem mudança de cor.

A goethita presente no lodo e incorporada à matriz pode ter provocado escurecimento da cor final do produto, em todas as temperaturas, quando comparadas com a mistura M0, sem lodo. E esse escurecimento foi acentuado na maior temperatura. Esse comportamento era esperado e já havia sido reportado por PASCOAL (2000) que afirmou que o óxido de ferro, presente em misturas formuladas confere à massa cerâmica uma forte tonalidade.

4.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Em função do desempenho nos ensaios físicos (retração linear, perda ao fogo, absorção de água, módulo de ruptura a flexão e cor de queima), apenas as misturas M0, M1 e M2 queimadas a 1200°C e 1300°C tiveram seus corpos de prova ensaiados em relação às características térmicas, as fases formadas após a queima e a microestrutura interna.

As temperaturas de 1000°C e 1100°C apresentaram absorção de água muito alta com baixo módulo de ruptura a flexão e a temperatura de 1400°C apresentou baixa absorção de água em função da formação de fase vítrea, o que não é interessante para materiais refratários que necessitam de poros para diminuir a condutividade térmica.

4.2.1 Resistência ao Choque Térmico

O quadro a expressa os resultados observados após os ciclos de choque térmico aplicado aos corpos de prova. É importante lembrar que a RCT foi obtida através da equação 3.9 e que quanto menor for esse valor, melhor é o desempenho do material frente aos choques térmicos. O quadro 10, a seguir, apresenta os resultados do ensaio de resistência ao choque térmico.

Mistura	Temperatura	Ciclo da primeira fissura	Ciclo da fratura	RCT
M0	1200°C	3	4	0,75
	1300°C	3	4	0,75
M1	1200°C	3	4	0,75
	1300°C	3	4	0,75
M2	1200°C	3	4	0,75
	1300°C	3	4	0,75

Quadro 9: Número de ciclos

O desempenho em relação ao choque térmico foi igual em todas as misturas, concluindo-se que a presença ou não do lodo de estação de tratamento de água não produz efeito positivo nem negativo nas misturas em relação à mudança brusca de temperatura.

As primeiras fissuras foram observadas após a finalização do segundo ciclo de aquecimento e resfriamento e após a finalização do terceiro ciclo os corpos de prova apresentaram ruptura. A imagem 21 a seguir apresenta a aparência da após esse rompimento por choque térmico.

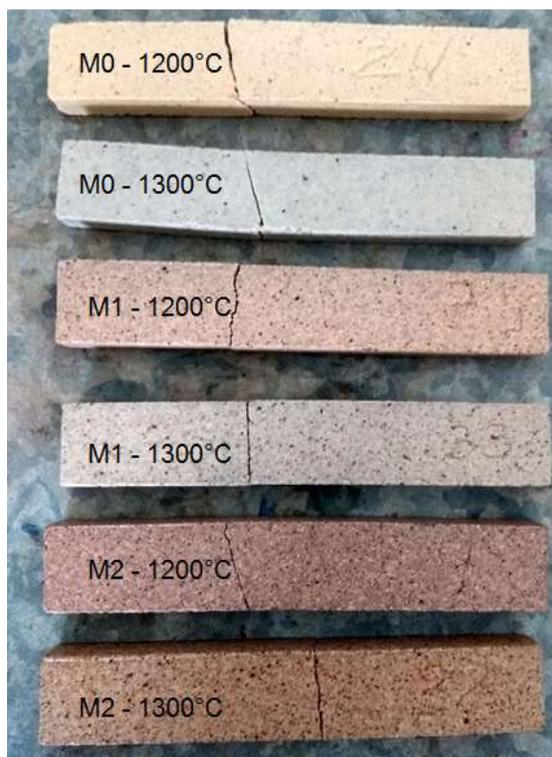


Figura 21: Fratura após choque térmico

As misturas queimadas a 1200°C apresentaram uma tendência de fissuração em zigue-zague, com linha mais rugosa enquanto as misturas queimadas a 1300°C apresentaram uma tendência de fissuração linear. Conforme afirma Nunes (2017) a fissuração em zigue-zague resulta em maior energia total de fratura, pois exibe trincas cujas trajetórias são mais longas em função da rugosidade.

Sobroza (2014) conclui que maior energia total de fratura corresponde à maior resistência ao choque térmico e que maior porosidade, defeitos microestruturais potencializam o surgimento de tensões internas e a propagação da fissuração.

As misturas queimadas a 1200°C possuem apresentaram maior absorção de água do que as misturas queimadas a 1300°C, ou seja, possuem maior porosidade o que pode ter potencializado a fissuração gerando as linhas maiores em formato de zigue-zague e possível resistência maior ao choque térmico.

4.2.2 Condutividade Térmica

O gráfico 9 a seguir apresenta os tempos médios que cada mistura e temperatura de queima levaram para atingir equilíbrio com a chapa aquecedora.

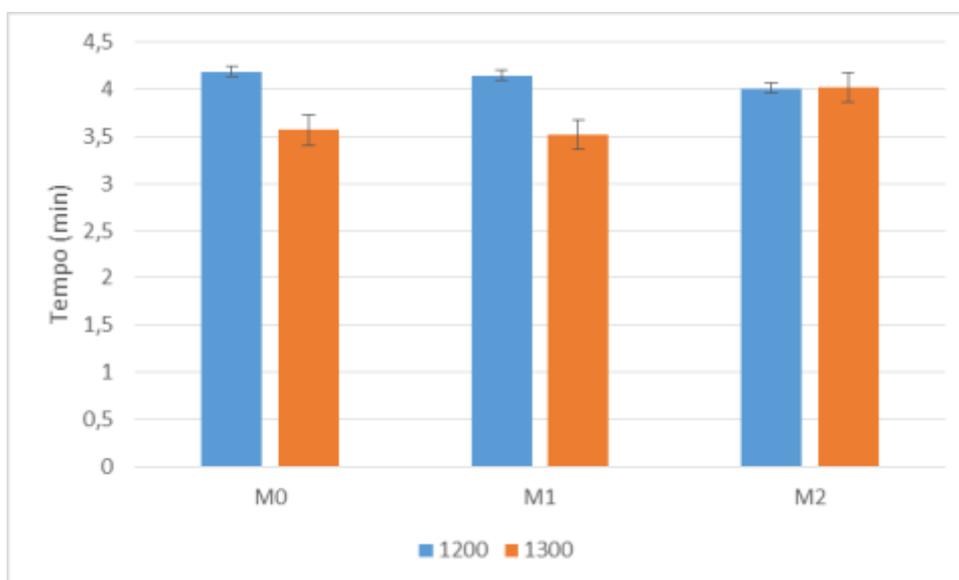


Gráfico 9: Tempo de aquecimento dos corpos de prova

O tempo de aquecimento até o equilíbrio das temperaturas da chapa e do corpo de prova, em todas as misturas, foi ligeiramente menor na temperatura de queima de 1300°C. O teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis aplicado a esses resultados confirma que os valores não são iguais, quando descarta a hipótese nula.

A temperatura de queima de 1300°C apresentou absorção de água menor do que a temperatura de queima de 1200°C, o que significa que a porosidade aparente a 1300°C é menor. Menor absorção de água indica maior formação de fase vítrea com fechamento dos poros aparente e a condutividade térmica será maior em função da menor quantidade de poros (ar) dentro dos corpos de prova.

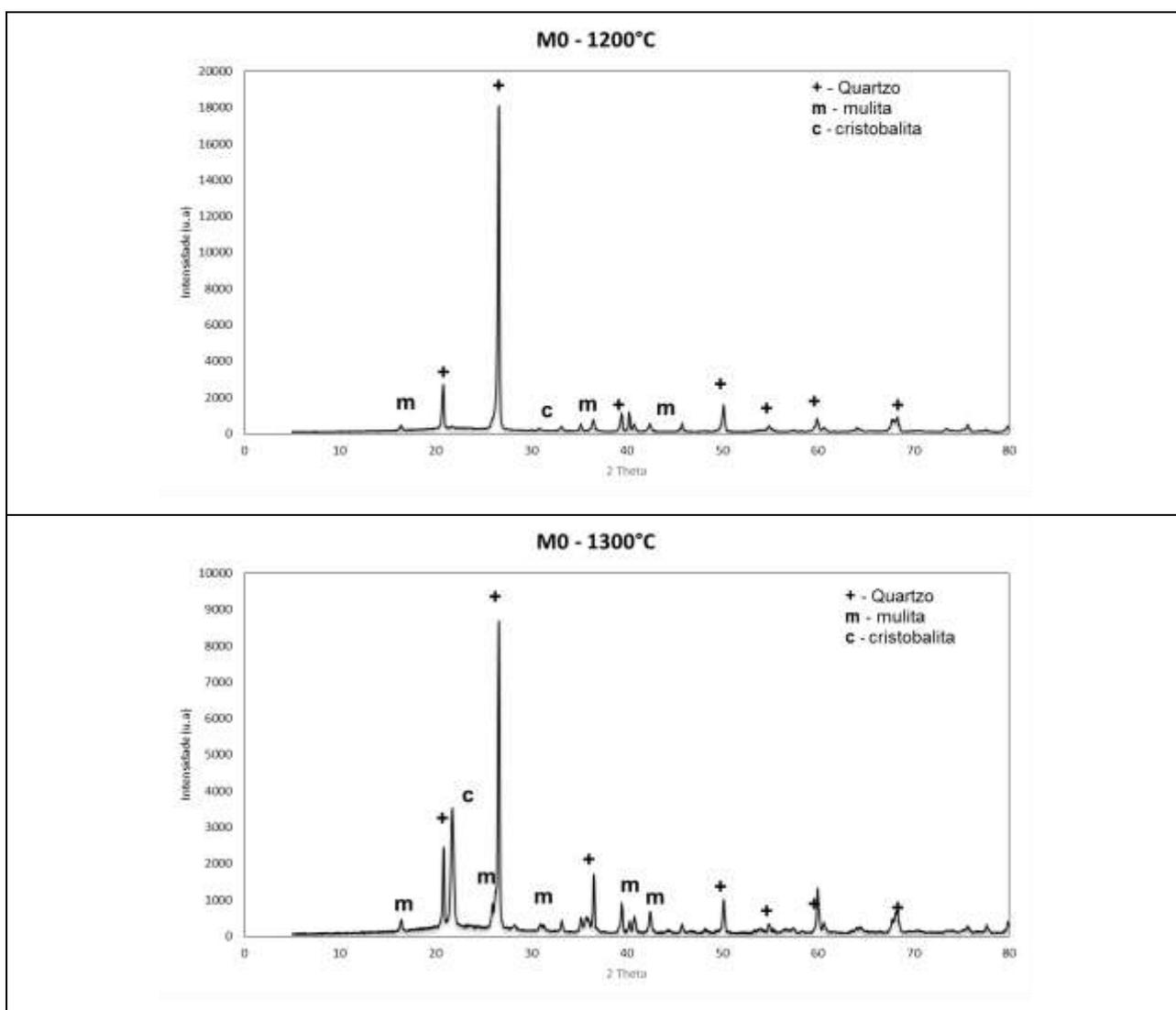
Como os corpos de prova queimados a 1300°C, nas misturas M0, M1 e M2, apresentaram menor tempo para atingir o equilíbrio há o indicativo de que a condutividade térmica é ligeiramente maior nessas peças.

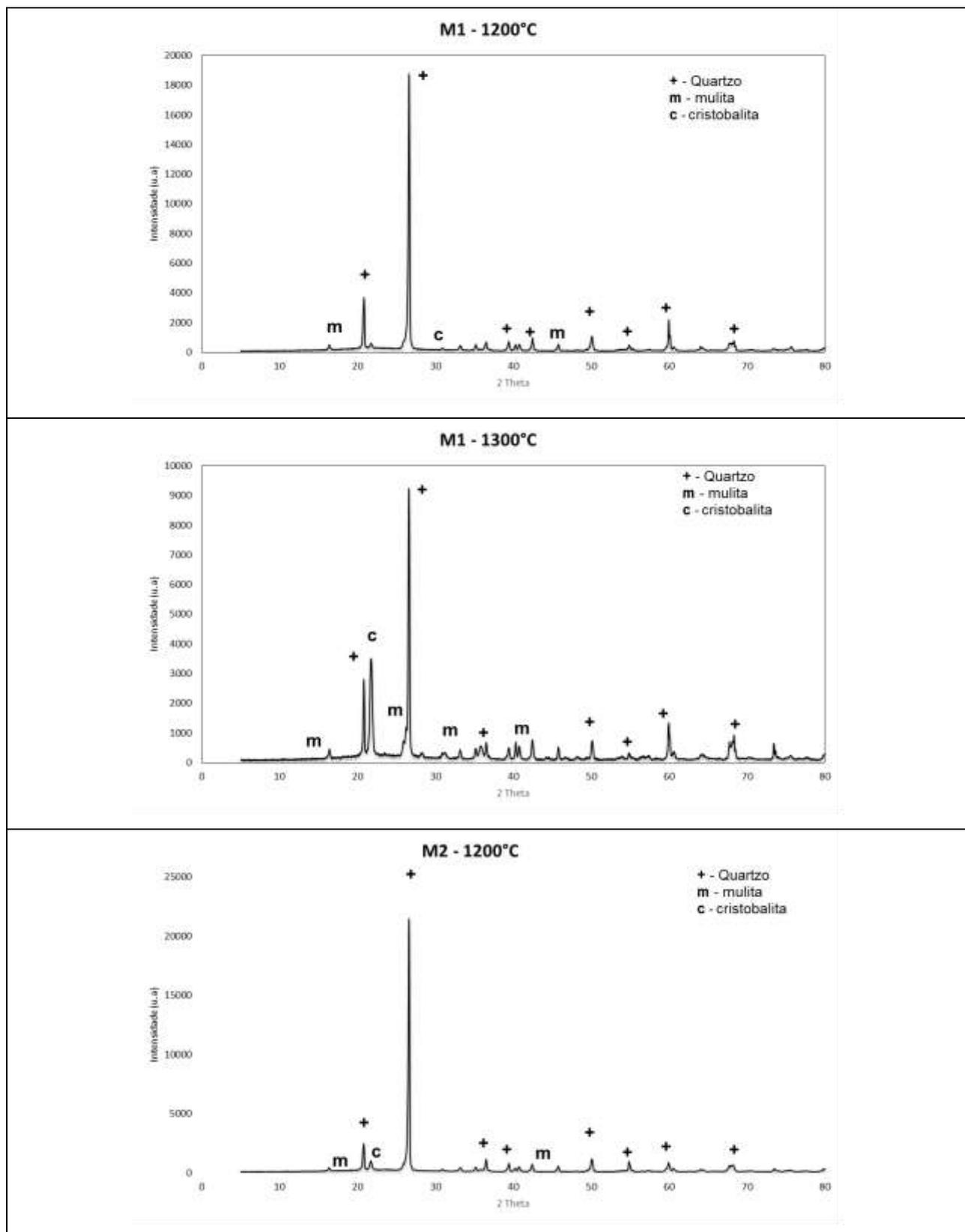
A presença do lodo nas misturas queimadas a 1200°C fez com que o tempo diminuísse em 3 segundos para M1 e em 18 segundos para M2, representando assim 0,95% e 4,95% a menos no tempo quando comparado com M0. Em função disso é possível afirmar que a presença de lodo, nas amostras queimadas a 1200°C não

influenciou o tempo de equilíbrio entre a peça e a chapa, não possuindo diferença significativa na condutividade.

4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A figura 22 a seguir apresenta o difratograma das amostras M0, M1 e M2 queimadas a 1200°C e 1300°C.





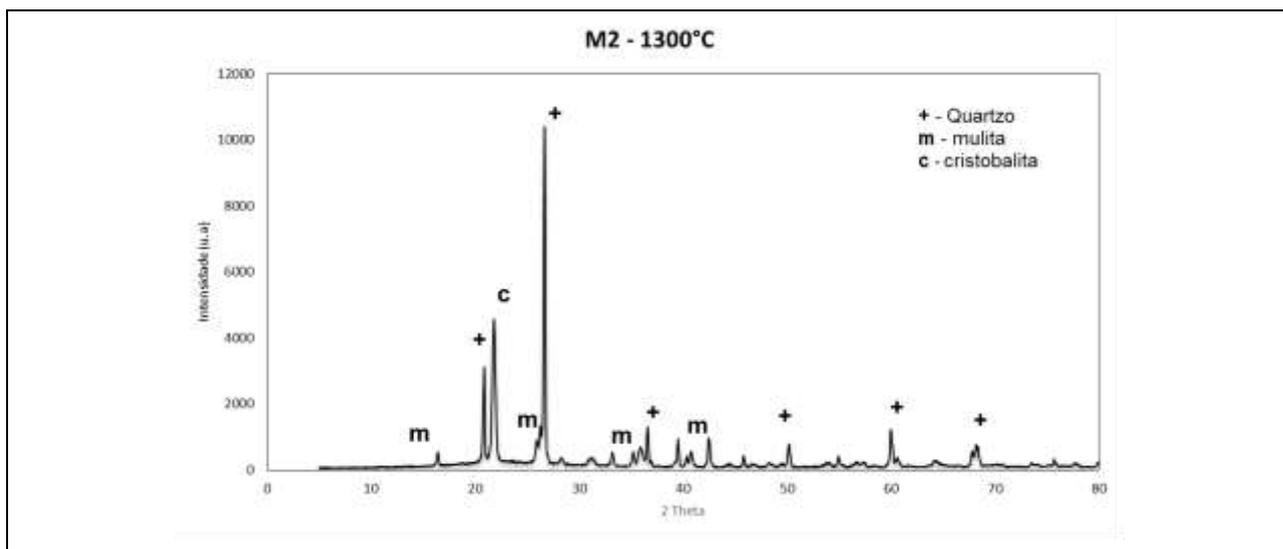


Figura 22: DRX das misturas após a queima

Após a queima foram identificadas fases de quartzo (SiO_2), mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e cristobalita (SiO_2) em todas as misturas. A presença de quartzo era esperada, pois a temperatura e o tempo são insuficientes para a transformação completa dessa fase, porém a redução da intensidade do pico indica que houve dissolução na fase líquida ajudando na formação das fases de mulita e cristobalita, conforme afirma Nunes (2017).

A cristobalita ocorre em função da cristalização do quartzo (SOBROZA, 2014). O pico de cristobalita teve sua intensidade aumentada com o aumento da temperatura. Amrane et al. (2011) afirmam que o excesso de quartzo presente na matéria-prima transforma-se parcialmente em cristobalita no momento da queima a 1300°C .

Não houve mudança significativa nas fases com a incorporação do lodo de estação de tratamento de água o que indica que o lodo tem características que possibilitam sua incorporação em matriz cerâmica com potencial refratário.

4.4 MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA

Nas imagens é possível observar a grande quantidade de poros e fissuras em todas as misturas. Mesmo com o aumento da temperatura a quantidade de poros é grande com baixa formação de fase vítrea, isso explica os valores de absorção de água que mesmo com o aumento da temperatura de queima não houve fechamento significativo dos poros.

Na imagem c, mistura M1 a 1200°C é possível observar as partículas de lodo destacando-se na mistura, com considerável quantidade de microfissuras, o que ajuda a explicar a diminuição na resistência mecânica dos corpos de prova. E na imagem d, mistura M1 a 1300°C fica evidenciada a separação entre a matriz cerâmica e as partículas de lodo.

A imagem f, mistura M2 a 1300°C evidencia a maior formação de fase vítrea com poros menores e as partículas do lodo mais envolvidas na mistura.

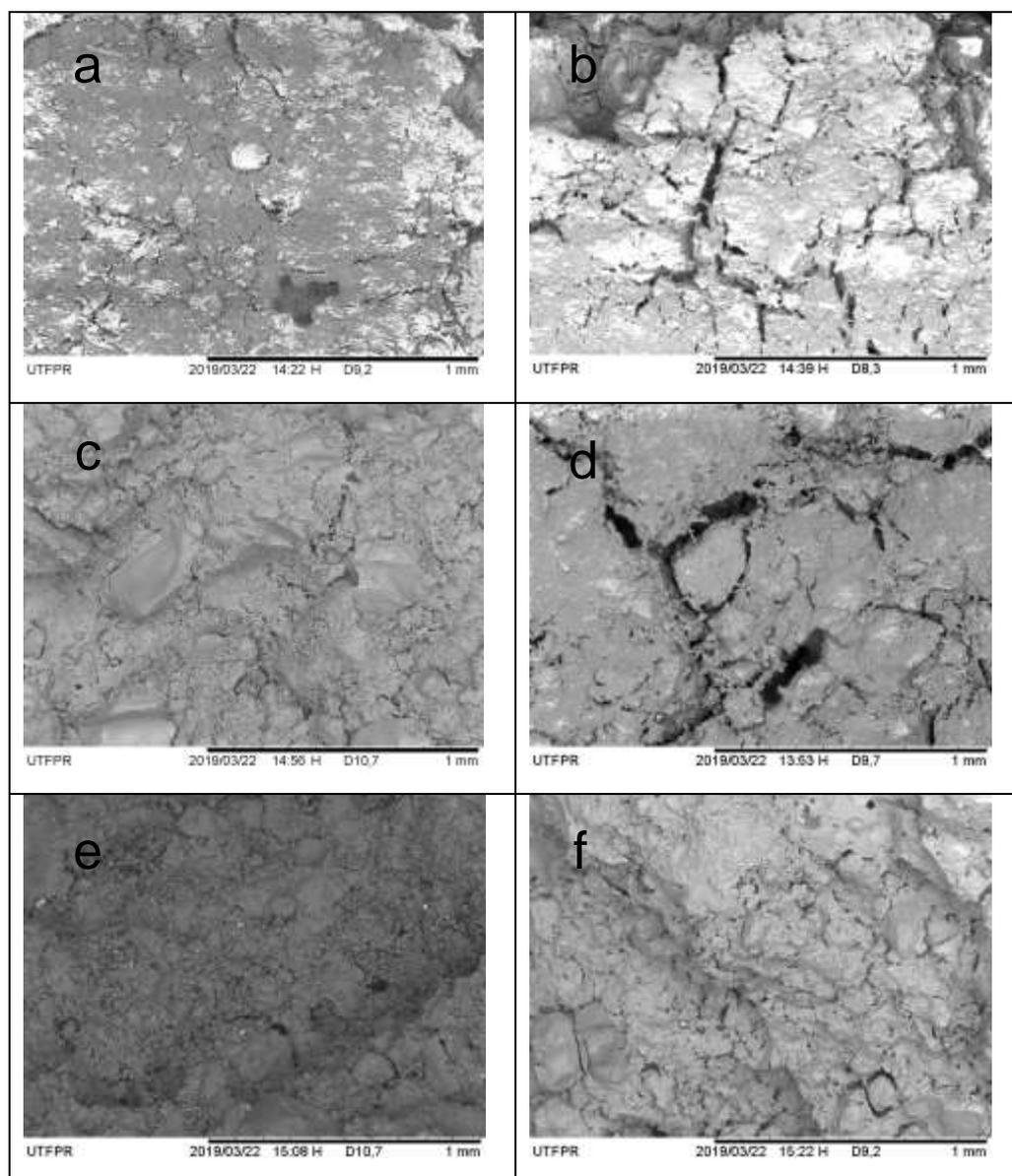


Figura 23:MEV a)M0 1200°C b) M0 1300°C c)M1 1200°C d)M1 1300°C e) M2 1200°C f) M2 1300°C

Os quadros a seguir apresentam o resumo geral de todos os resultados obtidos nos ensaios realizados nesse trabalho.

	Perda ao Fogo (%)			
	M0	M1	M2	M3
1000°C	3,811047	4,796667	6,589912	6,458132
1100°C	4,304831	5,52326	6,819032	6,878933
1200°C	4,169928	5,41135	6,287675	6,983533
1300°C	4,278367	5,5121	6,36793	7,028315
1400°C	4,36577	5,61086	6,34575	7,38995

	Absorção de água (%)			
	M0	M1	M2	M3
1000°C	16,81862	17,74801	17,8943	19,60107
1100°C	15,2221	15,49872	17,33305	17,98413
1200°C	7,543471	8,442234	8,673421	9,634217
1300°C	4,170417	4,772104	5,229586	6,484963
1400°C	2,32455	2,09978	1,92081	1,97468

	Módulo de Ruptura (Mpa)			
	M0	M1	M2	M3
1000°C	1,62599	1,447539	1,562878	1,281054
1100°C	2,420245	2,84489	1,980231	1,796423
1200°C	8,799784	7,334361	7,251297	6,546028
1300°C	10,00231	9,059799	8,979369	8,60263
1400°C	11,878818	11,55433	10,33134	10,50499

Os valores destacados mostram os melhores resultados para cada ensaio realizado. Destaca-se que as amostras M1 e M2 foram as que apresentaram o melhor desempenho geral, uma vez que a adição do lodo não causou danos significativos as misturas.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral desse trabalho foi analisar a influência da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água nas propriedades da cerâmica refratária. Para isso foram realizados ensaios físico e químicos para caracterizar e avaliar essa incorporação.

O lodo de estação de tratamento de água possui grande índice de umidade, sendo necessário aplicar procedimentos de desague antes da utilização nas matrizes cerâmicas. A difração de raios X indicou a predominância da fase de quartzo e a presença também da caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a qual tem sua origem ligada a adição do coagulante químico a base de alumínio.

A presença da caulinita no lodo foi um fator determinante na escolha da incorporação em matriz cerâmica refratária em função do potencial refratário desse elemento.

O trabalho apresentou que incorporações de 5% a 10% de lodo na matriz cerâmica refratária queimada em até 1200°C são viáveis, pois pouco afetaram as propriedades físicas das matrizes. A perda ao fogo, nessa temperatura, permaneceu praticamente estável, aumentando em apenas 2,11% com 10% de lodo. A absorção de água sofreu aumento de 1,12% em relação as matrizes sem lodo. E a resistência a flexão teve diminuição de 17,59%, caindo de 8,79 Mpa para 7,25 Mpa.

Nos ensaios de caracterização da refratariedade a incorporação de lodo não interferiu na resistência ao choque térmico, sendo que todas as amostras apresentaram o mesmo comportamento em relação ao número de ciclos com diferenciação apenas na formação das fissuras, onde a temperatura de 1200°C apresentou fissuração em zigue-zigue, indicando maior energia total de fratura em função da rugosidade da amostra.

A condutividade térmica, que foi avaliada em função do tempo até a amostra entrar em equilíbrio com a chapa aquecida, também apresentou resultados estáveis após a incorporação do lodo. O tempo, nas amostras com 10% lodo, aumentou em apenas 18 segundos, representando 4,95% a mais do que nas amostras sem lodo.

Sendo assim, a incorporação de 10% do lodo em matriz cerâmica com potencial refratário é sim uma opção viável para a destinação final do lodo gerado durante o processo de tratamento de água potável, pois pouco modifica a estrutura

interna e as características físicas da matriz cerâmica proporcionando nova opção de destinação final do lodo.

A destinação do lodo para incorporação em matriz cerâmica com potencial refratário atende a resolução SEMA nº21/2009 pois evita que o material seja descartado de forma inadequada.

REFERÊNCIAS

ABAJO, M. F. **Manual Sobre Fabricación De Baldosas Tejas Y Ladrillos**. Beralmar S. A., Terrassa, Espanha, 360p, 2000.

ALVES, F. B.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Caracterização De Argilas Da Fazenda Santa Helena Do Município De Campos Dos Goytacazes-Rj**. Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF. Porto Alegre - RS. 2004.

AMRANE, B et al. Experimental study of the thermo-mechanical behavior of alumina-silicate refractory materials based on a mixture of Algerian kaolinitic clays. **Ceramics International**. v. 37, n. 8, p. 3217–3227, 2011.

ARAÚJO, F. DA S. D. DE. **Influência Do Lodo De ETE Na Massa Para Fabricação De Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 528/2014** - Produtos refratários - Determinação do cone pirométrico equivalente (refratariedade). Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004/2004** - Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AZEVEDO NETO, J. M. DE. **Manual de Hidráulica**. Ed 8. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BABBITT, H. E.; DOLAND, J. J.; CLEASBY, J.L. **Abastecimento de Água**. 1 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 592 p., 1976.

BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G. **Toxicidade De Despejos (Lodos) De Estações De Tratamento De Água À Daphnia Similis (CLADOCERA, CRUSTACEA)**. XXVII Congresso interamericano de Engenharia Sanitaria e Ambiental. São Carlos - SP. 2000.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Metals E Sólidos: Aspectos Legais Dos Resíduos De Estações De Tratamento De Água**. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Carlos - SP, 2001.

BASEGIO, T. M.; BERUTTI, F. A.; BERGMANN, C. P. **Aspectos Ambientais No Uso De Lodo De Curtume Como Matéria-Prima Para Cerâmica Vermelha**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2001.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs)**. In: ANDREOLI, C. V (Coordenador). **Resíduos Sólidos Do Saneamento: Processamento, Reciclagem E Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa. 2001.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**. REsolução nº 430 de maio de 2001. Brasília, 2011.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Cidades**. Marmeleiro-Paraná. 2019.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Portaria MS nº 518, de 25 de Março de 2004. Brasília, 2004.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Portaria MS nº 2914, de 12 de Dezembro de 2011. Brasília, 2011.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Lei 12305. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2010.

BRITO, A. L. F. **Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização Por Solidificação de Resíduos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução: Sergio Murilo S. soares. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. **Lodo de Estações de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas**. Curitiba: SANEPAR, THINKS CREATIVE, rich.

CASTILHO, A. B. DE J.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G. **Utilização De Lodo De ETA E ETE Como Material Alternativo De Cobertura De Aterro Sanitário**. v. 7, p. 86–97, 2011.

COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. DE S.; SANTOS, H. DE S. **Argilas Especiais: O Que São, Caracterização e Propriedades**. Química Nova, v. 30, n. 1, p. 146-152, 2007.

DELGADO, J. V. C. **Avaliação Da Aplicação Do Lodo Da Eta Guandu Na**

Pavimentação Como Disposição Final Ambientalmente Adequada. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

DI BERNARDO. **Ensaio de Tratabilidade de Água dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** São Carlos: RiMa, 2002.

DI BERNARDO, L. e DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** Ed 2. São Carlos: RiMa, 2005.

DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, **Método de Ensaio no 041, designada Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização.** 1994.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro.** Brasília, 2010.

DONDI, M. **Caracterização Tecnológica Dos Materiais Argilosos: Métodos Experimentais E Interpretação Dos Dados.** Cerâmica Industrial. 2006.

DUARTE, A. K. **Encapsulamento Cerâmico De Resíduos De Materiais Refratários.** Universidade Federal de Minas Gerais. Tese de Doutorado. 2005.

EWAI, E. M. M.; ELSAADANY, R. M.; AHMED, A. A.; SHALABY, N. H.; AL-ANADOULI, B. E. H. **Insulating Refractory Bricks from Water Treatment Sludge and Rice Husk Ash.** Refractories and Industrial Ceramics, v. 58, n. 2, p. 136–144, 2017.

GERVASONI, R. **Caracterização e avaliação do potencial de destinação do lodo de estações de tratamento de água do estado do paraná.** 2014.

HEGAZY, B. E. D. E.; FOUAD, H. A.; HASSANAIN, A. M. **Incorporation Of Water Sludge, Silica Fume, And Rice Husk Ash In Brick Making.** Advances in environmental research, v. 1, n. 1, p. 83–96, 2012.

HEREK, L. C. S.; BERGAMASCO, R.; TAVARS, C. R. G.; UEMURA, V. O.; PANCOTTE, L. P. **Estudo da Solidificação/Estabilização do Lodo na Indústria Textil em Material Cerâmico.** Cerâmica Industrial, 10 (4), 41-46, 2005.

HOPPEN, C. **Reciclagem De Lodo De ETA Centrifugado Na Construção Civil, Método Alternativo Para Preservação Ambiental.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR. 2004.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. **Co-Disposição De Lodo Centrifugado De**

Estação De Tratamento De Água (ETA) Em Matriz De Concreto: Método Alternativo De Preservação Ambiental. *Cerâmica*, v. 51, n. 318, p. 85–95, 2005.

KALAPATHY, U; PROCTOR, A; SHULTZ, J. L. **Silicate Thermal Insulation Material from Rice Hull Ash.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 42, n. 1, p. 46–49, 2003.

KAMINATA, O. T. **Aproveitamento De Lodo Gerado No Tratamento De Efluente Da Indústria De Lavanderia Têxtil Na Produção De Bloco De Cerâmica Vermelha.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá. 2008.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água.** Ed 3. Campinas: Átomo, 2010.

LIMA, M. R. DE. **Estudos Comparativos De Flocculação Hidráulica Para Águas De Abastecimento Em Reatores De Fluxo Ascendente Dotados De Seixos Rolados De Materiais Sintéticos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2010.

LOPES, M. A. **Avaliação De Diferentes Coagulantes Para Remoção De Sólidos Por Flotação E Sedimentação De Água Residuária De Uma Indústria Metal-Mecânica.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2011.

MARGEM, J. I. **Caracterização E Incorporação De Lodo De Decantação De Estação De Tratamento De Água (E.T.A.) Em Cerâmica Vermelha.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2008.

MCGEE, T. D., DODD, C. M. “**Mechanism of Secondary Expansion of High-Alumina Refractories Containing Calcined Bauxite**”, *J. Am. Ceram. Soc.* 44, 6 p. 277-283 (1961).

MEGDA, C. R.; SOARES, L. V.; ACHON, C. L. **Propostas De Aproveitamento De Lodos Gerados Em ETAs.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, n. 1, p. 7, 2005.

MIARA, C. R. L. **Análise Da Incorporação Do Lodo De Estação De Tratamento De Esgoto (Ete) Na Massa Cerâmica Para Produção De Blocos Cerâmicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa - PR. 2014.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil Das Principais Industrias Cerâmicas E Seus Produtos.** *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 2, p. 28–39, 2001.

NUNES, A. da S. **Desenvolvimento de Cerâmicas Refratárias com Substituição da Argila Refratária por Sílica da Casca de Arroz, Microfibras Cerâmicas e Fibras de Aço: Caracterização das Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pampa. Alegrete – RS. 2017.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. **Influencia Da Adição De Resíduo (Lodo) De Estação De Tratamento De Água Nas Propriedades E Microestrutura De Cerâmica Vermelha.** Cerâmica, v. 54, p. 167–173, 2008.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização De Resíduo (Lodo) Proveniente De Estação De Tratamento De Águas Visando Sua Utilização Em Cerâmica Vermelha.** Cerâmica, v. 50, n. 316, p. 324–330, 2004.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia - Microestrutura e Propriedades.** Ed 1. São Paulo: Hemus , 2007.

PAIXÃO, L. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. **Efeito Da Incorporação De Lodo De ETA Contendo Alto Teor De Ferro Em Cerâmica Argilosa.** Cerâmica, v. 54, p. 63–76, 2008.

PARANÁ. Secretária de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hidricos. SEMA. Resolução nº 21, de 22 de abril de 2009. Curitiba, 2009.

PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. **Bauxitas refratárias: composição química, fases e propriedades - Parte I.** Cerâmica, vol.46, nº. 299, p.131-138, Setembro de 2000.

PAVANELLI, G. **Eficiência De Diferentes Tipos De Coagulantes Na Coagulação, Floculação E Sedimentação De Água Com Cor Ou Turbidez Elevada.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2001.

PEREIRA, J. DE P. **Desenvolvimento De Um Compósito Para Otimizar A Radiação Térmica Em Materiais Refratários $Al_2O_3-SiO_2-Cr_2O_3-SiC-Ca(AIO_2)_2$.** Centro Universitário de Volta Redonda. 2016.

PETRUCI, E. G. R. **Materiais de Construção .** Ed 12. São Paulo: Globo, 2003.

PORTELA, K. F.; ANDREOLI, C. V; HOPPEN, C.; SALES, A.; ARON, A. **Caracterização Físico-Química Do Lodo Centrifugado Da Estação De Tratamento De Água Passaúna – Curitiba-PR.** 22º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária Ambiental, p. 10, 2003.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. **Importância Da Composição Granulométrica De Massas Para A Cerâmica Vermelha.** Cerâmica Industrial, v. 2, p. 31–35, 1997.

PRAXEDES, P.B. **Aplicação da Borra da Tinta Automotiva na Produção de Cerâmica Branca Refratária**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. p. 94, 2013.

PRIM, E. C. C. **Reaproveitamento de Lodo Têxtil e da Cinza Pesada na Construção Civil: Aspectos Tecnológicos e Ambientais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. FLORIANÓPOLIS, 1998.

RAMADAN, M. O.; FOUAD, H. A; HASSANAIN, A. M. **Reuse of Water Treatment Plant Sludge in Brick Manufacturing**. Journal of Applied Sciences, v. 4, n. 10, p. 1223–1229, 2008.

RAMOS, F. M. S.; KAMINATA, O. T.; TAVARES, C. R. G.; BENATTI, C. T.; CAPELASSO, M.; INNOCENTI, B. D. **Avaliação da técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil - produção de bloco cerâmico de vedação**. Cerâmica, 55, 408-414, 2009.

RIBEIRO, C. G., CORREIA, M. G. FERREIRA, LUÍS G., GONÇALVES, A. M., RIBEIRO, M. J. P., FERREIRA, A. A. L. **Estudo Sobre A Influência Da Matéria Orgânica Na Plasticidade E No Comportamento Térmico De Uma Argila**. Cerâmica Industrial, v. 9, n. 3, p. 35-38, 2004

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estação de Tratamento de Água**. São Paulo, 2001.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. DE. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.

SADIK, C.; AMRANI, I. E. E.; ALBIZANE, A. **Recent Advances in Silica-Alumina Refractory: A Review**. Journal of Asian Ceramic Societies. 2014.

SANDOVAL, L. Y.; MOTELLANO, L. P.; MARTIN, A. D.; SÁNCHEZ, L. G.; SANTANA, DE L. R. M.; MORÁN, M. P. **Tratabilidad De Los Lodos Producidos En La Potabilización Del Agua**. Journal of Chemical Information and Modeling, v. 53, p. 160, 1989

SANTOS, G. Z. B. DOS. **Argamassa Geopolimérica à Base de Lodo de Estação de Tratamento de Água Calcinado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. p. 115, 2008.

SANTOS, P. DE S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**. Vol. 2. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SANTOS, P. DE S. **Tecnologia de Argilas, Aplicada Às Argilas Brasileiras**. Vol.

1. São Paulo: Edgard Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975.

SCALIZE, P. S.; ALBUQUERQUE, A.; ANGELIM, R. R.; CIVIL, E. D. E. **Caracterização Física Do Resíduo De Uma Estação De Tratamento De Água Para Sua Utilização Em Materiais De Construção**. Cerâmica, v. 61, p. 450–456, 2015.

SCHMITZ, R. M., SCHROEDER, C., CHARLIER, R. **Chemo-Mechanical Interactions In Clay: A Correlation Between Clay Mineralogy And Atterberg Limits**. Applied Clay Science, v. 26, n. 1-4, p. 351-358, 2004.

SILVA, A. P. DA; ISAAC, R. DE L. **Adensamento Por Gravidade De Lodo De ETA Gerado Em Decantador Convencional E Decantador Laminar**. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, México. p. 1–7, 2002.

SILVEIRA, C.; KURODA, E. K.; ABE, C. H.; YOSHIKI, L.; HIROOKA, E. Y. **Desaguamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água por Leito de Drenagem/Secagem**. Universidade Estadual de Londrina. 2015.

SILVEIRA, C.; KOGA, D. S.; KURODA, E. K.; **Estudo da Viabilidade de Disposição Final dos Lodos de ETAs em Aterros Sanitários**. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v-9, n-11, 2013.

SOBROSA, F. Z. **Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz**. 2014. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal do Pampa - Programa de Pós-graduação em Engenharias - PPEng, Alegrete- RS, 2014.

SUWAK, R; WOJSA, J; PODWO, J. **Thermal shock resistance of magnesia – chrome refractories — experimental and criterial evaluation**. Ceramics International, v. 39, p. 1–12, 2013.

TARTARI, R. **Incorporação De Lodo Gerado Na Estação De Tratamento De Água Tamanduá, Como Aditivo Em Massas Para Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado. 2008.

TEIXEIRA, S. R.; DE 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, p. 215–220, 2006.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **I-025 – Aproveitamento E Disposição Final De Lodos De Estações De Tratamento De Água Do Estado De São Paulo**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. n. 1, p. 1–9, 2000.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F. de; PINATTI, D. E. **Caracterização da massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ.** Cerâmica, v. 46, n.297, 2000.

WIECHETECK, G. K.; CORDEIRO, J. S. **Gestão Ambiental De Sistemas De Tratamento De Água.** XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. México. p. 1–6, 2002.

WOLF, W. **Produção e caracterização de ligas do sistema Al-Co-Fe-Cr e aplicações como recobrimentos para barreiras térmicas.** 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Quantidade de material utilizado para formulação das misturas

Quadro 10: Quantidade de material para produção das misturas

	Argila (g)	Lodo (g)	Água (g)
M0	2100	0	168
M1	1995	105	168
M2	1890	210	168
M3	1785	315	168

Fonte: Autor

APÊNDICE B: Análise Estatística para o ensaio de condutividade térmica

Quadro 11: Nomenclatura dos tratamentos

MISTURA	TRATAMENTO
M0	A
M1	B
M2	C

Fonte: Autor

Quadro 12: Teste para 1200°C

<i>Teste de Kruskal-Wallis</i>	
	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	5
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,0820

Fonte: Autor

Quadro 13: Teste para 1300°C

<i>Teste de Kruskal-Wallis</i>	
	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	5
Graus de Liberdade	2
P-valor	0,0820

Fonte: Autor

