



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LAYSA CRISTINA ARÃO COSTA

**TIJOLOS CERÂMICOS COM GESSO RESIDUAL DA FABRICAÇÃO DE LOUÇA
SANITÁRIA**

Caruaru

2021

LAYSA CRISTINA ARÃO COSTA

**TIJOLOS CERÂMICOS COM GESSO RESIDUAL DA FABRICAÇÃO DE LOUÇA
SANITÁRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Érika Pinto Marinho.

Caruaru

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

C837t Costa, Laysa Cristina Arão.
Tijolos cerâmicos com gesso residual da fabricação de louça sanitária. / Laysa
Cristina Arão Costa. – 2021.
73 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Erika Pinto Marinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia
Civil e Ambiental, 2021.
Inclui Referências.

1. Gesso – Caruaru (PE). 2. Resíduos industriais – Caruaru (PE). 3. Cerâmica
vermelha – Caruaru (PE). 4. Tijolos – Caruaru (PE). 5. Desempenho – Avaliação.
I. Marinho, Erika Pinto (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2021-006)

LAYSA CRISTINA ARÃO COSTA

**TIJOLOS CERÂMICOS COM GESSO RESIDUAL DA FABRICAÇÃO DE LOUÇA
SANITÁRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 10/02/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Érika Pinto Marinho (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof^ª. Dr^ª Ana Cecília Vieira da Nóbrega (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof^º. Dr Julio Cezar de Oliveira Freitas (Examinador Externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que possibilitou minha jornada como mestranda, abençoando todas as conquistas e dificuldades no decorrer do Curso, aos meus familiares, meu pai Fernando Costa, pelo apoio principalmente nos ensaios laboratoriais, minhas primas Kácia Arão e Nara Arão, em especial a minha mãe Laura Arão e minha filha Nina Arão que foi a minha motivação em persistir nos momentos difíceis.

A Universidade Federal de Pernambuco, pela sua infraestrutura, seu corpo docente, a coordenação e a secretaria do Curso pelo suporte quando solicitado, principalmente ao colega de trabalho Marcelo por sempre ajudar nas solicitações emergenciais.

A Escola Técnica Senai Jaboatão, ao amigo David e ao consultor Júlio César pela sua presteza e colaboração nas tentativas de metodologias iniciais.

A Tecomat Engenharia pela realização de ensaios através da colaboração de André Miranda.

A Universidade Federal do Ceará – Campus Pici e ao Professor Dr. José Sasaki pela sua admirável gentileza e disponibilidade.

A Universidade Federal da Paraíba e a Professora Dr.^a Aline Flávia.

A Professora Dr.^a Ana Cecília pela inspiração, contribuição e ensinamentos multidisciplinares.

Ao Professor Dr. Tibério Andrade por sempre se dispor em colaborar com os ensinamentos, conselhos, motivação e incentivo a superação dos obstáculos.

A Professora Dr.^a Jocilene Costa pela amizade, apoio e incentivo.

A minha orientadora, Professora Dr.^a Érika Pinto, pelo imenso aprendizado, por toda sua paciência, dedicação, compreensão, conselhos e disponibilidade em momentos cruciais a minha formação.

Aos Professores Márcio e Ricardo do IFPE - Campus Caruaru, bem como ao Professor Jonathan da UNIFAVIP.

Aos amigos Filipe Torres e Marcelo Tavares por não medirem esforços em ajudar na minha dissertação. As amigas de curso Bárbara, Maria, Mariana e Cassiana.

A Natalia, mestranda da UFPB, pelo apoio no refinamento das análises de DRX.

Aos técnicos Agilson, Fabíola, Everton pela colaboração nos ensaios, em especial ao amigo Henrique pela total disponibilidade, gentileza e agilidade nas demandas de laboratório.

Por fim, a todos muito obrigada!

RESUMO

O município de Caruaru, junto aos que estão no seu entorno, são caracterizados por indústrias de cerâmica vermelha e de cerâmica branca (louças sanitárias). Com uma média de 180 mil louças sanitárias por mês, desencadeia-se a problemática de impactos ambientais associados à extração de argilominerais, emissões de gases de efeito estufa e forma de descarte de produtos defeituoso e resíduos dos processos. Na fabricação de louças sanitárias por fundição, os moldes são de gesso, e não costumam ter destinação final adequada, o que pode resultar em contaminação de solos e águas, devido ao poder tóxico dos componentes de gesso. Já na produção de cerâmica vermelha, observa-se uma vasta utilização de argila, causando danos ao meio ambiente na extração, além do elevado consumo energético e emissões de gases poluentes. Neste trabalho, foi realizado um estudo para avaliar o uso de resíduo de gesso alfa (RGA) dos moldes de louça sanitária para fabricação de tijolos cerâmicos em substituição parcial do material argiloso. Foram produzidos tijolos cerâmicos por prensagem uniaxial, usando massa cerâmica nos percentuais de 0, 5, 10 e 15%, e sinterizados a 750°C e 850°C. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios tecnológicos para medida de desempenho de acordo com as Normas ABNT correspondentes. Os resultados obtidos mostram que o material argiloso utilizado é rico em fases de feldspato, montmorilonita e illita, o que favoreceu a queima dos tijolos em temperaturas mais baixas (750°C e 850°C) que as usualmente empregadas na indústria. Isso favorece o uso do resíduo de gesso sem causar sua decomposição. O percentual de 5% de substituição de material argiloso por RGA no sistema cerâmico obteve melhores resultados de desempenho tecnológicos, para ambas as temperaturas de sinterização estudadas, por resultar em perdas discretas de desempenho em relação aos tijolos sem resíduo. Apesar do desempenho tecnológico dos tijolos com maiores percentuais de RGA ainda estarem dentro dos limites permitidos, a tendência em perda de desempenho sugere que não são tão seguros quanto o percentual de 5%. De acordo com os espectros de FTIR e os difratogramas de raios X, não ocorre a decomposição do RGA em todas as massas cerâmicas estudadas, não resultando na emissão de gases de enxofre que tem potencial poluidor para a atmosfera. Conclui-se que a produção de tijolos cerâmicos é uma forma adequada para destinação do RGA.

Palavras-chave: Gesso. Resíduo. Cerâmica vermelha.

ABSTRACT

The municipality of Caruaru, along with those around it, is characterized by red ceramic and white ceramic (sanitary ware) industries. With an average of 180 thousand sanitary pieces per month, the problem of environmental impacts associated with the extraction of clay minerals, emissions of greenhouse gases, and the way of disposing of defective parts and process residues is triggered. In the foundry sanitary ware industry, the molds for making the parts are manufactured with plaster and do not usually have an adequate final destination, which can result in soil and water contamination, due to the toxic power of the plaster components. In the production of red ceramics, there is wide use of clay, causing damage to the environment in the extraction, in addition to high energy consumption and emissions of polluting gases. In this work, a study was carried out to evaluate the use of alpha plaster residue (RGA) from sanitary ware molds for the manufacture of ceramic bricks in partial replacement of the clay material. Ceramic bricks were produced by uniaxial pressing, using ceramic mass in the percentages of 0, 5, 10, and 15%, and sintered at 750 ° C and 850 ° C. The samples were subjected to technological tests to measure performance by the corresponding ABNT Standards. The results obtained show that the clay material used is rich in phases of feldspar, montmorillonite, and illite, which favored the burning of the bricks at lower temperatures (750 ° C and 850 ° C) than those usually used in the industry. This favors the use of plaster residue without causing it to decompose. The percentage of 5% substitution of clay material by RGA in the ceramic system obtained better technological performance results, for both studied sintering temperatures, as it results in discrete performance losses about bricks without residue. Despite the technological performance of bricks with higher percentages of RGA are still within the permitted limits, the trend in loss of performance suggests that they are not as safe as the percentage of 5%. According to FTIR spectra and X-ray diffractograms, RGA does not decompose in all studied ceramic masses, not resulting in the emission of sulfur gases that have a polluting potential of the atmosphere. It is concluded that the production of ceramic bricks is an adequate way to the destination of the RGA.

Keywords: Plaster. Residue. Red ceramic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática (a) e difratograma de raios X (b) da caulinita...	18
Figura 2 – Ilustração esquemática (a) e difratograma de raio X (b) da illita.....	19
Figura 3 – Ilustração esquemática (a) e difratograma de raios X (b) da montmorilonita.....	20
Figura 4 – Ilustração esquemática (a) e difratograma de raios X (b) da mica.....	22
Figura 5 – Equipamentos usados para processamento do RGA.....	37
Figura 6 – Representação das etapas de produção dos tijolos cerâmicos com RGA.....	41
Figura 7 – Distribuição granulométrica da argila plástica (AP).....	44
Figura 8 – Distribuição granulométrica da argila pouco plástica (APP).....	45
Figura 9 – Distribuição granulométrica do gesso.....	45
Figura 10 – Difratogramas de raios X das argilas.....	48
Figura 11 – Difratograma de raios X do RGA.....	51
Figura 12 – Espectro de FTIR do gesso.....	52
Figura 13 – Espectros de FTIR da argila plástica e da argila pouco plástica.....	53
Figura 14 – Espectro de FTIR dos tijolos sem RGA queimados a 750°C e 850°C..	58
Figura 15 – Espectros de FTIR dos tijolos com 5% de RGA queimados a 750 e 850°C.....	59
Figura 16 – Espectros de FTIR dos tijolos com 10% de RGA queimados a 750 e 850°C.....	60
Figura 17 – Espectros de FTIR dos tijolos com 15% de RGA queimados a 750 e 850°C.....	60
Figura 18 – Diagramas de raios X das argilas e dos tijolos sem RGA queimados a 750°C e 850°C.....	61
Figura 19 – Diagramas de raio X dos tijolos queimados a 750°C.....	62
Figura 20 – Diagramas de raios X dos tijolos queimados a 850°C.....	63

LISTA DE FOTOGRAFIA

Fotografia 1 – Tijolos após queima.....	41
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Retração linear dos tijolos após queima a 750°C e 850°C.....	54
Gráfico 2 –	Tensão de ruptura à flexão dos tijolos após queima a 750°C e 850°C.....	55
Gráfico 3 –	Absorção de água dos tijolos após queima a 750°C e 850°C.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Transformações das argilas no processo de sinterização.....	24
Tabela 2 –	Transformações estruturais que ocorrem nos tijolos cerâmicos durante o aquecimento.....	25
Tabela 3 –	Transformações térmicas da gipsita.....	27
Tabela 4 –	Detalhamento de resíduos incorporados em massas cerâmicas.....	28
Tabela 5 –	Alguns trabalhos incorporando gesso, borogesso e fosfogesso em materiais cerâmicos.....	30
Tabela 6 –	Testes tecnológicos e seus pormenores relacionados com a fabricação das cerâmicas.....	31
Tabela 7 –	Efeitos da incorporação do resíduo de gesso em argilas.....	32
Tabela 8 –	Composição das massas cerâmicas com RGA.....	40
Tabela 9 –	Limite de Atterberg das argilas.....	46
Tabela 10 –	Composição química das argilas e RGA.....	46
Tabela 11 –	Percentual das fases cristalinas nas argilas obtidas pelo programa TOPAS.....	49
Tabela 12 –	Percentual das fases cristalinas no RGA obtidas pelo programa TOPAS.....	51
Tabela 13 –	Bandas de absorção no espectro de infravermelho das argilas.....	53
Tabela 14 –	Aplicabilidade dos corpos de provas cerâmicos.....	55
Tabela 15 –	Quantificação das fases das argilas e da mistura delas após queima a 750°C e 850°C.....	62
Tabela 16 –	Quantificação das fases da matéria-prima e dos tijolos queimados a 750°C e 850°C.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1	Produção de cerâmica vermelha.....	16
3.2	Processo de fabricação.....	16
3.3	Argilas.....	17
3.4	Sistema água mais argila.....	22
3.5	Transformações das argilas durante o processo de sinterização.....	23
3.5.1	<i>Gipsita.....</i>	26
3.5.2	<i>Gesso.....</i>	26
3.6	Incorporação de resíduos industriais na cerâmica vermelha.....	27
3.7	Resíduos de gesso em cerâmica vermelha.....	29
3.8	Processamento da massa cerâmica.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1	Materiais para análises dos tijolos.....	36
4.1.1	<i>Massa cerâmica.....</i>	36
4.1.2	<i>Gesso.....</i>	36
4.2	Métodos.....	37
4.2.1	<i>Caracterização das matérias-primas.....</i>	37
4.2.1.1	<i>Análise granulométrica.....</i>	37

4.2.1.2	<i>Análise química</i>	37
4.2.1.3	<i>Análise mineralógica – DRX</i>	38
4.2.1.4	<i>Análise de espectroscopia de infravermelho - FTIR</i>	38
4.2.1.5	<i>Análise da plasticidade</i>	38
4.2.1.6	<i>Limite de liquidez (LL)</i>	38
4.2.1.7	<i>Limite de plasticidade (LP)</i>	39
4.2.1.8	<i>Índice de plasticidade (IP)</i>	39
4.2.2	<i>Elaboração das composições</i>	40
4.2.3	<i>Ensaio de desempenho tecnológico</i>	42
4.2.3.1	<i>Retração linear</i>	42
4.2.3.2	<i>Absorção de água</i>	42
4.2.3.3	<i>Tensão de ruptura à flexão</i>	43
5	RESULTADOS	44
5.1	Granulometria	44
5.2	Limites de consistência das argilas	45
5.3	FRX	46
5.4	DRX	47
5.5	FTIR	51
5.6	Desempenho tecnológico dos tijolos com RGA	54
5.6.1	<i>Retração linear</i>	54
5.6.2	<i>Tensão de ruptura à flexão</i>	55
5.6.3	<i>Absorção de água</i>	56
5.7	FTIR dos tijolos queimados	57
5.8	DRX dos tijolos queimados	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Políticas públicas ambientais ganham cada vez mais espaço na consciência global. Empresas que não adotam medidas de redução de custos e desenvolvimento sustentável acabam ficando ultrapassadas, diante dos tratados internacionais e leis ambientais que impõem que atividades industriais controlem suas emissões e impactos ao meio ambiente. O município de Caruaru, conhecido como a capital do Agreste Pernambucano possui um papel fundamental no polo industrial da Micro-região do Vale do Ipojuca, sendo caracterizada por indústrias do ramo da cerâmica vermelha com fabricação de telhas, tijolos e cerâmica branca com fabricação de louças sanitárias. Elas potencializam o poder econômico da região, mas aliado a isso e tão relevante quanto, observa-se uma grande demanda de matéria-prima, emissão de gases poluentes e geração de resíduos sólidos, alguns até de descartes específicos que também potencializam a contribuição da região para a degradação ambiental.

No entanto, a resolução 307/2002 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente para efetivar a redução de impactos ambientais determina procedimentos, diretrizes e critérios para o descarte ou destinação de diferentes tipos de resíduos, normas brasileiras da ABNT também classificam os resíduos e abordam terminologias de coleta, reaproveitamento e descarte. Sendo importante frisar que as indústrias são os maiores produtores de resíduos sólidos, e às vezes por considerar que o cumprimento de todas essas exigências é oneroso, trabalhoso e entre outros, ainda é corriqueiro o descarte inadequado, ocasionando drásticas agressões ao meio ambiente, segurança e saúde pública.

Em se tratando das indústrias de cerâmica branca, existe uma problemática de resíduos provenientes dos moldes para fabricação de louças sanitárias. Segundo dados de Junior *et al* (2010), o quantitativo dos moldes residuais da fabricação de louças sanitárias equivale ao quantitativo de 5% a 8% de peças fabricadas. Sendo um resíduo sem aplicações economicamente viáveis para reciclagem 307/2002 do CONAMA, o seu descarte pode se tornar dispendioso, e quando feito de maneira aleatória, sem cumprimento das diretrizes dos órgãos regulamentadores, pode culminar na contaminação de solos e águas. Dessa forma, se tornam primordiais medidas que busquem reutilizar o resíduo de gesso, dada a relevância do seu potencial contaminador e gerador de custos para descarte.

Já no caso das indústrias de cerâmica vermelha, ocorre a utilização exacerbada de argilominerais que são a principal matéria-prima do processo, podendo provocar o seu esgotamento. Por isso, vários pesquisadores estão investindo em composições de massas cerâmicas com incorporação de resíduos, avaliando e certificando a capacidade da argila em

estabilizar determinados resíduos e mesmo assim ainda conseguir atender as normas vigentes e especificações do produto. Com isso, observa-se a importância desses estudos para a redução do uso da matéria-prima necessária para fabricação do produto e o reaproveitamento de resíduos.

O uso de diferentes tipos de gesso como o fosfogesso, o borogesso e o gesso residual de construção civil em massa cerâmica Cipriano (2019), Abi (2014), Duarte (2008), Silva (2008) têm apresentado resultados satisfatórios quando usado em percentuais inferiores a 30%. Os estudos mostram que o gesso causa algumas interferências nas propriedades tecnológicas das massas cerâmicas, mas ainda atendendo às exigências mínimas das normas vigentes. Entretanto, o gesso residual da indústria de louças sanitárias, que é constituído por sulfato de cálcio hemihidratado na forma alfa, ainda não foi estudado para estas aplicações, e por ser cristalograficamente diferente e ter melhor desempenho mecânico do que a forma beta, pode produzir materiais cerâmicos com propriedades diferentes. Em relação a temperatura, ocorre uma preocupação com a liberação do enxofre, pois passando dos 850°C espera-se que a sua liberação possa causar danos ao sistema cerâmico, tanto no aumento do índice de vazios como no desencadeamento de redes de microfissuras. Além disso, a incorporação do gesso em percentuais acima de 15% possui influências prejudiciais ao sistema cerâmico SILVA (2008). Desta maneira, nota-se a importância de estudos para aproveitar este resíduo diante do potencial poluidor destes moldes (gerados em grandes volumes na indústria de louça sanitária), atentando as observações já conhecidas sobre a concentração e temperatura de queima. Os sucessos de reaproveitamento de resíduos em massas cerâmicas tornam coerente a análise de substituição parcial de argilas no sistema cerâmico pelo resíduo em questão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a substituição parcial de material argiloso em tijolos cerâmicos por resíduo de gesso proveniente de moldes da fabricação de louças sanitárias.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a microestrutura e composição química e mineralógica do gesso residual de molde de louça sanitária;
- Avaliar propriedades tecnológicas após a incorporação do gesso a fim de obter os melhores teores de resíduo a ser incorporado na massa cerâmica;
- Relacionar o desempenho tecnológico dos tijolos cerâmicos produzidos em diferentes temperaturas de sinterização (750°C e 850°C) com as fases cristalinas e microestrutura dos tijolos cerâmicos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Produção de cerâmica vermelha

Para Callister (2002), a cerâmica ganhou um significado muito mais amplo com as descobertas tecnológicas, surgindo uma nova geração de materiais das indústrias de componentes eletrônicos, aeroespacial, comunicação, computadores e afins. Entretanto, os materiais mais aplicados e antes considerados como os mais importantes são os denominados de cerâmicas tradicionais ou cerâmicas vermelhas, ou seja, aqueles que têm como base a argila, englobando os utensílios domésticos como louças de porcelana, e os diversos materiais da construção civil como tijolos, azulejos, vidros, telhas, cerâmicas de alta temperatura, entre outros.

A cerâmica vermelha na Associação Brasileira de Cerâmica Vermelha - ABCERAM é classificada como a que compreende produtos de coloração avermelhada empregados na construção civil e em alguns usos domésticos. Trazendo uma estimativa de mais de 6000 indústrias cerâmicas e olarias no território nacional, observando a predominância de micro, pequeno e médio porte. Ela é considerada como um dos materiais mais antigos e utilizados na construção civil devido à abundância e facilidade de extração de sua matéria-prima, a argila; além da fácil produção e diversidade de artefatos duráveis (ABCERAM, 2019).

3.2 Processo de fabricação

No geral, a fabricação de produtos cerâmicos segue uma linha que se divide em etapas: i) a extração das argilas; ii) preparação da matéria-prima, que pode incluir ou não outros materiais além das argilas; iii) confecção dos moldes, que geralmente são por extrusão ou por prensagem; e iv) tratamento térmico, que às vezes pode seguir com uma posterior etapa de acabamento (ROCHA; SOARES; GUIMARÃES, 2014).

i) Extração das argilas: para classificar uma possível jazida de argila é necessário a realização de estudo das características mineralógicas das argilas e do volume que poderá retirar, verificando a viabilidade em relação à qualidade e quantidade de argilas como também todo o processo para a extração (PETRUCCI, 2003).

ii) Preparação da matéria-prima: compreende a etapa que antecede o processo de fabricação, o material passa pela depuração para retirada de impurezas que possam prejudicar

o material, pela divisão para redução em pequenos fragmentos e separar aqueles que precisam de trituração, moagem e peneiramento, pela homogeneização que se trata de uma etapa primordial para alcançar um produto de qualidade e pela umidificação onde a água será inserida no sistema (PETRUCCI, 2003).

iii) Confeção dos moldes: geralmente são obtidos por extrusão ou prensagem que demandarão diferentes consistências de pastas, sempre se busca utilizar pastas mais secas sem prejuízo à plasticidade necessária (PETRUCCI, 2003).

iv) Tratamento térmico: antes da queima o material passa pelo processo de secagem para remoção de boa parte da umidade, que pode ser de maneira natural, ao ar livre, ou artificial, em secadores. Posteriormente inicia-se a etapa de queima em fornos de altas temperaturas, provocando reações nos minerais das argilas, dando-lhes propriedades de uso (PETRUCCI, 2003).

3.3 Argilas

Segundo Gomes (1986), a argila pode ser classificada como um material natural de propriedades plásticas, como rocha sedimentar com partículas muito finas, como uma fração mais ativa do solo, como aquele que se enquadra na faixa granulométrica inferior a $2\mu\text{m}$ e como um material formado por argilominerais. Souza Santos (1928) traz a teoria de que as argilas são constituídas principalmente por argilominerais que dão as características primordiais, podendo conter outros minerais que vão agir como fundentes, outros que geralmente são inertes e servem de enchimento, como também pode conter matéria orgânica e impurezas. Ainda classifica os argilominerais como silicatos de alumínio hidratados, possuindo em determinados casos outros elementos como magnésio, cálcio, sódio, potássio, ferro, lítio entre outros.

Para definir as propriedades de uma argila, é necessário analisar a composição mineralógica e granulometria dos argilominerais e não-argilominerais, a natureza e teor da matéria orgânica, o teor qualitativo e quantitativo de eletrólitos dos cátions trocáveis e dos sais solúveis, além das características de textura (GRIM, 1968).

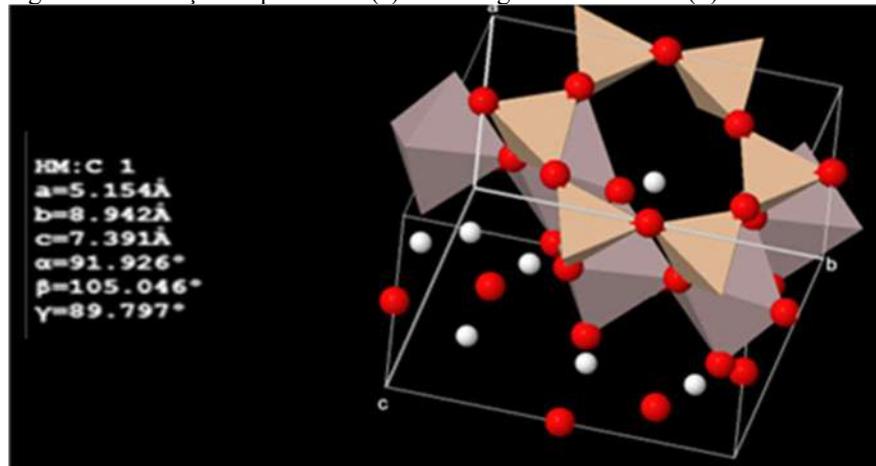
De acordo com Souza Santos (1928), as argilas são formadas em sua maioria por ligações iônicas em estruturas cristalinas coloidais, constituídas essencialmente por tetraedros de silício e octaedros de alumínio. O que distingue os argilominerais são, fundamentalmente, o tipo de estrutura e as substituições (do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro) que podem ocorrer dentro da estrutura, principalmente, e ter como consequência a

neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions.

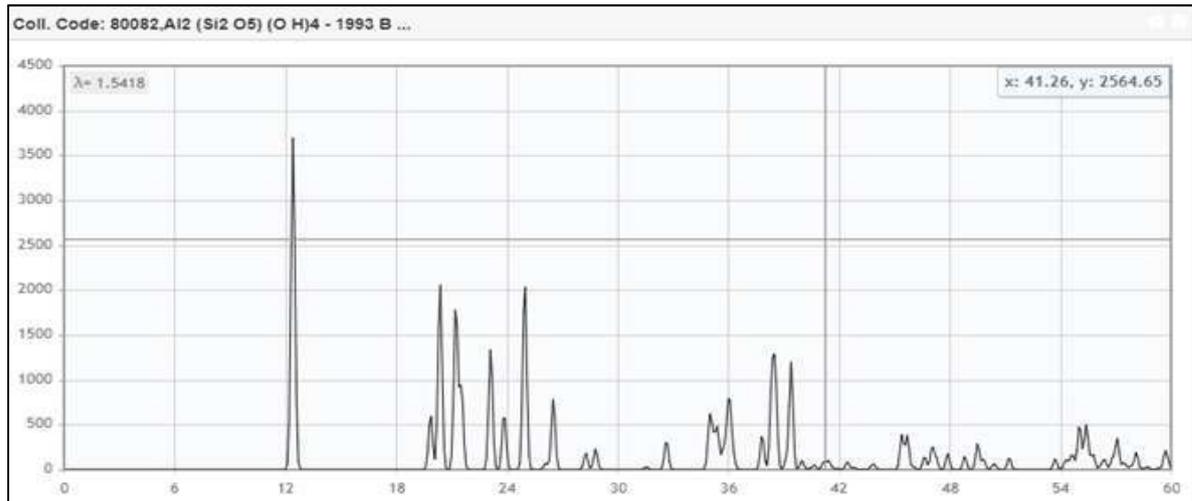
A seguir, as principais características dos argilominerais mais comuns (SOUZA E SANTOS, 1928):

- A caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é o argilomineral mais frequente na natureza, possui empilhamento regular 1:1, com ligações através do oxigênio em comum. Na Figura 1(a), é possível observar a ilustração em 3D da célula unitária do argilomineral caulinitico e, na Figura 1(b), o difratograma de raios X característico deste material. A caulinita possui coloração esbranquiçada após queima, com perda de massa e contração linear elevada, no qual pura não se enquadra para cerâmica vermelha, porém é comum encontrar-se misturada com óxido de ferro, grãos de areia e outros em pequena concentração. No geral, as argilas cauliniticas possuem alto teor de óxidos de silício e alumínio, como também, baixo teor de álcalis (K_2O , Na_2O , CaO). O baixo teor de óxidos fundentes, nessas argilas, resulta numa fase líquida mais lenta, peças mais densas e sem deformações, porém com menor absorção e pouco plástica.

Figura 1 - Ilustração esquemática (a) e difratograma de raios X (b) da caulinita.



(a)



(b)

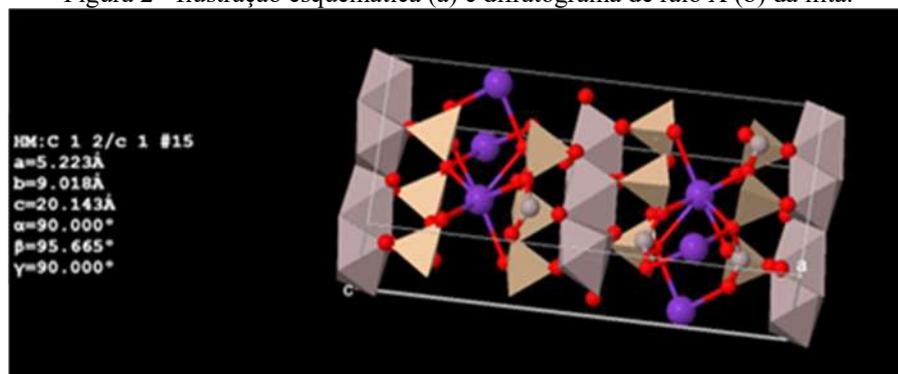
FONTE: ICSD # 30996.

(Disponível em: http://icsd-fiz-karlsruhe-de_proxy.dotlib.com.br/display/details.xhtml)

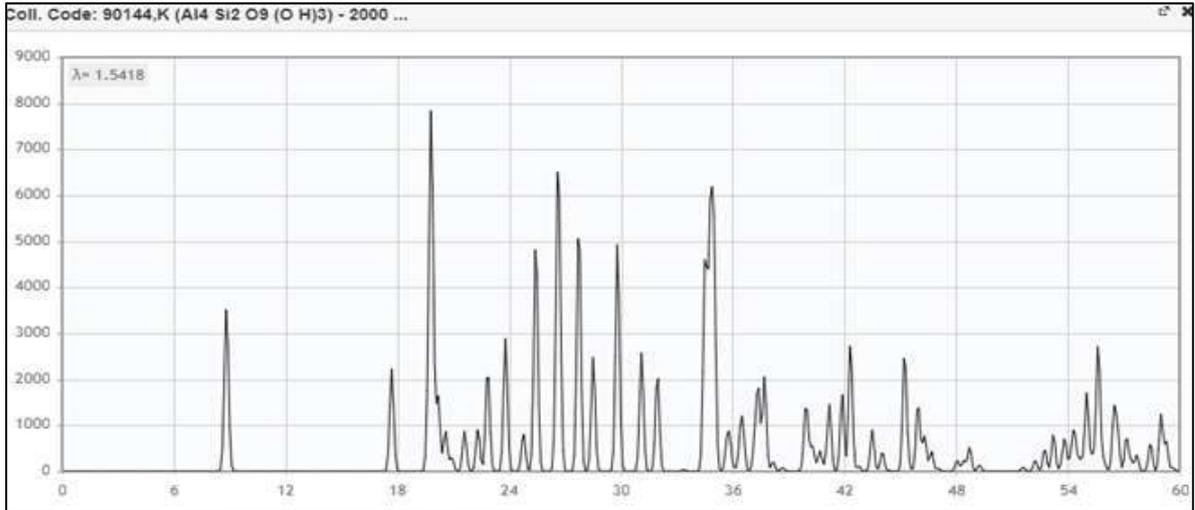
- A illita $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$ que pode ser encontrada em argilas, argilitos e xistos, de empilhamento regular 2:1 com ligações através do oxigênio em comum. A representação esquemática em 3D da illita e o difratograma de raios X característico desse argilomineral podem ser observados na Figura 2. A illita possui camadas rigidamente ligadas e que não expandem, o alumínio é o cátion dominante, porém pode ter magnésio e ferro, possui silicato de alumínio hidratado com elevado grau de óxido de potássio, podendo contribuir para a coloração mais avermelhada e se tornando assim uma argila mais plástica de fácil moldagem e bom desempenho na secagem. Por possuir o teor mais elevado de óxidos fundentes, a fase líquida se dá numa temperatura mais baixa e com forma mais acentuada.

•

Figura 2 - Ilustração esquemática (a) e difratograma de raio X (b) da illita.



(a)



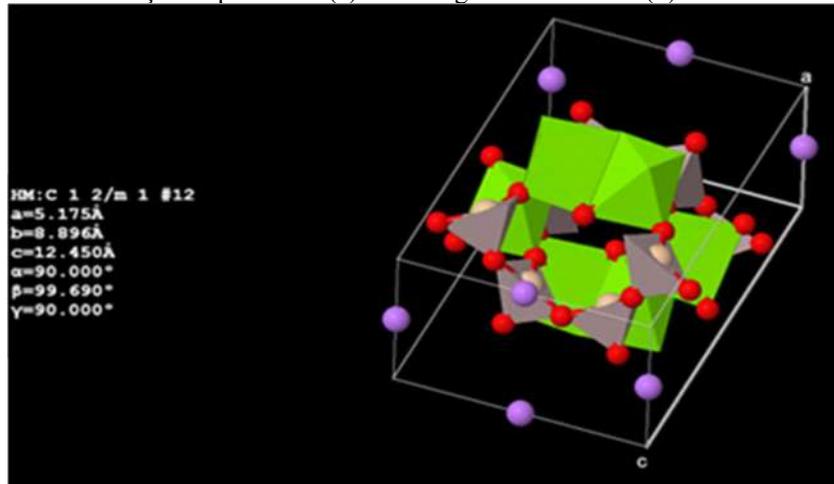
(b)

FONTE: ICSD # 90144, 2020.

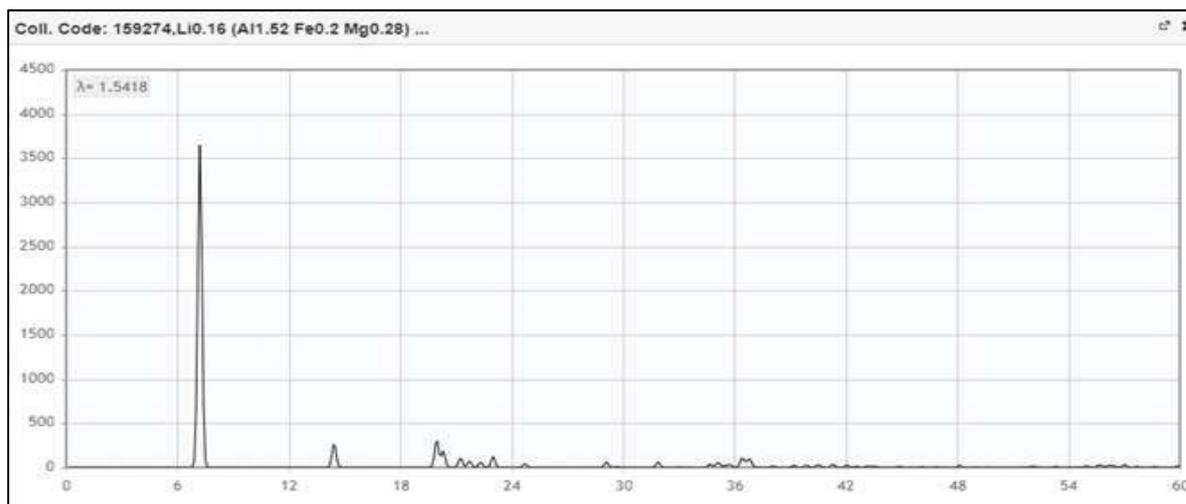
(Disponível em: http://icsd-fiz-karlsruhe-de_proxy.dotlib.com.br/display/details.xhtml)

- Montmorilonita, sendo mais encontrada em bentonitas (rochas de cinzas vulcânicas), possui o empilhamento regular 2:1 com ligações através do oxigênio em comum. Sendo possível identificar na Figura 3 (a) a ilustração em 3D de como as ligações se enquadram no argilomineral montmorilonítico e na Figura 3 (b) os picos característicos desse argilomineral. A montmorilonita possui elevado grau de propriedades plásticas e coloidais, caracterizada por silicato de alumínio e/ou magnésio hidratado e por sua capacidade de absorver moléculas de água provoca dilatações higroscópicas e concentrações acima de 3% em argilas pode causar grandes variações linear na secagem e na queima, porém em quantidades pequenas melhora a trabalhabilidade (SILVA; 2008).

Figura 3 - Ilustração esquemática (a) e difratograma de raios X (b) da montmorilonita.



(a)



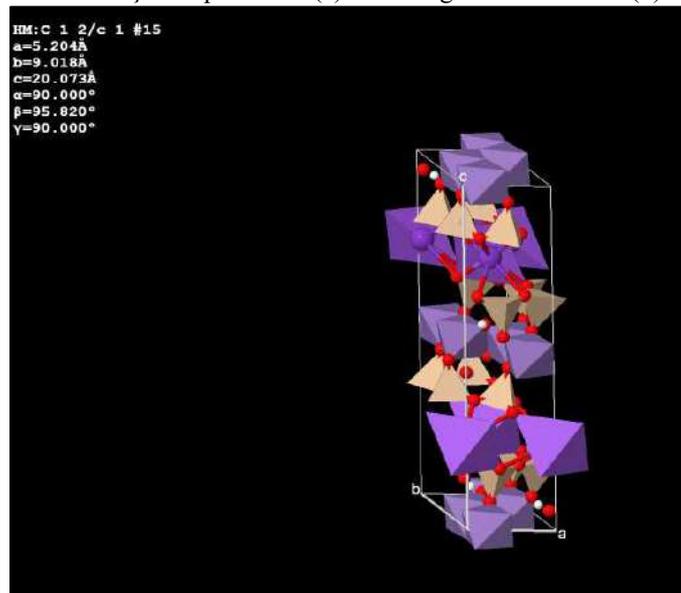
(b)

Fonte: ICSD # 159274.

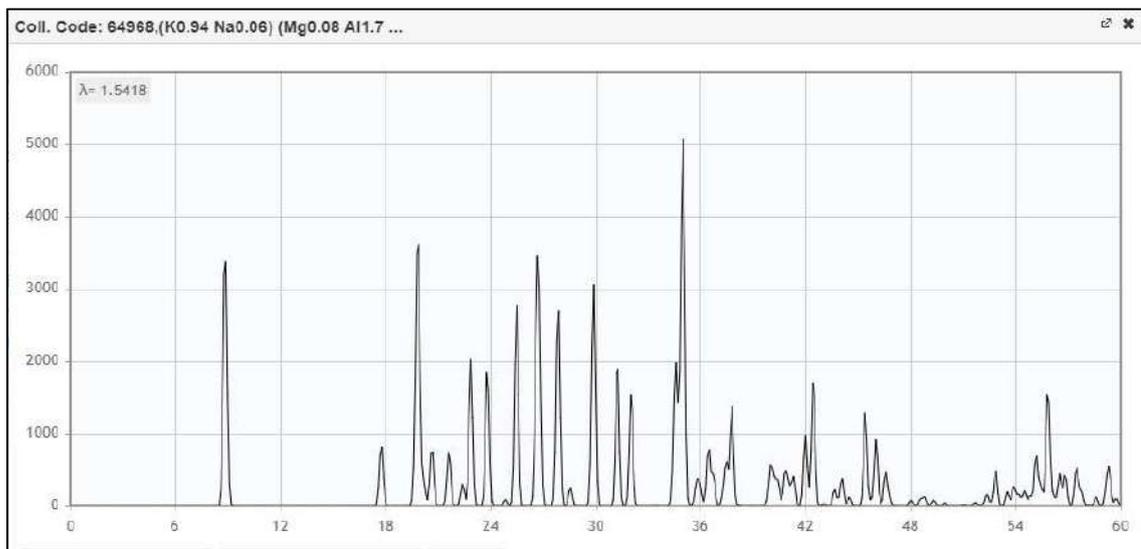
(Disponível em: http://icsd-fiz-karlsruhe-de_proxy.dotlib.com.br/display/details.xhtml)

Além de argilominerais, as argilas podem conter quartzo, silte, areia, feldspatos, impurezas de matéria orgânica e outros minerais como a mica. A mica é a denominação genérica de minerais do grupo dos filossilicatos, cujas variedades mais comuns do ponto de vista comercial são: muscovita (sericita), flogopita, lepidolita e vermiculita. Esses minerais são formados por átomos de silício, alumínio e oxigênio, intercalados por cátions (Na, K, Ca) e/ou ânions (Mg, Fe, Mn, Al, OH), que conferem propriedades físico-químicas específicas para cada tipo de mica. A Figura 4 apresenta a representação esquemática e o difratograma de raios X da Mica. Possuem aspecto lamelar devido às suas estruturas cristalinas, caracterizadas pela alternância de camadas de tetraedros de Si (\pm Al) e O, intercaladas por cátions com fracas ligações químicas que permitem o desfolhamento do mineral em lâminas ou placas (folhas). Dentre os tipos comercializadas mais comuns, destaca-se a muscovita [$\text{KA}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH},\text{F}_2)$], que se apresenta na forma de placas (sheets) ou moída (ground). A mica moída predomina em volume comercializado, mas a mica em placas se destaca com um maior valor, devido à qualidade, tamanho, espessura de suas folhas e seu uso na indústria (DNPM, 2012).

Figura 4 - Ilustração esquemática (a) e difratograma de raios X (b) da mica.



(a)



(b)

Fonte: ICSD#64968.

(Disponível em: http://icsd-fiz-karlsruhe-de_proxy.dotlib.com.br/display/details.xhtml)

3.4 Sistema água mais argila

De acordo com o tipo de produto que se pretende obter, definem-se os materiais e processos de execução. No caso de tijolos, dependendo da matéria-prima ela pode passar pela moagem ou trituração e peneiramento, posteriormente é umedecida, conformada ao ponto de lhe conferir resistência mecânica para passar pelo processo de transporte, secagem e cozimento. Na secagem, há uma preocupação com a taxa de evaporação para não ser maior que a taxa de difusão e provocar defeitos na superfície do molde. Na queima, quando o material é exposto a

altas temperaturas, acontecem reações complexas e intrincadas como a vitrificação, processo pelo qual ocorre a formação gradual de um sólido em líquido que flui para o interior e vai preenchendo os poros existentes.

A água exerce um papel fundamental na plasticidade, viscosidade, tixotropia, poder ligante e resistência no estado verde de um tijolo. Denominada de água adsorvida à superfície dos argilominerais, ela pode ser retirada em baixas temperaturas como 100°C e 150°C, porém dependendo das estruturas moleculares dos argilominerais a água também pode se encontrar de maneira intercalada entre as camadas tetraédricas e octaédricas ou dentro de canais tubulares que necessitam de maiores temperaturas para sua retirada.

O sistema argila mais água é bastante influenciado pela estrutura molecular dos minerais, por exemplo, um material com íons pequenos permite encaixes nos vazios dos agrupamentos de moléculas de água aumentando a tendência de originar estruturas orientadas ou quase cristalinas. A forma geométrica também influencia a tal ponto de provocar o enfraquecimento ou total destruição da camada de adaptação de água adsorvida ao argilomineral. Essas configurações são importantes, uma vez que fatores primordiais dependem delas. Como a plasticidade que se dá quando a argila possui a “água rígida”, ou seja, a água suficiente para cobrir a superfície dos argilominerais, e a “água líquida”, ou seja, a não orientada que age como meio lubrificante tornando possível a moldagem. A resistência no estado verde está associada ao fato das partículas estarem ligadas entre si na forma úmida, por conta das moléculas de água orientadas ficarem presas na superfície dos argilominerais.

3.5 Transformações das argilas durante o processo de sinterização

A sinterização se trata de um processo de transformação de um pó em um corpo sólido, caracterizando a etapa mais importante na obtenção de uma cerâmica (CARTER, NORTON, 2007). Nesse processo, busca-se unir as partículas sem fundí-las, embalando esferas de vários tamanhos juntas, percebendo que um corpo recém-formado certamente não possuirá densidade em 100%, principalmente em esferas que costumam possuir o mesmo tamanho, pois provocará vazios ao seu redor. Dessa maneira, existe uma preocupação com a taxa de vitrificação, líquido que flui para o interior preenchendo os poros, que deverá ser atingida no processo de sinterização em prol de garantir a densificação ou porosidade da peça de acordo com a necessidade.

Durante essa etapa, percebe-se que é possível a remoção de materiais voláteis. Mesmo pensando na sinterização como um fenômeno de estado sólido, o componente gasoso pode se

formar, uma vez que a água e outros componentes são removidos, podendo ser a própria matéria orgânica ou até elementos nocivos. Por esses tantos motivos que se deve conhecer bem o material que será sinterizado, quais as possíveis reações e transformações que ocorrerão à medida que a temperatura aumenta, pois se trata de informações essenciais para tomada de decisões do ponto de vista econômico e ecológico, já que cada vez mais se busca atingir materiais que atendam as especificações com o mínimo de agressão ambiental e reduções de custos. Ainda, Santos (1975) traz as transformações mais corriqueiras de certos argilominerais quando submetidos ao processo de sinterização, conforme Tabela 1:

Tabela 1 - Transformações das argilas no processo de sinterização.

Argilas	Descrição do processo de sinterização
Caulinita	<ul style="list-style-type: none"> • Em 110°C ocorre a retirada da água adsorvida. • Em 450°C ocorre a reação de desidroxilação até 600°C, dando origem a metacaulinita. • Por volta dos 950°C a retração linear de queima atinge seu valor máximo, como também entre 950°C e 1225°C inicia-se a vitrificação por conta da liberação de cristobalita. • Em 975°C ocorre um pico exotérmico máximo, que no caso das caulinitas bem cristalizadas vão apresentar um pequeno pico endotérmico antes, aos 950°C. • Em 1100°C percebe-se com facilidade a cristobalita, que ocorre quando a fase espinélio alumínio-silício se transforma numa mulita mais rica em sílica que em seguida se tronará uma mulita com mais liberação de cristobalita. • Em 1125°C ocorre o pico exotérmico referente a transformação completa de epinélio em mulita, com liberação de sílica. • Em 1470°C ocorre o pico de cristalização da cristobalita. • Em 1750°C ocorre a fusão completa do sistema.
Montmorilonita	<ul style="list-style-type: none"> • Em 100°C e 250°C ocorre o pico endotérmico de retirada da água adsorvida. • Em 400°C e 700°C ocorre a perda de hidroxilas estruturais. • Em 800°C inicia-se a retração de queima indo até 900°C. • Entre 800°C e 930°C ocorre um pico endo-exotérmico, o primeiro pico exotérmico provoca a destruição do reticulado cristalino, e o segundo ocorre a formação de quartzo-alfa ou beta de mulita. • Em 1400°C e 1500°C ocorre a fusão completa. • As argilas montmorilonitas não são argilas refratárias.
Ilitas	<ul style="list-style-type: none"> • Entre 100°C e 200°C, com o pico máximo em 150°C, ocorre o pequeno pico endotérmico referente a retirada de água intercalada entre as camadas. • Entre 450°C e 600°C, com pico máximo em 530°C ou 550°C, ocorre um pequeno pico endotérmico de retirada de água de hidroxilas, que no caso das ilitas trioctaédricas provoca a destruição da estrutura cristalina, já nas dioctaédricas não ocorre essa destruição. • Acima de 600°C percebe-se uma pequena expansão • Entre 880°C e 930°C ocorre um pico endo-exotérmico, com picos máximos de 900°C e 920°C respectivamente, percebe-se a perda da estrutura cristalina aos 900 °C no pico endotérmico e a formação do epinélio aos 910 °C no pico exotérmico. • Em 1200°C ocorre pequeno pico exotérmico de formação de mulita.

Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Souza e Santos (1975).

Quando usadas para produção de tijolos cerâmicos, os diversos componentes das argilas sofrem transformações durante o tratamento térmico. O grau em que estes processos acontecem estão relacionados aos componentes presentes e sua concentração. As principais transformações observadas nos materiais argilosos, durante o aquecimento da massa cerâmica, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Transformações estruturais que ocorrem nos tijolos cerâmicos durante o aquecimento.

Intervalo de temperatura	Transformação
20 a 150°C	Perda de água livre, o forno funciona como um secador, destacando que as moléculas de água ("água interna") do cristal de argila permanecem na massa
Até 200°C	Eliminação de água coloidal, que permanece intercalada entre as pequenas partículas de argilominerais depois da secagem, bem como a água proveniente da matéria orgânica
~280°C	Desidroxilação de gibbsita $[Al(OH)_3]$, quando houver.
320 a 360°C	desidroxilação da goethita $[FeO(OH)]$, quando houver
350 a 650°C	Decomposição de carbonatos, quando houver. Inicialmente, dissociação do carbonato de magnésio e, em temperaturas mais elevadas, cerca de 800 °C, ocorre a dissociação do carbonato de cálcio.
450°C a 650°C	Decomposição dos minerais de argila propriamente ditos, com liberação de água de constituição (quimicamente combinada), constituinte fundamental da argila contendo sílica e alumina. Neste momento, as propriedades argilosas serão perdidas de modo irreversível
~570°C	Quartzo α se transforma, rapidamente, na forma β , ocorrendo uma expressiva expansão (durante o resfriamento, nessa temperatura, ocorre retração)
700 a 900°C	Início da fusão dos álcalis e óxido de ferro. A partir de 700 °C a resistência atinge um mínimo aceitável.
Acima de 700°C	Ocorrem reações químicas da sílica e da alumina com os elementos fundentes, formando sílico-aluminatos que são responsáveis pela resistência física, química e pela estabilidade da peça cerâmica
~ 800°C	Ocorre dilatação máxima
900 a 950°C	Ocorre retração de sinterização e, portanto, as transformações mineralógicas. Então, em uma variação de temperatura muito curta, ocorre um aumento rápido de retração
A partir de 1000°C	Ocorre a reorganização dos cristais formando nova estrutura cristalina. Pode-se observar um aumento de resistência mecânica. A diminuição da absorção de água evidencia o fechamento dos poros com mais ligações vítreas.

Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Guimarães (2017).

Como pode ser observado no quadro acima, há vários processos que ocorrem sucessivamente durante o tratamento térmico dos tijolos cerâmicos, o que requer o conhecimento da composição da matéria-prima e adequada condução do ciclo de queima para permitir que as s propriedades finais do produto sejam atingidas.

É importante destacar que as reações que ocorrem nos corpos cerâmicos durante o processamento da queima variam em função do tipo de argila utilizada no processo de fabricação. Em argilas caulínicas, onde os percentuais de óxidos de sódio e de potássio juntos são inferiores a 2%, a temperatura de queima varia entre 900 e 1000 °C. Já nas argilas íliticas, os percentuais superam 5% e as temperaturas são menores (entre 825 e 850 °C). A vitrificação dos óxidos Na_2O e K_2O iniciam a temperaturas relativamente baixas (700 °C), formando um

vidro viscoso. Na etapa de queima da cerâmica, o quartzo age como material inerte, servindo como um “esqueleto” envolvido pela fase líquida formada. Já os feldspatos atuam na formação de fase líquida e auxiliam na diminuição da porosidade. A mica muscovita é um mineral com morfologia lamelar que pode causar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas, como é constituída de óxidos alcalinos, eventualmente pode também atuar como fundente (GUIMARÃES, 2017).

3.5.1 Gipsita

A origem do gesso se dá na transformação da gipsita, que se trata de uma matéria-prima de abundância no Brasil. A gipsita é o material no estado natural, ou seja, o que é extraído da natureza, já o gesso é a gipsita que passou pelo processo de calcinação. A gipsita é um sulfato de cálcio hidratado com duas moléculas de água, tendo sua composição expressa em $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, geralmente apresenta uma média de 32,5% de CaO, 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O . A coloração varia entre as cores branca, cinza, amarronzada ou incolor, isso vai depender da composição e grau de impurezas contido no material, que eventualmente consiste em argilas, calcita, halita, domolita, enxofre, quartzo e anidra (SOBRINHO, 2001).

Ainda para Sobrinho (2001), mesmo sendo utilizada em grande escala na produção do gesso, a gipsita também é um material essencial para fabricação do cimento, pois sua adição no clínquer é fundamental para retardar a pega e possibilitar o tempo necessário para utilização do cimento na construção civil. Após o processo de moagem para adquirir a granulometria adequada, a gipsita é aplicada para correção de solos, já na forma anidra ela faz parte da fabricação de ácido sulfúrico, sulfato de amônio, cimento, barrilha, enxofre elementar, cloreto de cálcio, e carbonato de cálcio. Percebe-se então, que sua aplicação é vasta, sendo também utilizada em outras diversas áreas como carga para papel, na produção de discos, tintas, pólvora, botões de fósforos, no acabamento de tecidos de algodão, e como distribuidor e carga de inseticidas.

3.5.2 Gesso

Segundo Rocha (2007) o gesso é uma alternativa de material de construção de diversificada de prática aplicação, rapidez na execução, além de possuir propriedades de isolamento térmico, acústico, resistência a incêndio e baixo custo. Suas características acabam por tornar a utilização atrativa economicamente, no entanto, a crescente utilização aponta a

problemática dos impactos residuais, principalmente na construção civil que possui um baixo tempo de manipulação, o que acarreta ainda mais em desperdícios (FERNANDES; CAGNONI; FERREIRA, 2019).

A fabricação do gesso compreende as etapas de extração da gipsita, preparação para calcinação, calcinação e seleção. Na decomposição térmica, o sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) submetido às temperaturas de 140°C e 160°C libera 1,5 molécula de água, transformando o material em bassanita, tendo a composição de hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). A partir das temperaturas entre 160°C e 250°C se transforma em CaSO_4 como anidrita III. Nas temperaturas entre 250°C e 800°C , se torna anidrita II e acima de 800°C anidrita I (SILVA, 2008), conforme equações demonstradas na Tabela 3:

Tabela 3 – Transformações térmicas da gipsita.

Fase inicial	Fase após tratamento térmico	Sistema cristalino	Temperatura
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Sulfato de cálcio diidratado	$\rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ Bassanita	Monoclínico	140 a 160°C
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ Bassanita	$\rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \xi\text{H}_2\text{O}$ Anidrita III	Hexagonal	160 a 250°C
$\text{CaSO}_4 \cdot \xi\text{H}_2\text{O}$ Anidrita III	$\rightarrow \text{CaSO}_4$ Anidrita II	Ortorrômbica	250°C a 800°C
CaSO_4 Anidrita II	$\rightarrow \text{CaSO}_4$ Anidrita I	Cúbica	Acima de 800°C

Fonte: A Autora (2021).
Nota: Adaptado de Silva (2008).

Para a fabricação do gesso, a calcinação ocorre numa faixa de 140°C a 160°C . Nessa temperatura, ocorre a perda de 75% da água de cristalização, transformando a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na forma de hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$).

A forma de como essa perda de água ocorre é que vai conduzir à produção do gesso beta ou gesso alfa. Quando a calcinação é realizada a seco sob baixa pressão ou atmosférica dá origem ao gesso beta, e quando é realizada sob pressão de vapor de água saturante dará origem ao gesso alfa. No final, será percebido que o gesso alfa quando comparado ao beta possuirá melhores propriedades mecânicas, menor absorção de água, menor porosidade e maior estabilidade dimensional. Essa diferença entre os dois faz com que o gesso alfa seja aplicado em situações mais onerosas e mais nobres como a área hospitalar e o gesso beta com custos mais baixos, nas áreas de construção civil (SOBRINHO, 2001).

3.6 Incorporação de resíduos industriais na cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha é considerada como um dos materiais mais antigos e utilizados na construção civil devido à abundância e facilidade de extração de sua matéria-prima, a argila; além da fácil produção e diversidade de artefatos duráveis. No entanto, segundo Al - Fakh *et. al* (2019), a utilização exacerbada da matéria-prima pode culminar no seu esgotamento. Ainda, há a degradação ao meio ambiente, alto consumo energético e emissões de gases, em consequência das temperaturas elevadas de sinterização. Com isso, pesquisadores vêm buscando fabricação de cerâmicas vermelhas com substituição total ou parcial da argila em prol do desenvolvimento sustentável.

Além disso, a adição de resíduos na produção de cerâmica vermelha não está necessariamente relacionada com a melhoria nas propriedades, mas com a possibilidade de estabilização do resíduo em produtos que ainda atendem às normativas para aplicação (BRUXEL, 2012). Silva (2008) identificou como vantagem a redução nas temperaturas de sinterização. Dentre os trabalhos científicos identifica-se a utilização de vários tipos de resíduos na fabricação de cerâmica vermelha. A Tabela 4 destaca diversos trabalhos recentes que abordam o detalhamento dos resíduos incorporados em massas cerâmicas.

Tabela 4 - Detalhamento de resíduos incorporados em massas cerâmicas.

Autor	Resíduo	Considerações Finais
Goel (2017)	Sólidos Urbanos (5 – 20) %	Resistência C variou (27,2 a 9,96 Mpa), sem fissuras visíveis e eflorescência, diminuiu a retração linear.
Eliche-Quesada (2017)	Casca de arroz e Resíduos de cinzas de madeira (10 – 30) %	Resistência C variou (53,4 a 13,5 Mpa), absorção aumentou até 21,2 e 32,9%, aumentou porosidade até 10,8% e 7,3% sem fissuras visíveis e eflorescência, diminuiu a retração linear.
Kadir (2017)	Lodo de esgoto (0-20) %	Resistência C variou (5,53 a 7,18 Mpa), absorção aumentou de 8,22% para 19,69%, retração linear aumentou de 1,63% para 6,18%.
Ukwatta (2017)	Biossólidos (5-25)%	Resistência C variou (29,5 a 10,5 Mpa), absorção aumentou de 11,8% para 14,98%, retração aumentou.
Abbas (2017)	Cinza volante (0-25)%	Resistência F variou (5,7 a 3,0 Mpa), Resistência C variou (19 a 8,0 Mpa), aumentou absorção de 15% e 24%, aumentou a porosidade.
Kazmi (2018)	Lodo de vidro (5-25)%	Resistência C variou (10 a 12,56 Mpa), aumentou a absorção de 15% e 24%, aumentou porosidade.
Phonphuak (2016)	Resíduo de vidro (0-10) %	Resistência C variou (19,3 a 24,65 Mpa), diminuiu a absorção de 18,66% para 14,78%, reduziu porosidade, reduziu de 4,34% para 3,41%.
Sutcu (2015)	Pó de mármore (0-35) %	Resistência C variou (34,2 a 8,2 Mpa), absorção variou de 10,9% a 26,9%, aumentou a porosidade.
Hassan (2014)	Lamas de ferro e arsênio (3%- 12%)	Resistência à compressão variou (15,1 a 7,1 Mpa), absorção aumentou de 15% para 20%, retração linear diminuiu de 5,8 para 3,3%.

Fonte: A Autora (2021).

3.7 Resíduos de gesso em cerâmica vermelha

Dentre os possíveis resíduos que podem ser incorporados em cerâmica vermelha, estão os moldes de gesso que são descartados no processo, assim que perdem aderência com a barbotina na etapa de conformação para fabricação de louças sanitárias. A proposta de interação entre a argila e o gesso na fabricação de tijolos de cerâmica estrutural foi embasada no fato do sucesso das formulações desenvolvidas em Silva (2008), ratificando a possível compatibilidade no emprego do gesso em materiais cerâmicos sinterizados. A incorporação de fosfogesso em cerâmica vermelha também gerou benefícios nos tijolos estudados por Duarte (2008).

Além disso, no estado verde de mistura, a incorporação de gesso junto às argilas e água pode ser benéfica, uma vez que foram observadas melhorias na agregação de partículas em estudos com gesso agrícola (FAVARETTO *et al.*, 2006). Essa solução de solo mais concentrada comprime a dupla camada elétrica, fornece cálcio no complexo de troca de íons, favorecendo a agregação do solo (DONTSOVA; NORTON, 2002). No entanto, deve-se atentar que a presença do gesso pode contribuir para o aumento da capacidade de retenção de água do solo (BEUTLER *et al.*, 2002); assim, tempos maiores de secagem da peça verde antes da sinterização podem ser necessários.

A cada tonelada de peças produzidas são gerados de 50 kg a 80 kg de resíduo oriundo dos moldes (JUNIOR *et al.*, 2010). A problemática é exacerbada com o descarte inadequado desse material, muitas vezes em aterros clandestinos, com alto poder de contaminação de solos e águas, dada toxicidade aos seus componentes com a formação de gás sulfúrico e dióxido de enxofre, segundo exposto no relatório sobre números no segmento da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYWALL - ABRAGESSO. Sendo, ainda, considerado pela resolução 431/11 do CONAMA, Classe C, sendo assim, resíduo sem aplicações economicamente viáveis para reciclagem. Segundo o Sindusgesso em 2010, a produção nacional foi estimada em 2350 toneladas com expectativas de 6,2 mil em 2013, em 2008 com 2239 toneladas Pernambuco ficou com 95% da produção nacional, onde 3% foram para moldes cerâmicos.

O gesso comercial pode ser encontrado na forma beta, a mais utilizada na construção civil, e alfa, de propriedades mais nobres usado para fins médico-odontológico e algumas especificidades da construção. Segundo Soken (2015) ambos possuem a mesma estrutura mineralógica, partindo da gipsita $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e se transformado em hemidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Para Soares *et al.* (2005) a diferença consiste no processo de calcinação onde no beta ocorre em pressão atmosférica com temperatura de 110°C a 180°C. Já no alfa as

pressões são superiores às do beta com temperaturas acima de 120°C, gerando produtos de formato regular que permitem melhor compactação, maior densidade, menor porosidade e maior resistência em comparação ao beta (KANNO,2009).

Quando se trata de incorporação de resíduos, em geral, em cerâmica vermelha, é possível observar algumas porcentagens máximas de incorporação: a) 2,5% de adição de do resíduo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) (Areias *et al.*, 2017); 15% de incorporação de resíduos de gesso de revestimento (RGR) (Silva, 2008); 10% de resíduo de cerâmica hidrossanitária em cerâmica hidrossanitária (Silva, 2012); 5% de resíduo (lodo) de gemas (Bruxel, *et al.*,2012); 7,5 % de rejeito arenoso e 5,0% de rejeito de lama de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro (NOCITI, 2011)

Na Tabela 5, está compilado o estado da arte de autores que já trabalharam incorporando gesso, borogesso e fosfogesso em materiais cerâmicos, seja cerâmica vermelha, seja cerâmica hidrossanitária, relacionando o percentual de resíduo incorporado e temperatura de sinterização.

Tabela 5 - Alguns trabalhos incorporando gesso, borogesso e fosfogesso em materiais cerâmicos.

Autor/Ano	Resíduo	Percentual de gesso (%0	Temperaturas de sinterização	Melhor resultado
Cipriano (2019)	Gesso em cerâmica vermelha	5% e 10%	800°C e 1050°C	Com 5% de gesso à 800 °C
Silva (2008)	Gesso de revestimento em massas cerâmicas	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	850°C, 950°C e 1050°C	Até 15% e 950°C. Conclui-se não ser necessário empregar altas temperaturas para obter bons valores de resistência.
Abi (2014)	Borogesso em cerâmica vermelha	0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 15%	800°C, 900°C, 1000°C e 1100°C	Com 10% de incorporação
Duarte (2008)	Fosfogesso em tijolos de cerâmica vermelha	30%	750° à 950°C	Melhoria na aparência, plasticidade, resistência, queima, extrusão, viabilidade econômica e ambiental

Fonte: A Autora (2021).

Na Tabela 5, nota-se que as substituições de argila por resíduo foram realizadas entre 5 e 30%, onde os melhores resultados dependem do percentual de substituição e da temperatura de queima que varia de 750 °C a 1100°C.

Os testes tecnológicos e seus pormenores relacionados com a fabricação das cerâmicas podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Testes tecnológicos e seus pormenores relacionados com a fabricação das cerâmicas.

Autor/Matérias-primas	Ensaio	Resultados
Cipriano (2019) / Argila da mineração de gipsita e resíduo de gesso.	Retração linear	Não foi influenciada
	Absorção de água	Não variou a 800°C e reduziu 2,46% a 1050°C
	Massa específica aparente	Não variou a 800°C e reduziu a 1050°C em 5%
	Perda ao fogo	Aumentou em ambas as temperaturas
	Resistência à flexão	Reduziu com o aumento no teor de substituição e temperatura de sinterização
	Microscopia da morfologia da superfície de fratura	Apresentou rugosidades, com má distribuição das partículas de gesso, formando defeitos
Silva (2008) / Bloco com a incorporação de resíduo de gesso	Retração linear	Na faixa de 950°C a retração aumentou significativamente a partir de 15% de incorporação
	Absorção de água	Comportamento semelhante nas argilas com valores mais estáveis na faixa de 5% a 20%
	Porosidade	Valores proporcionais a absorção e elevou-se a porosidade nas amostras tratadas a 1050°C
	Massa específica aparente	Reduziu com o aumento da quantidade de resíduo
	Resistência à flexão	A tensão de ruptura diminui com o aumento do resíduo
Soken (2015) / Cerâmica estrutural incorporada com gesso de descarte da construção civil	Densidade aparente	O aumento da temperatura de queima aumenta a densidade aparente
	Absorção de água	O aumento da temperatura de queima diminui a absorção de água.
	Porosidade aparente	O aumento da temperatura de queima diminui a porosidade aparente. Até 1000 °C, diminui a porosidade com o resíduo.
	Retração linear	Nas temperaturas de queima de 900 e 1000 °C as amostras com maior porcentagem de resíduo de gesso tiveram maior retração linear. Já na temperatura de 1100°C ocorre o inverso.
	Tensão de ruptura à flexão	Com o aumento na temperatura de queima, ocorre o aumento da resistência à tensão de ruptura
Duarte (2008) / Bloco cerâmico com incorporação de fosfogesso	Umidade, granulometria, ensaio de tensão e ruptura à flexão, absorção de água, porosidade aparente, análise térmica diferencial, retração, perda ao fogo, lixiviação, solubilidade, compressão, radioatividade	A maioria dos resultados atendem as normativas. Em exceção a concentração de fluoreto no extrato solubilizado que foi superior ao indicado, devido a rocha de origem do fosfogesso.

Fonte: A Autora (2021).

Na Tabela 7, são apresentados os principais efeitos do resíduo de gesso em algumas propriedades dos materiais. Destaca-se as convergências dos autores sobre a maior presença de óxidos de silício nas argilas e de cálcio e enxofre nos resíduos de gesso no FRX, e presença de picos de quartzo na argila e sulfato de cálcio no gesso pelo DRX.

Tabela 7 - Efeitos da incorporação do resíduo de gesso em argilas.

Autor	Tipo	Ensaio	Resultados
Silva (2008)	Argila	Granulometria	Distribuição polimodal
		Plasticidade	Variação entre as argilas estudadas
	Argila/Gesso	Análise química por FRX	Maior presença de dióxido de silício / Cálcio, enxofre e impurezas
		Análise mineralógica por DRX	Picos de quartzo / Após calcinação e moagem o resíduo voltou ao estado que origina a gipsita
		Análise térmica diferencial e dilatométrica	Ocorreram duas reações endotérmica referente a ilita e uma exotérmica referente às reações de cristalização das fases amorfas da metacaulinita / Sulfato de cálcio diidratado sofreu uma decomposição endotérmica e duas exotérmicas, que se converte em sulfato de cálcio hemiidratado e anidritas posteriormente.
Retração linear de queima	Foi maior em argilas altamente plásticas / Aumentou com o aumento de temperatura		
Soken (2015)	Argila	Granulometria	A granulometria da argila é em grande parte fina.
	Argila/Gesso	Análise química por FRX	A argila apresentou alto teor de óxido de silício e óxido de alumínio. Já o resíduo de gesso apresentou teores de óxidos mais significativos, o óxido de cálcio e o trióxido de enxofre. A perda ao fogo para a argila é de 9,1% e para o resíduo de gesso é de 8,3%.
		Análise mineralógica por DRX	No difratograma da argila, foi identificado o quartzo, haloisita-7Å, sendo que o quartzo apresenta o pico com maior intensidade. Já no do resíduo de gesso, as maiores ocorrências são do sulfato de cálcio hemidratado e o sulfato de cálcio di-hidratada.
		Análise termogravimétrica	A perda de massa da argila entre 100 °C e 150 °C e a segunda perda de massa na faixa de temperatura entre 500 °C e 600°C. Já o resíduo de gesso mostra uma perda de massa entre 100 °C e 150 °C e uma segunda perda entre 700 e 800 °C.

Fonte: A Autora (2021).

Quanto às formulações para o desenvolvimento de cerâmica vermelha em termos de estudos científicos, os autores têm trabalhado numa vertente baseada em formulações emblemáticas de indústrias, como:

a) Scribot (2018) utilizou argila fornecida por uma planta da Monier, indústria de telhas cerâmicas. O autor estudou a formulação de materiais cerâmicos com substituição da argila por

lama vermelha com percentuais de substituição de 0 a 30%, efetuando queima a 950°C e 1015°C. A composição química das argilas utilizadas é de 11,8% de Fe₂O₃, 12,4% de Al₂O₃, 1,4% de TiO₂, 50,6% de SiO₂, 17,9% de CaO, 0,4% de Na₂O, 1,4% de MgO e 2,8% de K₂O. A composição mineralógica da argila usada no estudo apresentou 43% caulim, 33% esmectita, 15% de illita e 9% de clorito.

b) Barreto (2018), utilizou argila baseada na planta da indústria ArtCerâmica, constituída por argila amarela de Campos, fraca e forte, nas proporções 1:1. As composições utilizaram massa argilosa com misturas de adições de até 5% de biomassa e de até 30% de resíduo de granitos. Ensaios de composição química ou mineralógica das argilas e misturas não foram realizados.

c) Krindges (2016) utilizou argila vermelha obtida da indústria Cerâmica Kasparly Ltda. A composição química dessa argila é de 59,5% de SiO₂, 15,7% de Al₂O₃, 10,2% de Fe₂O₃, 0,67% de CaO, 1,89% de K₂O, 1,2% de TiO₂, 0,22% de MgO e 0,17% de P₂O₅;

A segunda vertente de formulações para estudos científicos em desenvolvimento de cerâmicas vermelhas é baseada no diagrama ternário de Winkler em termos de granulometria, onde o limite mínimo da fração de argila indicado pelo diagrama para massas cerâmicas destinadas a produção de blocos cerâmicos é entre 20 e 30%, ficando os materiais friáveis, de maior granulometria, com o restante da porcentagem (Ramos, *et al.*, 2010). Por fim, há uma terceira vertente baseada nas composições químicas obtidas por fluorescência de Raios-X (Abi, 2014; SOARES, 2008). Nesta vertente, Soares (2008) utilizou teores de compostos limitados por 45% a 78% de SiO₂, 7% a 38% de Al₂O₃, 1,4% a 10% de Fe₂O₃, traços a 2% de TiO₂, traços a 1% de CaO, traços a 1,5% de MgO, traços a 3% de Na₂O e traços a 3% de K₂O. Já outros autores limitam as composições químicas em função da quantidade de óxidos de ferro (as proporções em massa de Fe₂O₃/Al₂O₃ e Fe₂O₃/CaO devem ser superiores a 0,33 e 0,8, respectivamente, para obtenção da cor vermelha, segundo Abi, 2014), bem como a utilização de argilas com teor de carbono de 0,1% (em peso) para massas vermelhas, em função da possibilidade de aparecimento de coração negro, segundo Barba *et al.* (1992). De acordo com a norma EN 13006 prescrições técnicas para fazer telhas, argilas usadas em corpos de luz e de fogo escuro são razoavelmente bem discriminadas por um conteúdo de Fe₂O₃ aproximadamente 3% em peso, porque os óxidos de ferro induzem: a) cor escura do corpo das telhas, b) forma zonas de baixa fusão e causa bolhas, e c) altera a condutividade térmica (SCRIBOT, 2018).

Apesar de Santos (1992) nortear uma faixa de composições químicas para formulações de cerâmica hidrossanitária, não há indicações de faixas para o desenvolvimento de cerâmicas vermelhas.

Nos corpos de prova analisados por Cipriano *et al.* (2019) contendo resíduo de gesso, houve maior absorção de água e a porosidade aparente proporcional ao teor de gesso incorporado e a temperatura de queima. O aumento da porosidade com a incorporação de gesso a 1050°C pode ser associado à liberação de gás devido à decomposição parcial do sulfato de cálcio (SILVA, 2008), (CIPRIANO *et al.*, 2019). Já a análise térmica diferencial (DTA) do resíduo de gesso realizada por Silva (2008) mostra que a 887°C ocorre maior liberação de gases e através da análise dilatométrica (DTL) é possível observar que entre 850°C e 1000°C ocorre uma retração brusca, proveniente da sinterização do gesso em altas temperaturas.

Segundo dados produzidos por Silva (2008), a DTA indica que na argila altamente plástica o pico exotérmico ocorre aproximadamente em 915 °C devido às reações de cristalização oriundas da metacaulinita, enquanto que nas argilas medianamente plásticas o pico exotérmico ocorre a 920°C, procedente da cristalização de fase amorfa, formada nos eventos térmicos entre 550°C e 620°C até 660°C. A análise dilatométrica da argila altamente plástica no intervalo de 500°C e 600°C ocorre retração brusca devido a eliminação da água de constituição, entre 800°C e 1100°C ocorre expansão térmica e em 1060°C inicia-se a sinterização que confere caráter refratário da argila, a DTL para as argilas medianamente plásticas ocorre intensa retração linear na faixa de 900°C até 1000°C, indício da habilidade de formar fase líquida e sinterizar fortemente.

Já o sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sofre uma decomposição endotérmica e duas exotérmicas, nos picos a 120,6°C (o sulfato de cálcio diidratado é convertido em hemiidratado), 351,7°C (sulfato de cálcio hemiidratado é convertido em anidrita insolúvel ou anidrita II e, anidrita insolúvel ou anidrita II é convertida em anidrita II supercalcinada com retração do resíduo – sinterização do gesso a altas temperaturas) e 887°C (anidrita II supercalcinada se converte em gesso calcinado à morte), respectivamente (SILVA, 2008).

3.8 Processamento da massa cerâmica

No campo científico, existem formas diferentes de preparação das massas cerâmicas representativas, a fim de avaliar as propriedades físico-mecânicas das argilas. Quanto ao tamanho e geometria, há tijolos de menores dimensões, obtidos por extrusão, bem como amostras retangulares. Essas últimas também podem ser obtidas por prensagem. A escolha da técnica de conformação tem ficado a critério de cada autor, não se tendo identificado um padrão. Inconsistências e diferenças nos parâmetros de coleta, preparação e tratamento das amostras também faz parte do meio científico, quando se trata do estudo de tijolos em laboratório.

Silva (2008) preparou a matéria prima realizando secagem em estufa por 24h a 110°C, seguida por moagem em moinho de bolas por 7 horas e peneiramento em malha de 35 mesh. Depois, só as argilas foram secas na estufa novamente e umedecidas com 10% de água. Antes da conformação, as amostras foram misturadas em misturador excêntrico por 5 minutos.

Já Lima (2009), após o processo de moagem e peneiramento das matérias primas, seguida da mistura com 8% de água, realizou-se a prensagem, seguida de secagem em estufa por 24h a 110°C.

Abi (2014) triturou e peneirou as argilas. Secou e peneirou o borogesso para grãos menores de 1 mm. Misturou tudo por 60 minutos, no misturador, enquanto a água foi sendo adicionada, e posteriormente as amostras foram armazenadas em sacos plásticos durante um dia, para distribuição homogênea da umidade. Depois foi realizada a extrusão da massa cerâmica; então, os corpos de prova extrudados foram secos ao ar por 24h, depois na estufa e por último realizada a etapa de sinterização.

Contreras (2018) secou o fosfogesso por 48h a 60°C e realizou moagem por 20 minutos. Pulverizou as argilas com as adições do resíduo e 12% de água destilada, deixando homogeneizar por 12h. Realizou conformação por prensagem da massa cerâmica, com pré-secagem dos corpos de prova por 48h à temperatura ambiente, antes da secagem em estufa por 24h a 110°C.

Como pode ser observado pelos artigos acima, há falta de uniformidade na forma de preparo da massa cerâmica destinada à fabricação de tijolos cerâmicos. A realização de conformação por prensagem uniaxial é utilizada em muitos artigos, produzindo resultados confiáveis, e se torna uma técnica mais interessante para estudos laboratoriais, por permitir mais simplicidade no preparo de corpos de prova, e mais uniformidade dos resultados. Destaca-se, entre os autores, a preocupação em garantir umidade suficiente para molhar todas as partículas do material argiloso, e também a necessidade de realizar uma pré-secagem a temperatura ambiente, que é mais lenta, e evita o aparecimento de fissuras nos corpos de prova.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico aborda os materiais e métodos empregados para avaliar a viabilidade do uso de resíduo de gesso alfa na fabricação de tijolos cerâmicos.

4.1 Materiais para análises dos tijolos

As argilas empregadas, nesse estudo, foram cedidas por uma fábrica de tijolos e telhas localizada no município de Caruaru em Pernambuco. Os moldes de gesso utilizados na produção de louça sanitária e descartados por fim de vida útil, foram cedidos por uma fábrica também localizada no município de Caruaru em Pernambuco.

4.1.1 *Massa cerâmica*

Neste trabalho foram utilizadas argilas de características plásticas, porém uma mais que a outra, dessa maneira a mais plástica foi nomeada de Argila Plástica (AP) e a menos plástica de Argila Pouco Plástica (APP). As argilas foram coletadas na linha de produção de uma fábrica de cerâmica vermelha em Caruaru, secas em estufa para obtenção de partículas passantes na peneira 1,18 mm. Salienta-se que a classificação da argila na peneira 1,18, visa a melhor adequação às condições de laboratório.

Na sequência, as amostras foram caracterizadas por ensaios tecnológicos normatizados pela ABNT, para análise de desempenho dos tijolos produzidos e compreensão dos efeitos do resíduo de gesso na massa cerâmica.

4.1.2 *Gesso*

A preparação do RGA envolveu as etapas de quebra dos moldes, secagem, moagem e peneiramento usando os equipamentos da Figura 5. Primeiro, os moldes foram quebrados manualmente em pedaços de aproximadamente 5 cm, secos em estufa por 24h em 105°C e, posteriormente, cominuídos em moinho de bolas, por 2 horas e 30 minutos. Após esse processo, o pó foi peneirado, considerando para fins da pesquisa a fração passante na peneira 1,18 mm.

Figura 5 – Equipamentos usados para processamento do RGA.



Fonte: A Autora (2021).

4.2 Métodos

A metodologia se baseia na coleta, beneficiamento das matérias primas e suas respectivas caracterizações, formulações de massas cerâmicas com diferentes percentuais de resíduo de gesso e produção dos corpos de provas para ensaios tecnológicos e análises microestruturais.

4.2.1 Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas deste trabalho foram estudadas determinando suas características físico-químicas e mineralógicas.

4.2.1.1 Análise granulométrica

No laboratório da UFPB foi realizada a análise granulométrica à laser das argilas e do gesso com o analisador de tamanho de partículas da marca Microtrac S3500.

4.2.1.2 Análise química

No Laboratório de Química da UFPE foram realizadas em todas as amostras suas análises quantitativas totais das espécies químicas contidas nas argilas e no resíduo de gesso alfa, determinada por fluorescência raios X, em espectrofotômetro de fluorescência de raios-X Rigaku, Primini.

4.2.1.3 *Análise mineralógica - DRX*

A determinação qualitativa da composição mineralógica das amostras foi realizada no Laboratório de Raios X, Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, com as partículas passantes na peneira ABNT nº 200 de abertura de 0,074 mm de diâmetro. As medidas foram realizadas em difratômetro Panalytical, modelo RX/Xpert Pro MPD, com radiação $\text{CuK}\alpha$ 1,5418Å (Difratômetro de RX/Xpert Pro MPD – Panalytical), ângulo de varredura 2θ de 5° a 60°, passo 0,02°. Foi realizado refinamento dos difratogramas para quantificação de fases cristalinas usando o programa de refinamento comercial TOPAS da Bruker.

4.2.1.4 *Análise de espectroscopia de infravermelho - FTIR*

Os espectros de absorção na região do Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram coletados no espectrofotômetro Shimadzu, modelo IRPrestige-21. As amostras foram previamente pulverizadas em almofariz com 99% de KBr e prensadas em molde específico para confeccionar as pastilhas com transparência adequada à análise. A leitura foi feita na região de 4000 a 500 cm^{-1} , resolução 4 cm^{-1} , 40 varreduras.

4.2.1.5 *Análise da plasticidade*

No laboratório de solos da UFPE (Campus Caruaru), foram determinados os limites de Atterberg na massa cerâmica industrial para avaliar seu comportamento plástico e permitir a confecção dos corpos de prova. Seguindo as recomendações da norma ABNT/NBR 6457:2016 para preparação da amostra, que determina utilizar uma fração de 200 g do material passante na peneira de 0,42mm, bem como da norma ABNT/NBR 6459:2017 para determinação do limite de liquidez, e norma ABNT/NBR 7180:2016 para determinação do limite de plasticidade.

4.2.1.6 *Limite de liquidez (LL)*

Os limites de liquidez das argilas foram determinados de acordo com a Eq. (1) e para a obtenção dos dados foram seguidos os procedimentos da ABNT/NBR 6459:2017. Para cada argila utilizou-se 100g de amostra que foi misturada numa cápsula de porcelana com água destilada sendo adicionada em pequenas proporções. Em seguida transferiu-se a amostra para

uma concha até obter uma espessura de 1 cm e assim realizar uma ranhura na parte simétrica da amostra para iniciar a sequência de 2 giros por segundo até ocorrer o contato das duas partes do solo. Esse processo foi repetido 5 vezes e em todos anotou-se a quantidade de golpes, o material que entrou em contato foi retirado para obter o peso da massa antes e após estufa por 24h em 65°C.

$$W(\%) = M_w / M_{ss} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$W(\%)$ = Teor de Umidade

M_w = Massa úmida

M_{ss} = Massa solo seco

4.2.1.7 *Limite de plasticidade (LP)*

Os limites de plasticidade das argilas foram determinados seguindo os procedimentos da ABNT/NBR 7180:2017. Para cada 100g de argila úmida realizou-se modelagem semelhante a uma bola pequena, a amostra foi colocada em recipiente de vidro fosco e achatada com a mão, em seguida 3 partes foram retiradas para obter manualmente forma cilíndrica de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, ao se partirem em 3, elas foram colocadas em cápsulas para obtenção do peso antes e após estufa por 24h em 65°C.

4.2.1.8 *Índice de plasticidade (IP)*

Seguindo ABNT/NBR 7180:2017 se determinou o índice de plasticidade, conforme a Equação (2).

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

IP = Índice de plasticidade (%)

LL = Limite de liquidez (%)

LP = Limite de plasticidade (%)

Bruguerra (1986) trouxe a classificação referente a plasticidade das argilas, se baseando nos índices de plasticidade:

1 < IP < 7 – Fracamente Plástico;

7 < IP < 15 – Medianamente Plástico;

IP > 15 – Altamente Plástico.

4.2.2 *Elaboração das composições*

O resíduo de gesso dos moldes de louça sanitária (RGA) substituiu as argilas em 0% (referência), 5%, 10% e 15% (em massa de argila). Esses percentuais de substituição foram adotados de acordo com a literatura com os valores mais comumente utilizados pela literatura em trabalhos que visam o uso de resíduos em tijolos cerâmicos. Os melhores resultados publicados em Silva (2008), Contrares *et al.* (2018), Turkel, Aksin (2012) e Cipriano (2019), estão neste intervalo. A identificação das formulações estudadas nesta dissertação encontra-se apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição das massas cerâmicas com RGA.

Denominação	% em peso de matéria-prima		
	AP	APP	RGA
REF	50	50	0
RGA5	47,5	47,5	5
RGA10	45	45	10
RGA15	42,5	42,5	15

Fonte: A Autora (2021).

Para fabricação dos tijolos desta pesquisa, as argilas e o RGA, passaram pelo processo conforme ilustra a Figura 6. Primeiramente, passaram pelo processo de beneficiamento até atingir tamanho de partículas passantes na peneira 1,18 mm, conforme descrito anteriormente. Em seguida, foram secos em estufa por 24h em 105°C. Foi usada balança com precisão (0,01 g) para produzir as formulações.

As argilas e o RGA foram misturados, manualmente, com adição gradual de água destilada. A quantidade de água destilada adicionada foi correspondente a 10% da massa total da mistura. A massa cerâmica produzida foi colocada em misturador mecânico por 2min 30s para melhor aglutinar as partículas. Em seguida, as amostras foram conformadas por prensagem

uniaxial sob pressão com a cessão da carga logo após atingir 2 toneladas, em molde metálico de (2x1x6) cm (SOUZA SANTOS, 1928).

Figura 6 – Representação das as etapas de produção dos tijolos cerâmicos com RGA.

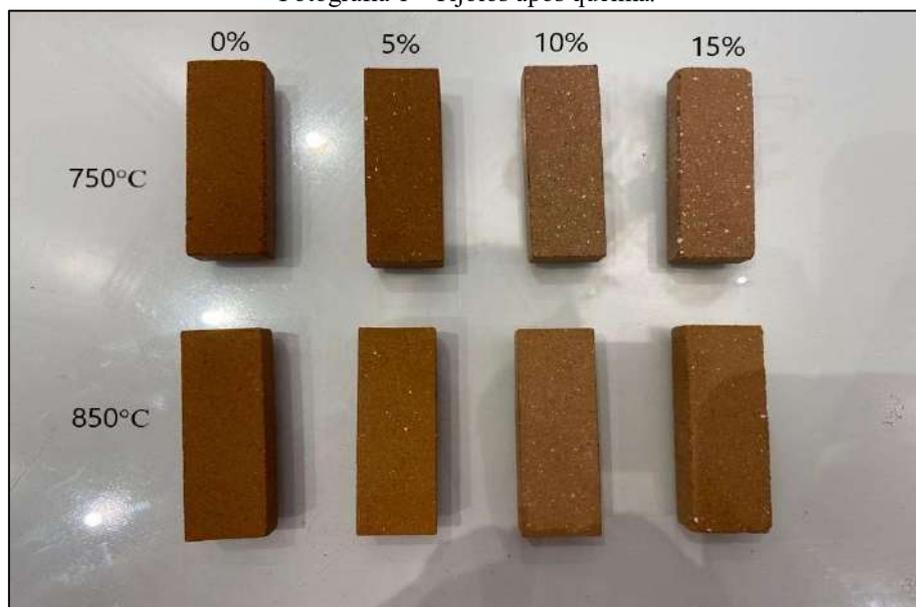


Fonte: A Autora (2021).

Após a prensagem, todos os corpos de prova foram secos a temperatura controlada em estufa a 40 °C por 24h, para permitir a perda de água em excesso de forma lenta e uniforme, evitando a formação de trincas e desarranjos na estrutura da massa cerâmica no processo de queima. Sendo assim, eles foram submetidos a uma segunda etapa de secagem em estufa por 24h em 105°C.

Finalizando, os corpos de provas foram sinterizados (Figura 7) em forno elétrico, marca Jung, com programador de temperatura e razão de aquecimento. Foi realizado o tratamento térmico nas temperaturas de 750 °C e 850°C, usando aquecimento de 5°C.min⁻¹ isoterma de 2 horas. O resfriamento aconteceu de forma lenta e as amostras foram retiradas do forno 24 horas após atingir a temperatura de queima.

Fotografia 1 - Tijolos após queima.



Fonte: A Autora (2021).

4.2.3 *Ensaio de desempenho tecnológico*

Para cada ensaio, foram avaliados três corpos de prova, sendo adotada a média dos resultados. Foram realizados testes de absorção de água, retração linear de queima, resistência à flexão. Estes testes foram realizados para saber se formulações cerâmicas obedecem aos critérios industriais para confecção de blocos destinados à construção civil.

4.2.3.1 *Retração linear*

A retração linear determina a variação da dimensão linear do corpo de prova assim que confeccionado e após a sinterização, essa variação irá decorrer da eliminação de água de amassamento e de transformações de fases dentro do sistema cerâmico quando submetido a determinadas temperaturas. A retração linear foi obtida utilizando paquímetro digital (0,00 mm) para as medições das dimensões lineares das amostras antes de sofrer qualquer tratamento térmico e após a sinterização, os cálculos foram conforme a Equação 3. Valores limites máximos são de 10% (SOUZA SANTOS, 1989).

$$RL = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

RL = Retração linear (%)

C_i = Comprimento inicial do corpo de prova

C_f = Comprimento final do corpo de prova

4.2.3.2 *Absorção de água*

A absorção de água foi obtida pela diferença de massa dos corpos de prova após passarem por 2 horas imersos em ebulição com água destilada, os cálculos foram obtidos de acordo com a Equação 4, respeitando os preceitos da ABNT/NBR 13818/1997.

$$AA = [(P_u - P_s) / P_s] \times 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

AA = Absorção de água (%)

Pu = Peso do corpo de prova úmido

Ps = Peso do corpo de prova seco

4.2.3.3 *Tensão de ruptura à flexão*

A tensão de ruptura dos corpos de prova foi realizada na prensa Emic DL 60000 com a célula de carga Trd 23, conforme a norma ABNT/NBR 13818:1997, através do teste de flexão em três pontos, o ensaio consiste na avaliação da carga aplicada em solicitação de flexão em três pontos das amostras que passaram pelo beneficiamento da matéria-prima, posteriormente foram prensadas e sinterizadas. A tensão no corpo de prova é obtida à medida que ele sofre a aplicação de uma deformação controlada e calculada de acordo com a Equação 7.

$$\text{TRF} = (3 \cdot P \cdot L) / (2 \cdot b \cdot h^2) \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

TRF = tensão de ruptura à flexão (MPa)

P = carga atingida no momento de ruptura (kgf)

L = distância entre os apoios do corpo de prova (cm)

b = largura do corpo de prova (cm)

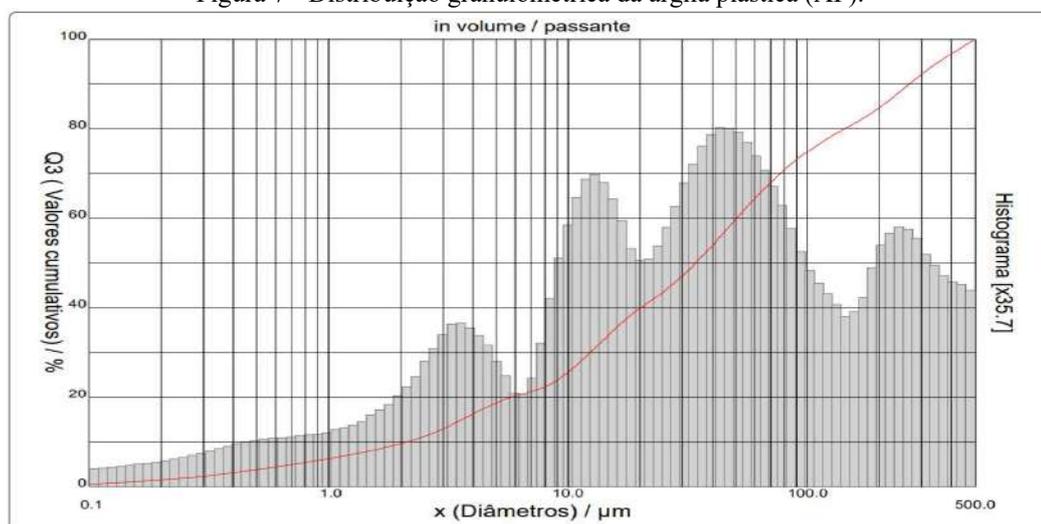
h = altura do corpo de prova (cm)

5 RESULTADOS

5.1 Granulometria

A análise granulométrica da argila AP, da argila APP e do gesso, está expressa nas Figuras 7, 8 e 9. Na Figura 8, que corresponde à argila AP, observa-se que o diâmetro médio das partículas é 83,42 μm , possuindo uma distribuição polimodal. A fração mais fina (diâmetro de até 10 μm) representa 25% das partículas. A existência de partículas com vários tamanhos favorece o melhor empacotamento durante o processo de prensagem, o que minimiza o aparecimento de poros.

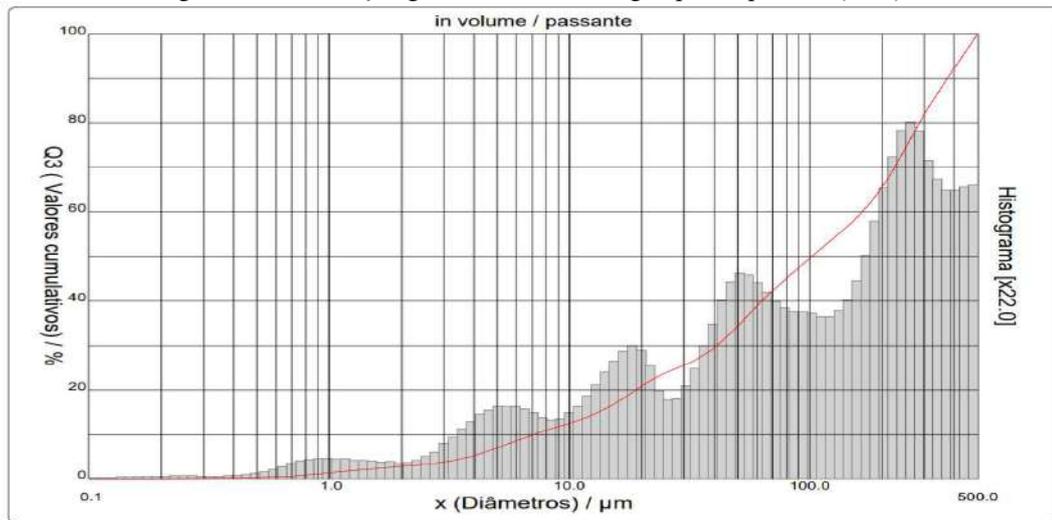
Figura 7 - Distribuição granulométrica da argila plástica (AP).



Fonte: A Autora (2021).

Na Figura 8, que corresponde a argila APP, observa-se um comportamento diferente à distribuição granulométrica da argila AP, já esperado, pois a argila APP, com a plasticidade inferior, possui seu diâmetro médio maior (152,54 μm). Apesar de sua distribuição também ser polimodal, a acumulação de partículas até 10 μm equivale à metade quando comparada a argila AP, observando 50% de diâmetro até 102,10 μm . Essa característica aponta a presença maior de quartzo que conseqüentemente prejudica a plasticidade da argila.

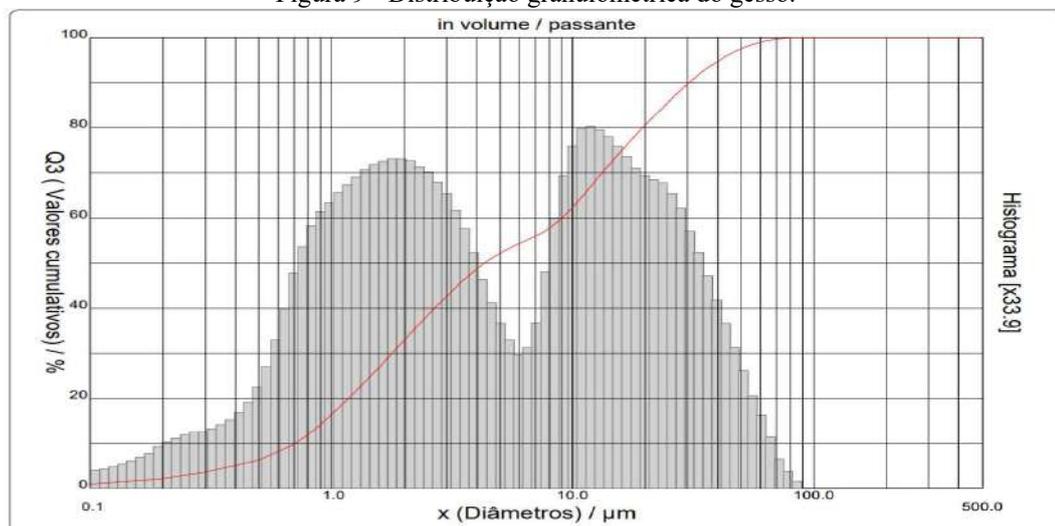
Figura 8 - Distribuição granulométrica da argila pouco plástica (APP).



Fonte: A Autora (2021).

A curva granulométrica do gesso, apresentada na Figura 9, aponta um material com módulo de finura menor ao das argilas, possuindo o diâmetro médio de 11,05 μm com distribuição bimodal. Observa-se também que 50% das partículas são de diâmetros inferiores a 4,32 μm , conferindo à mistura finuras que na conformação pôde-se perceber uma contribuição positiva na trabalhabilidade.

Figura 9 - Distribuição granulométrica do gesso.



Fonte: A Autora (2021).

5.2 Limites de consistência das argilas

Os resultados dos limites de Atterberg para as argilas estão mostradas na tabela a seguir. De acordo com os resultados, observa-se que a argila AP apresenta maiores valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade do que a argila APP. Entretanto,

os valores obtidos permitem classificar as duas argilas no grupo de altamente plásticas (BRUGUERRA, 1986).

Tabela 9 - Limite de Atterberg das argilas.

Argila	LL(%)	LP(%)	IP(%)	Classificação (Bruguerra, 1986)
AP	51,75	23,63	28,12	Altamente Plástica IP > 15
APP	30,05	14,96	17,09	Altamente Plástica IP > 15

Fonte: A Autora (2021).

5.3 FRX

Na Tabela 10, são demonstrados os percentuais da composição química obtidos por FRX das argilas que compõem a massa cerâmica e do RGA.

Tabela 10 - Composição química das argilas e RGA.

Composição Química	%		
	AP – Argila Plástica	APP – Argila Pouco Plástica	RGA
SiO ₂	63,42	64,22	0,34
Al ₂ O ₃	17,21	20,74	0,12
Fe ₂ O ₃	6,98	4,99	-
K ₂ O	4,05	4,35	0,03
Na ₂ O	1,37	1,54	-
CaO	2,59	1,40	45,18
MgO	3,04	1,118	-
TiO ₂	0,87	0,78	-
Cl	0,08	0,38	0,03
SO ₃	0,15	0,13	54,04
MnO	0,00	0,11	-
P ₂ O ₅	0,09	0,08	0,04
SiO	0,10	0,06	-
Ab ₂ O	-	0,03	-
SrO	-	-	0,22
NiO	0,05	0,00	-
Total	100,00	100,00	100,00

Fonte: A Autora (2021).

A análise dos dados revela que a massa cerâmica de caráter industrial é predominantemente constituída por alumino-silicatos. Os teores de SiO₂ (63,42%, 64,22%), Al₂O₃ (17,21%, 20,74%) e Fe₂O₃ (6,98%, 4,99%), demonstram segundo dados de Souza Santos (1989) uma forte presença de silicatos que indicam a presença de argilominerais, micas ou feldspatos, e sílica livre proveniente do quartzo. A presença da sílica livre no sistema pode

conduzir a uma baixa retração linear como também reduzir a plasticidade. Os teores de Al_2O_3 sugerem que o alumínio deve estar em sua maioria se combinando na formação de argilominerais, como por exemplos a caulinita e illita, percebe-se também que não se trata de material altamente aluminoso não sendo indicado para fabricação de materiais refratários.

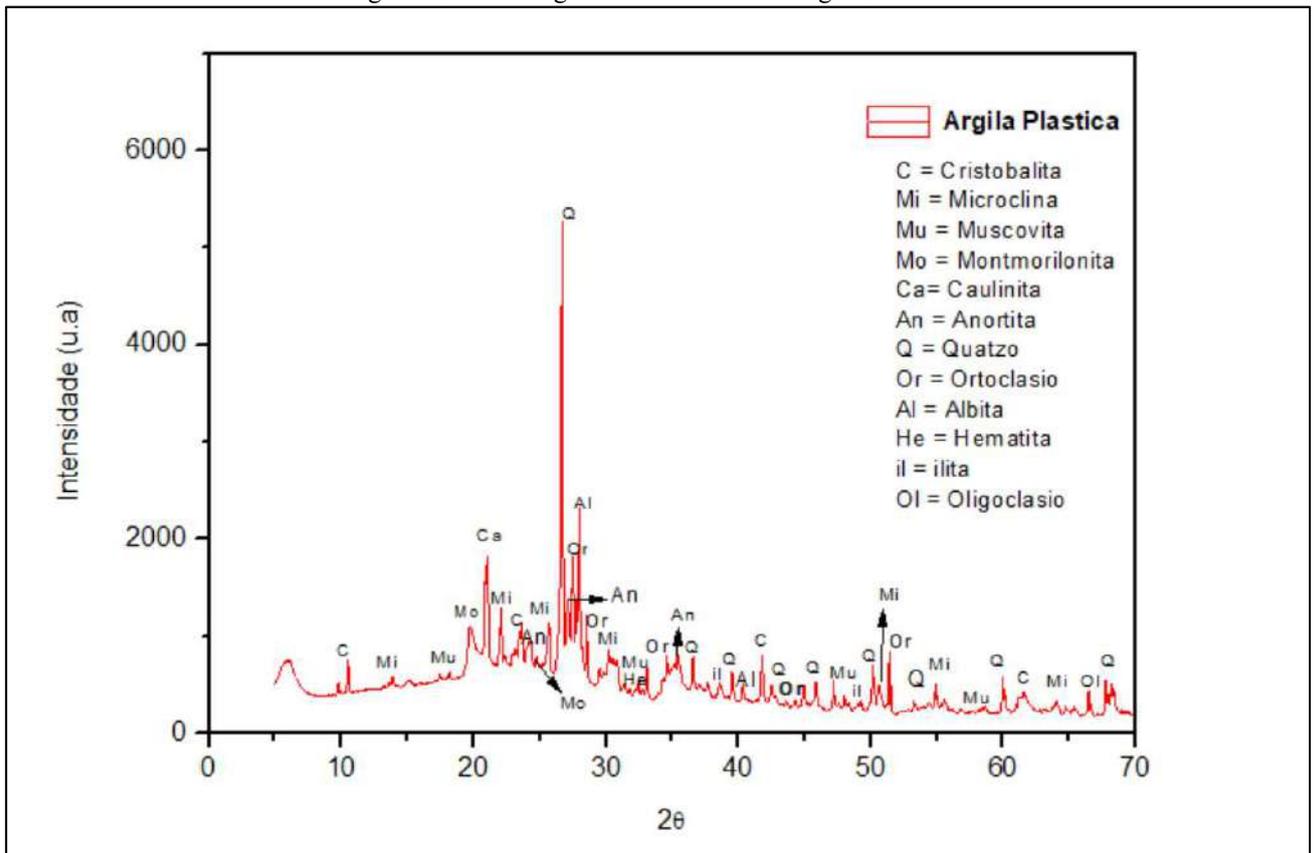
A presença de Fe_2O_3 no sistema argiloso conduz à coloração vermelha no material cerâmico, especialmente para teores acima de 6% (NEVES, 2002). Nas amostras foi observado que a AP com Fe_2O_3 6,98% possui uma coloração mais avermelhada que a APP com Fe_2O_3 4,99%. Percebe-se também uma pequena presença de TiO_2 (0,87%, 0,78%) que em quantidades inferiores a 1% são insignificantes do ponto de vista tecnológico das argilas (SOUZA SANTOS, 1989).

Os agentes fundentes estão relacionados à presença de K_2O (4,05%, 4,35%), Na_2O (1,37%, 1,54%), CaO (2,59%, 1,40%), MgO (3,04%, 1,18%) , sendo que óxido de sódio e óxido de potássio são oriundos do feldspato, por exemplo a albita, e da mica (SILVA, 1998; CALMON et al., 1998); já o óxido de cálcio e óxido de magnésio podem surgir da calcita, dolomita, gipsita, dificilmente na caulínica ou no caso do óxido de cálcio como cátion trocável nas argilas montmoriloníticas (SOUZA SANTOS, 1989).

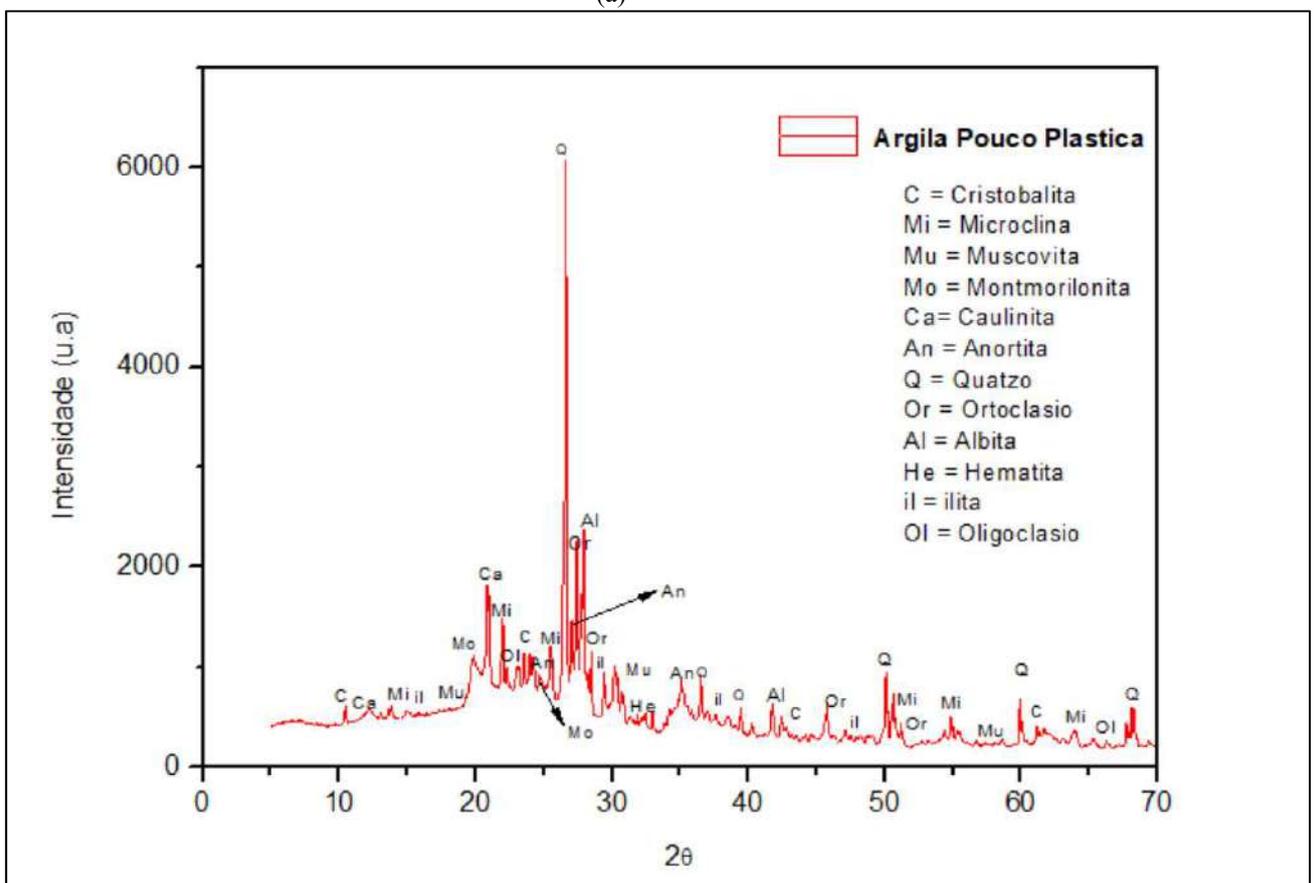
5.4 DRX

Os difratogramas de raios X das argilas utilizadas para produção da massa cerâmica, aqui denominadas de Argila Plástica (AP) e Argila Pouco Plástica (APP), são apresentados na Figura 10. Observa-se as argilas AP e APP apresentam as mesmas fases cristalinas: quartzo, albita, anortita, microclina, oligoclasio, ortoclásio, muscovita, montmorilonita, caulinita, cristobalita, illita e hematita, o que pode ser explicado em virtude delas pertencerem a mesma jazida.

Figura 10 – Difratomogramas de raios X das argilas.



(a)



(b) Fonte: A Autora (2021).

Na Tabela 11, são apresentados os percentuais das fases cristalinas nas argilas obtidos pelo programa TOPAS. De acordo com estes dados, apesar das argilas AP e APP terem as mesmas fases cristalinas, os percentuais dessas são diferentes nas argilas. Estas fases concordam com os dados de composição química apresentados acima. O refinamento sugere que a maior parte de aluminossilicatos presentes nas argilas é do grupo da illita (23,97% AP - 17,95% APP), Muscovita (4,41% AP - 9,78% APP), Montmorilonita (17,71% AP - 13,0% APP) e Caulinita (2,34% AP - 0,67% APP); há também a presença de Quartzo (9,83% AP - 10,49% APP).

Tabela 11 – Percentual das fases cristalinas nas argilas obtidas pelo programa TOPAS.

Fase	AP %	APP %
Quartzo	9,83	10,49
Albita	8,65	7,08
Anortita	6,23	4,21
Microclina	3,15	8,54
Oligoclasio	7,43	8,8
Ortoclasio	12,93	16,26
Muscovita	4,41	9,78
Montmorilonit a	17,71	13,0
Caulinita	2,34	0,67
Cristobalita	1,94	2,66
Ilita	23,97	17,95
Hematite	1,42	0,57

Fonte: A Autora (2021).

Com os dados apresentados, é possível identificar porque duas argilas da mesma jazida e com fases equivalentes em suas composições apresentam desempenhos diferentes. Em relação à plasticidade, a presença de proporções maiores de montmorilonita, illita na AP influenciou nas propriedades plásticas com mais intensidade do que na argila APP. Como influências também se têm a dimensão das partículas sólidas, distribuição de tamanhos das partículas sólidas, forma das partículas e a sua estrutura interna, agregação das partículas, área superficial das partículas e sua atração intermolecular (GOMES, 1986); nestes aspectos, as análises granulométricas demonstram resultados favoráveis a AP, por possuir partículas com vários tamanhos, o que contribui para melhor empacotamento dos grãos.

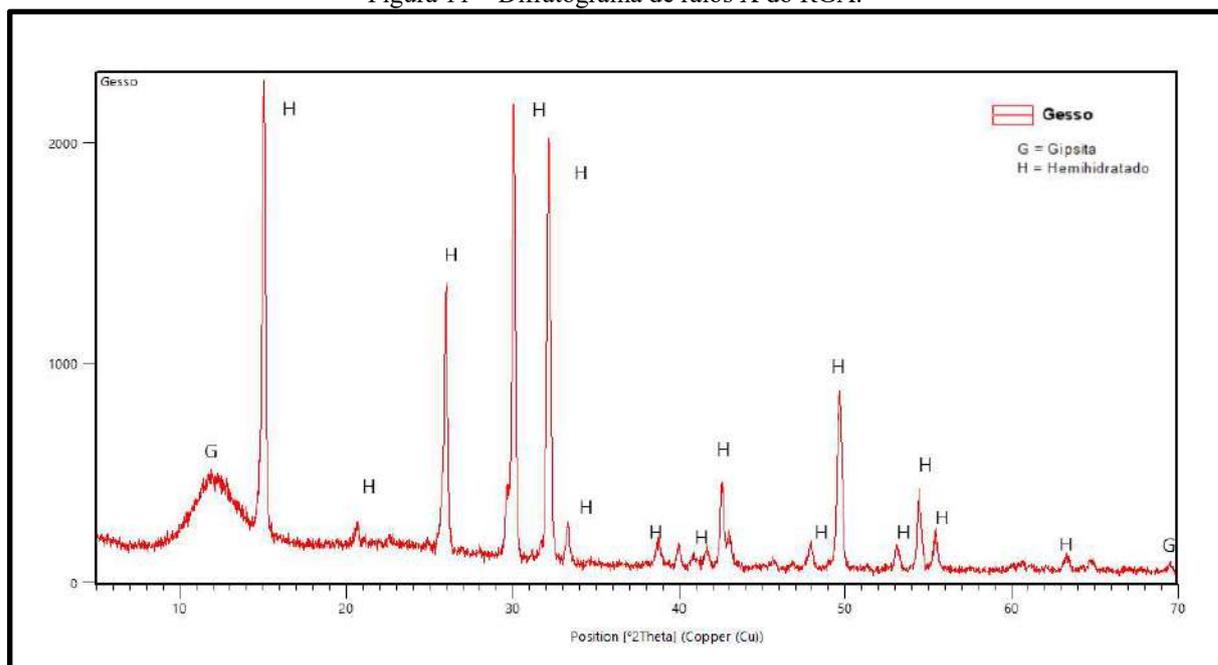
A montmorilonita e muscovita em proporções significativas podem provocar expansão linear no sistema cerâmico (SOUZA SANTOS, 1989), o que de certa maneira devem ter

influenciado na baixa retração linear nas amostras, é provável que a expansão desses argilominerais tenha atenuado a retração dos demais.

Ambas as argilas apresentam quantidade importante de feldspatos 29,74% na Argila Plástica e 36,35% na Argila Pouco Plástica. Os feldspatos encontrados são Albita (8,65% AP – 7,08% APP), Anortita (6,23% AP – 4,21% APP), Oligoclasio (7,43% AP – 8,8% APP), Ortoclasio (12,93% AP – 16,26% APP), Microclina (3,15% AP – 8,54% APP). Estas fases agem como fundentes, e são de extrema valia nas utilizações cerâmicas para a redução de temperatura de queima. Os diferentes álcalis e suas proporções presentes nos fundentes influenciam também a formação da microestrutura das argilas (OLIVEIRA, 2012). A característica fundente trará a capacidade de diminuir a temperatura da formação da fase líquida durante a sinterização do material cerâmico, este líquido age se espalhando no sistema preenchendo os poros. Com isso, contribui para a formação de material com menor índices de vazios, consequentemente menor absorção, porosidade e maior resistência (WORRAL, 1982). A influência dessa significativa presença dos feldspatos e também a presença de Hematita (1,42% AP – 0,57% APP) como outro material fundente é refletida nos baixos valores de absorção e resistências elevadas, quando comparadas às mínimas indicadas pela norma vigente.

O difratograma de raios X do RGA é apresentado na Figura 11 e a quantificação das fases cristalinas é mostrada na Tabela 12. Como pode ser observado, o resíduo dos moldes de louça sanitária apresenta predominantemente o sulfato de cálcio hemiidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), confirmado pela presença dos picos majoritários em $2\theta = (15,1 - 25,9 - 30,0 - 33,7 - 49,6)$. Observa-se que além da presença de bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) existe um pico alargado em $2\theta = 11,59$, seguido de outro em $2\theta = 68,8$ atribuídos à gipsita. Os percentuais das fases demonstram que o resíduo incorporado é predominantemente gesso na forma de Bassanita (96,38%), seguido de um pequeno percentual de fase do Sulfato de Cálcio hidratado com duas moléculas de água, a Gipsita (0,43%). Além destas observou-se também a presença de Anidrita (3,19%).

Figura 11 – Difratoograma de raios X do RGA.



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 12– Percentual das fases cristalinas no RGA obtidas pelo programa TOPAS.

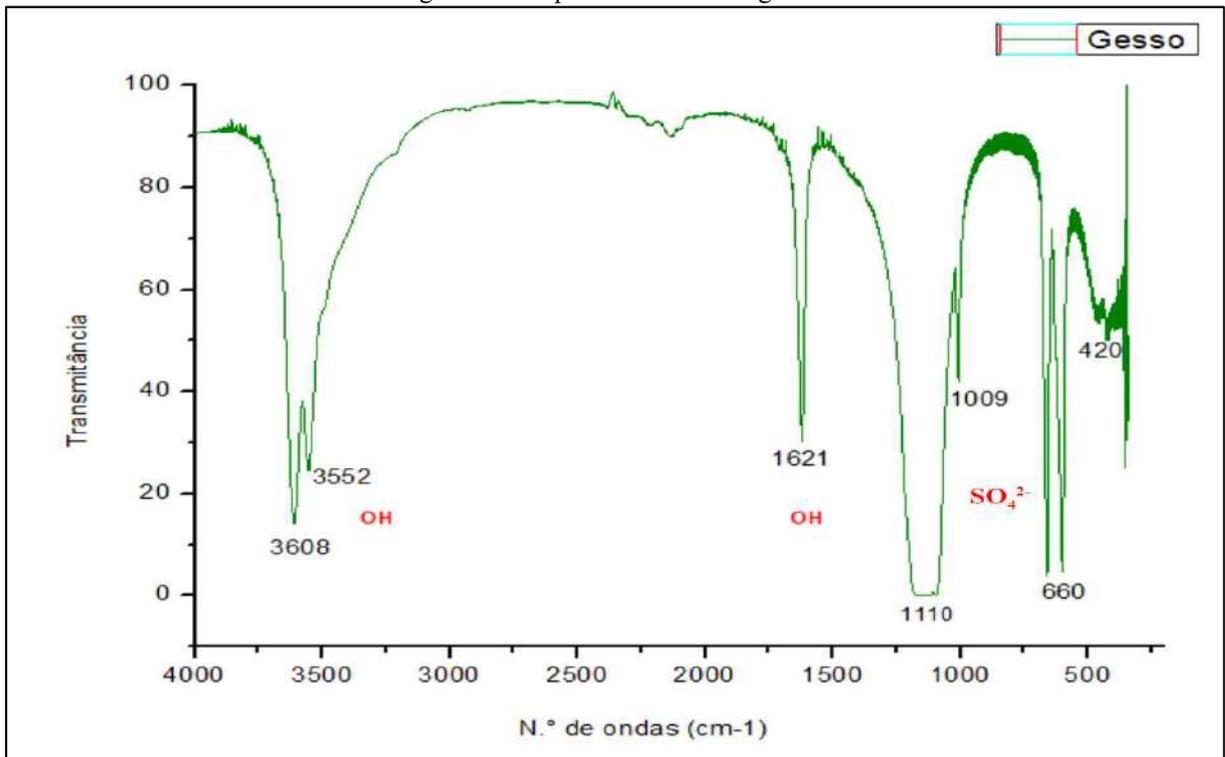
Fase	%
Gipsita (G)	0,43
Bassanita (H)	96,38
Anidrita	3,19

Fonte: A Autora (2021).

5.5 FTIR

A identificação do hemiidrato de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) por espectroscopia de absorção no infravermelho é realizada pela presença de bandas de absorção relativas às ligações OH da água e de estiramento e deformação do grupo sulfato. No espectro de FTIR do RGA (Figura 12), observa-se as bandas em 3608 cm^{-1} e 3552 cm^{-1} características do estiramento vibracional das ligações O-H e bandas em torno 1621 cm^{-1} , atribuídas à deformação vibracional de água com ligações fortes, como o gesso na forma de hemiidrato (Santana, 2006). O íon SO_4^{2-} possui quatro bandas principais (1000 cm^{-1} , 450 cm^{-1} , 1105 cm^{-1} e 650 cm^{-1}). Estas bandas espectrais no espectro do RGA aparecem em 1110 cm^{-1} , 1009 cm^{-1} , 660 cm^{-1} e 420 cm^{-1} . O espectro deste resíduo concorda com os dados de análise química e DRX, e comprova que se trata de sulfato de cálcio hemiidratado.

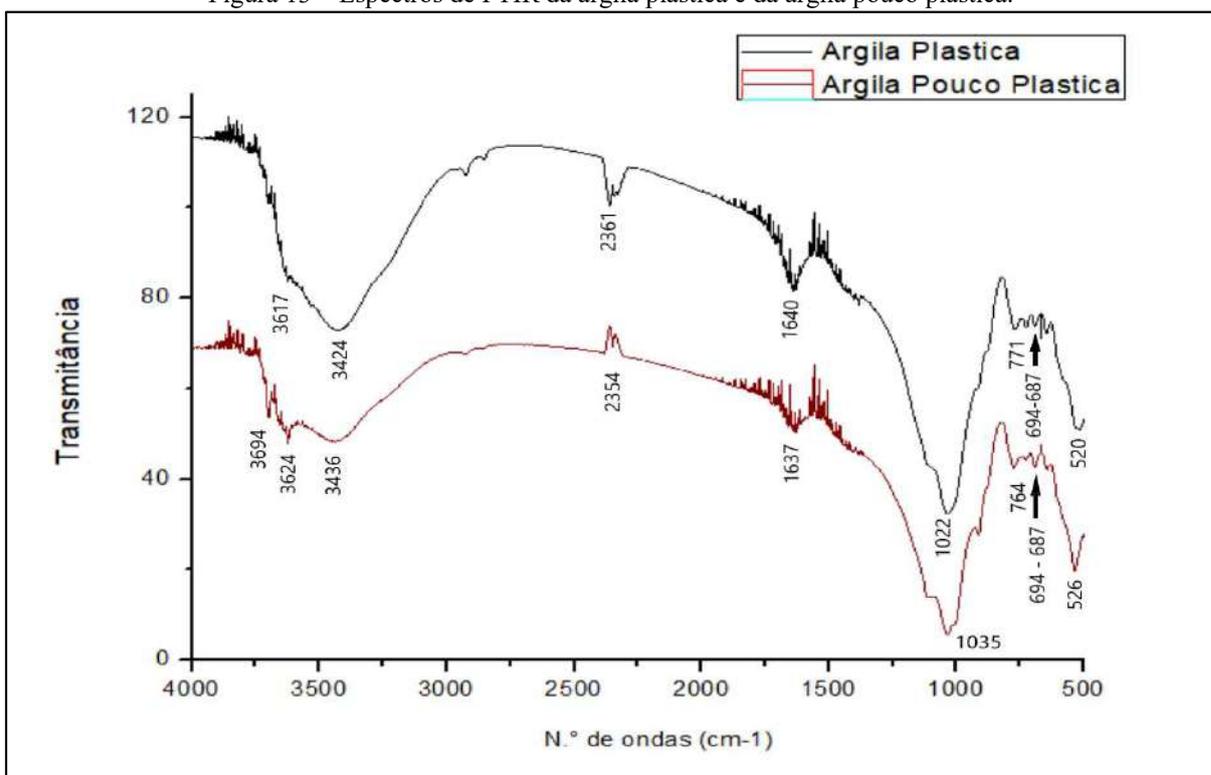
Figura 12 – Espectro de FTIR do gesso.



Fonte: A Autora (2021).

A análise de argilas por FTIR baseia-se na identificação dos seus componentes também através das bandas de absorção das ligações características dos grupos de argilominerais e quartzo. Na Tabela 13, estão resumidas as principais bandas de absorção na região do infravermelho de argilominerais, e correlacionadas com as encontradas nos espectros das argilas AP e APP, apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Espectros de FTIR da argila plástica e da argila pouco plástica.



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 13 - Bandas de absorção no espectro de infravermelho das argilas.

Banda (cm ⁻¹)	Atribuição	AP	APP
3623	Estiramento OH entre folhas de tetraedro e hexaedro	-	3624
3693 e 3620	Mineral ordenado	3617	3694
3440	Estiramento O-H de água de constituição de aluminossilicatos	3424	3436
1643	Estiramento H-O-H de água adsorvida	1640	1637
1030	Estiramento da ligação Si-O de aluminossilicatos	1022	1035
779	Estiramento da ligação Si-O de quartzo	771	764
684	Vibração por flexão Si-O simétricas	687	687
694	Indica presença de partículas finas de quartzo	694	694
523	Estiramento da ligação Fe-O da Hematita	520	526

Fonte: A Autora (2021)

Nota: Adaptado de Viruthagiri et al (2015), Achik et al (2020), Reis et al (2020).

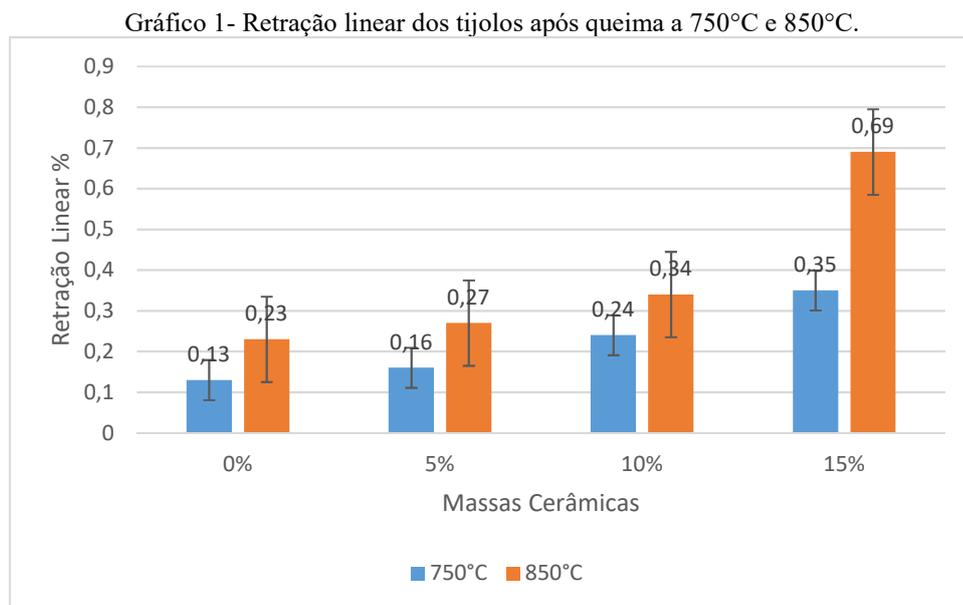
A análise dos espectros confirma a presença de aluminossilicatos, quartzo e hematita, em concordância com os dados de composição química e mineralógica das argilas utilizadas neste trabalho. Na argila AP não foi identificado pico de OH de folhas de tetraedro e hexaedro,

comuns na caulinita. Este resultado está de acordo com a quantificação de fases que mostra um teor menor de 3% de caulinita.

5.6 Desempenho tecnológico dos tijolos com RGA

5.6.1 Retração linear

Os dados de percentual de variação de comprimento linear representam a variação das dimensões dos corpos de prova após sinterização, partindo como referência as dimensões antes da sinterização. Constitui um parâmetro muito importante para o controle de qualidade do processo de fabricação de tijolos e relaciona-se com a uniformidade das peças, requisito necessário para garantir regularidade na construção de elementos. Os resultados da retração linear de queima dos tijolos fabricados com RGA são mostrados no Gráfico 1.



Fonte: A Autora (2021).

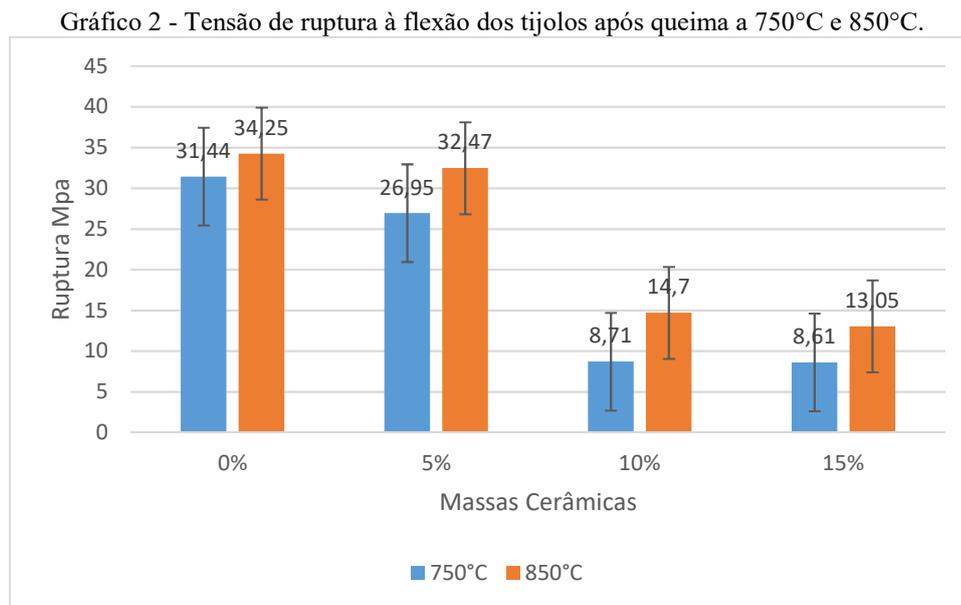
Mesmo não havendo requisitos mínimos de retração linear de queima, nas normas vigentes no Brasil, conforme recomendação de Sousa Santos (1989), adota-se limite de 10% em tijolos cerâmicos sinterizados. Os resultados mostram que a retração linear é maior a 850°C do que a 750°C, o que está de acordo com a presença de montmorilonita e ilita na matéria prima argilosa. Segundo Silva (2008) concentrações de montmorilonitas acima de 3% podem causar variações lineares significativas, as ilitas sofrem transformações que resultam numa pequena expansão a 600°C (GRIM, 1968). Percebe-se que os valores de retração linear não

ultrapassaram 1%, sugerindo que as argilas utilizadas possam apresentar fases expansivas que atenuam a retração de outras fases.

À medida que foi sendo incorporado o resíduo de gesso (RGA) na massa cerâmica, houve o aumento da retração linear nas duas temperaturas de sinterização, sendo maior a 850°C. A partir de 850°C, a bassanita sobre mudança de sistema cristalino, o que pode explicar a mudança de comprimento linear. Mesmo assim, em todas as situações o valor referente à retração linear de queima atende a especificação de não ultrapassar 10% e com valores bem abaixo.

5.6.2 Tensão de ruptura à flexão

De acordo com os dados de Tensão de Ruptura à flexão (Gráfico 2), a massa cerâmica de referência possui alta resistência, suportando cargas superiores a 30MPa, desempenho bem acima do normatizado pela ABNT 13818:1997 conforme demonstra Tabela a 14.



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 14 – Aplicabilidade dos corpos de provas cerâmicos.

Tensão de ruptura à flexão					
110 °C			950 °C		
Tijolos Manuais e Prensados	Tijolos Furados	Telhas	Tijolos Manuais e Prensados	Tijolos Furados	Telhas
1,47 MPa (Mínimo)	2,45 MPa (Mínimo)	2,95 MPa (Mínimo)	1,96 MPa (Mínimo)	6,37 MPa (Mínimo)	9,81 MPa (Mínimo)

Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de ABNT (1997).

Nestes resultados mostram que a massa cerâmica utilizada e o processo de prensagem foram muito eficientes, e permitem o uso desta massa cerâmica para outras aplicações que demandem mais resistência à flexão.

Observa-se que a presença do resíduo de gesso de moldes de louça sanitária (RGA) reduz o ganho de resistência da massa cerâmica. Os corpos de prova com 5% de resíduo possuem desempenho de aproximadamente 27 MPa (750°C) e 32 MPa (850°C), valores ainda bem elevados que sugerem poucas modificações na maneira de consolidação da microestrutura durante a sinterização. A partir de 10% de substituição, o efeito na resistência à ruptura é considerável, em ambas as temperaturas de sinterização, reduzindo o desempenho em 72,3% (750°C) e 57,08% (850°C). Com 15% de substituição, os valores de desempenho à flexão são 8,61 MPa (750°C) e 13,05 MPa (850°C) com variação de 72,61% (750°C) e 61,90% (850°C). Os resultados demonstram que ocorre uma queda brusca de resistência ao incorporar 10% de RGA e que depois é atenuada no percentual de 15%. Apesar de em todas as substituições os valores estarem dentro dos limites da norma ABNT 13818:1997 parece que a presença do gesso modifica a microestrutura da massa cerâmica, o que torna mais segura a substituição de 5%.

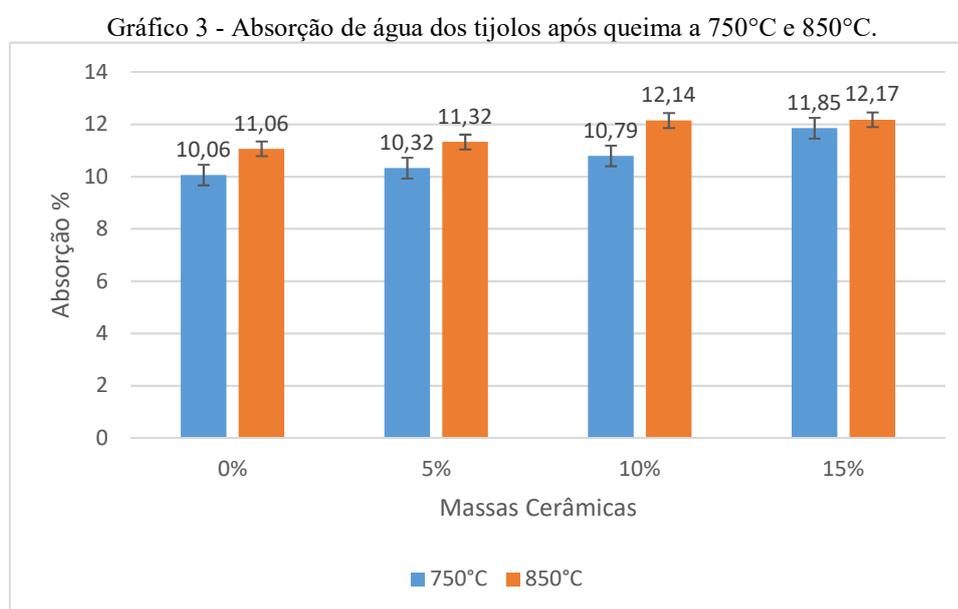
Silva (2008) apontou que a incorporação de até 15% de gesso na matriz cerâmica culminou em resultados tecnológicos satisfatórios, evidenciando também que à medida que se aumenta a temperatura de queima melhor as propriedades mecânicas. Já Cipriano (2019) avaliou que os tijolos sinterizados a 800°C apresentaram resistência mecânica melhor que a 1050°C, muito provavelmente pela instabilidade no sistema com a liberação do enxofre, em percentual de 5% de gesso se obteve melhores resultados do que as amostras com 10%. Duarte (2008) produziu tijolos com 30% de fosfogesso, observando melhoria na resistência quando comparado às amostras de referência.

5.6.3 Absorção de água

Nos resultados de Absorção de Água, conforme Gráfico 3, são mostrados valores bem interessantes e concordantes com o desempenho mecânico. A massa cerâmica de referência absorve pouca água (entre 10 e 11%) após a sinterização. Este resultado sugere que ocorreu uma boa compactação das partículas e aglutinação das mesmas, formando uma matriz com poucos poros, e são discretamente maiores para os tijolos tratados a 850°C do que aqueles tratados a 750°C.

A substituição do componente argiloso por resíduo de gesso (RGA) parece não ter afetado esta propriedade. Entretanto, observa-se uma tendência a serem levemente maiores à

medida que ocorre a introdução de gesso na massa cerâmica. O maior valor de AA foi de 12,17% para a amostra com 15% de RGA a 850°C. Todos os valores estão abaixo do limite máximo (25% tijolos furados, 20% telhas) normatizado pela ABNT 13818:1997. Um comportamento semelhante foi observado por Silva (2008), o aumento do resíduo de gesso também elevou a maior absorção das amostras, além disso foi observado por Cipriano (2019) que ao aumentar a temperatura também aumentou a absorção, porém Duarte (2008) observou que com a presença de fosfogesso na mistura obteve-se uma pequena melhora no resultado de absorção das amostras com redução de valores.

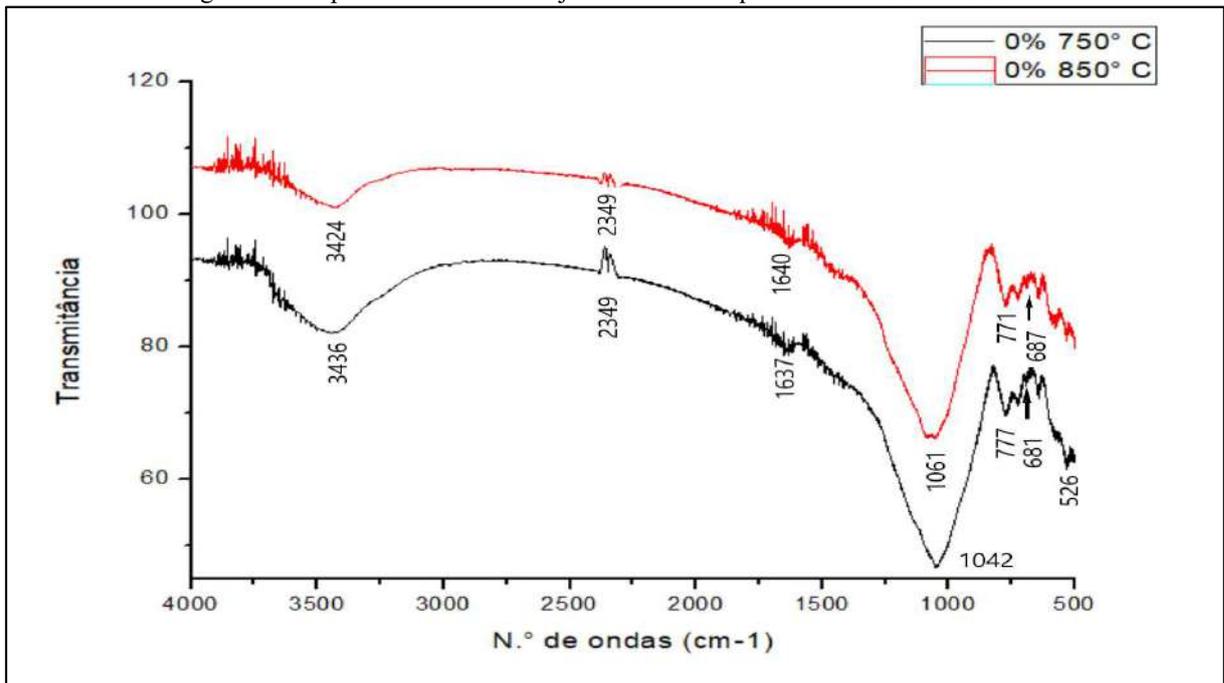


Fonte: A Autora (2021).

5.7 FTIR dos tijolos queimados

A queima da massa cerâmica para fabricação dos tijolos mostra que em ambas as temperaturas estudadas ocorrem alterações nas bandas referentes ao estiramento da ligação OH entre folhas de tetraedro e hexaedro e deslocamentos das bandas de Si-O ordenado de aluminossilicatos (Figura14). Observa-se também a presença de quartzo e hematita, indicando que estas fases não se alteram durante a queima.

Figura 14 - Espectro de FTIR dos tijolos sem RGA queimados a 750°C e 850°C.



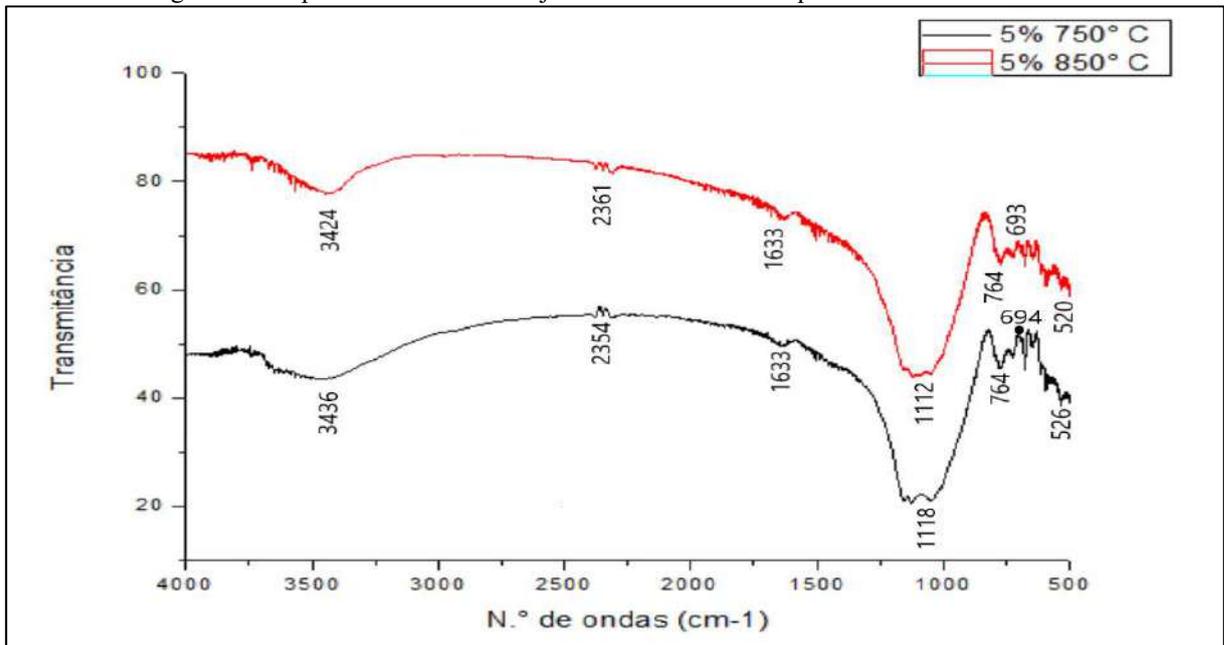
Fonte: A Autora (2021).

A substituição parcial de material argiloso por RGA no percentual de 5% causa discretas mudanças no espectro de FTIR dos tijolos tratados termicamente a 750°C e 850°C, conforme Figura 15. É possível evidenciar a intensificação das bandas de absorção em 1112 cm^{-1} e 1118 cm^{-1} do RGA, características do íon SO_4^{2-} . Essas bandas são mais intensas em 750°C, temperatura que antecede a transformação de CaSO_4 em CaO . A literatura reporta que o sulfato de cálcio puro se decompõe lentamente quando a temperatura está abaixo de 1200°C e mais rapidamente quando está acima de 1250°C, no entanto a presença de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 podem interferir na temperatura de decomposição do CaSO_4 por formação de outras fases como silicatos de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio (YAN *et al*, 2015). A temperatura de decomposição inicial do CaSO_4 pode ser reduzida pela existência de SiO_2 devido a reações de estado sólido entre SiO_2 , CaO e silicato mineral formado. Mesmo sendo possível a redução de temperatura de decomposição sulfato de cálcio, os dados de FTIR sugerem que possivelmente as temperaturas utilizadas não foram suficientes para quebrar as ligações de Si-O e Ca-O das fases presentes.

A 850°C, essas bandas do íon sulfato e íon OH do sulfato de cálcio começam a se definir e aumentar em intensidade progressivamente à medida que se aumenta o percentual de substituição. Isto sugere que o RGA não se decompõe totalmente durante a queima dos tijolos (Figuras 15 e 16). No entanto, como os resultados obtidos de absorção de água indicam aumento de absorção de água pelos corpos de prova à medida que o percentual de RGA aumenta, é

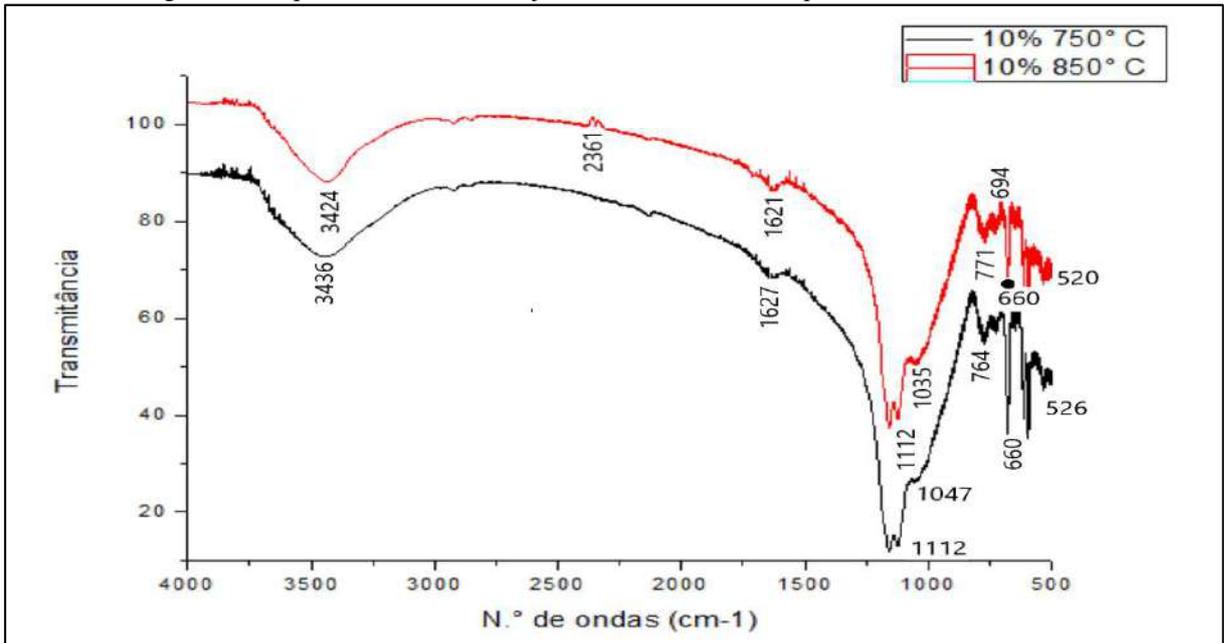
possível que os tratamentos térmicos tenham gerado vazios na microestrutura, não por decomposição térmica do sulfato de cálcio hemiidratado, mas devido às mudanças cristalográficas do RGA (Hexagonal → Ortorrômbico → Cúbico). A presença das bandas do íons SO_4^{2-} sugere que o tratamento térmico realizado a 750°C e 850°C pode ter modificado o arranjo cristalino do sulfato de cálcio (conforme literatura), e mesmo não ocorrendo mudança de massa, pode explicar a perda de desempenho mecânico nos corpos de prova, como apresentado acima.

Figura 15 - Espectros de FTIR dos tijolos com 5% de RGA queimados a 750°C e 850°C .



Fonte: A Autora (2021).

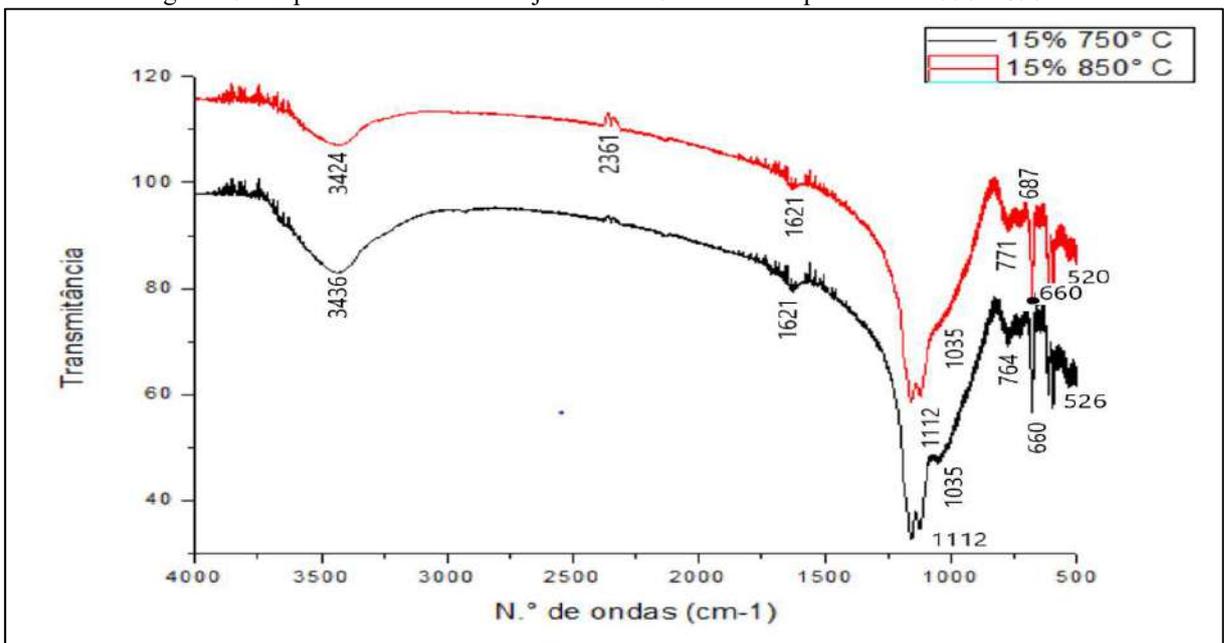
Figura 16 - Espectros de FTIR dos tijolos com 10% de RGA queimados a 750 e 850°C.



Fonte: A Autora (2021).

Na Figura 17, são mostrados os espectros de FTIR referentes às amostras com 15% de RGA. Evidencia-se a grande semelhança de comportamento com as amostras da Figura 16, como também a mudança quando os espectros são comparadas à Figura 14. Estes espectros concordam com os resultados tecnológicos, pois a diferença dos resultados foi mais significativa entre os percentuais de 5% e 10% de RGA, atenuando e sendo menos significativa quanto se compara os percentuais de 10% e 15%.

Figura 17 - Espectros de FTIR dos tijolos com 15% de RGA queimados a 750 e 850°C.

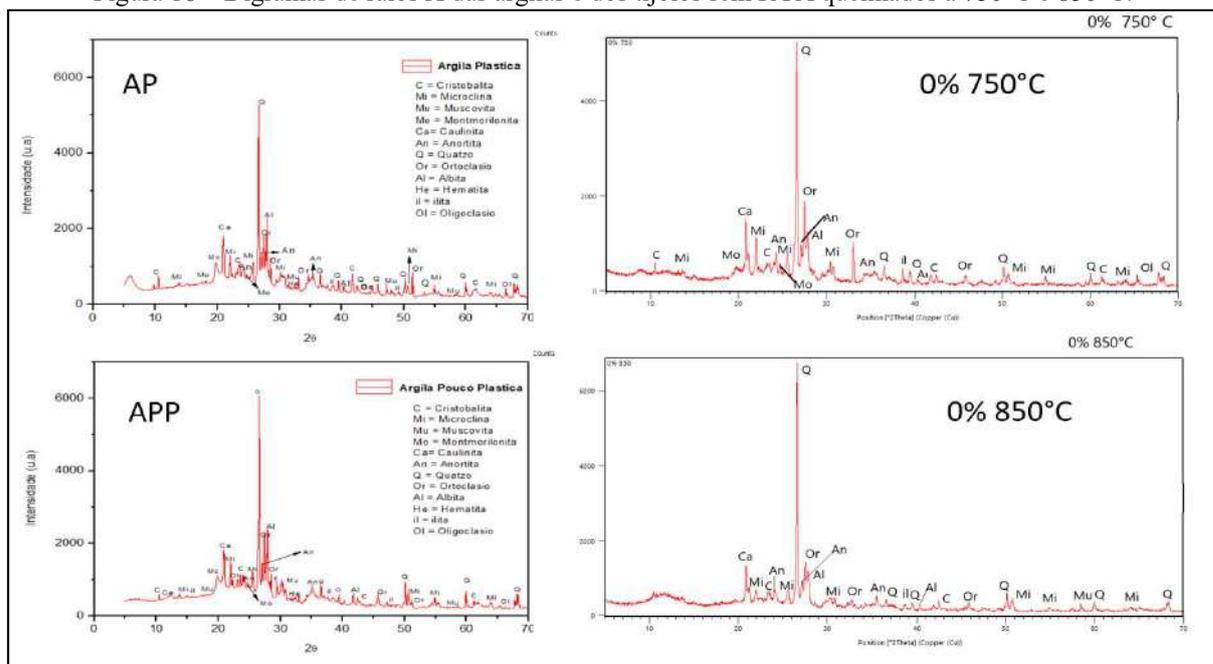


Fonte: A Autora (2021).

5.8 DRX dos tijolos queimados

Os difratogramas de raios X dos tijolos sem RGA queimados a 750°C e 850°C estão apresentados na Figura 18. Na Tabela 15, estão apresentados os dados de refinamento do TOPAS com a quantificação das fases presentes.

Figura 18 – Difratogramas de raios X das argilas e dos tijolos sem RGA queimados a 750°C e 850°C.



Fonte: A Autora (2021).

De acordo com o difratogramas, percebe-se que a grande maioria dos picos da matéria prima permanecem tanto na temperatura de 750°C como na de 850°C, a maior diferença irá se identificar na intensidade que esses picos são representados. Dentre os picos que são identificados na AP e APP que se repetem nas duas temperaturas de sinterização estão: Cristobalita ($2\theta = 23,5 - 41,8$), Caulinita ($2\theta = 20,8$), Microclina ($2\theta = 22,0 - 25,7 - 50,63$), Quartzo ($2\theta = 26,8 - 36,6 - 68,2$), Ilita ($2\theta = 38,6$), Anortita ($2\theta = 24,3 - 27,5$), Montmorilonita ($2\theta = 24,7$), Ortoclasio ($2\theta = 27,9 - 45,8$), Albita ($2\theta = 28,6 - 40,3$). Alguns outros picos acabam sendo consumidos pelo sistema, de modo que não são mais identificados em ambas temperaturas de sinterização, dentre eles estão: Hematita ($2\theta = 32,0 - 58,5$), Muscovita ($2\theta = 19,9$), Caulinita ($2\theta = 13,8$).

Na quantificação das fases (Tabela 15), é possível perceber a diferença entre as temperaturas de sinterização, cada fase apresentou um percentual representativo diferente em função da sua queima, pois à medida que a temperatura vai aumentando, os átomos sofrem rearranjos atômicos que provocam consumo de algumas fases e aparecimento de outras.

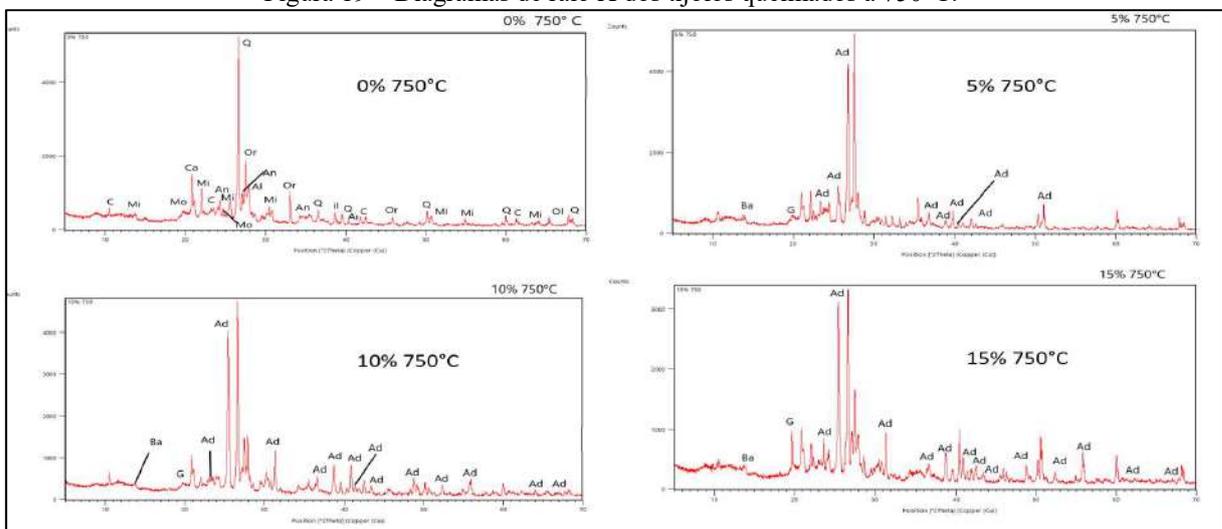
Tabela 15 – Quantificação das fases das argilas e da mistura delas após queima a 750°C e 850°C.

Fase	AP %	APP %	0% 750°C	0% 850°C
Quartzo	9,83	10,49	14,79	18,80
Albita	8,65	7,08	6,37	11,35
Anortita	6,23	4,21	4,91	8,67
Microcline	3,15	8,54	8,39	10,06
Oligoclasio	7,43	8,8	11,49	5,22
Ortoclasio	12,93	16,26	19,86	21,15
Muscovita	4,41	9,78	6,09	2,11
Montmorilonit a	17,71	13	0,47	7,99
Caulinita	2,34	0,67	6,65	3,01
Cristobalita	1,94	2,66	2,89	1,02
Ilita	23,97	17,95	16,49	9,96
Hematite	1,42	0,57	1,59	0,65

Fonte: A Autora (2021).

Nas Figuras 19 e 20, são mostrados os DRXs dos tijolos queimados a 750°C e 850°C, respectivamente. É possível identificar nestes difratogramas que com a substituição parcial do material argiloso por RGA ocorre a redução dos picos encontrados nas argilas utilizadas na produção da massa cerâmica e o aparecimento de novos picos, característicos do sulfato de cálcio (bassanita, gipsita e anidrita). Na queima, acontece a fusão de alguns minerais presentes (como feldspatos), como também o rearranjo das fases argilosas e a interação com as fases do gesso, sem haver a decomposição térmica deste último, o que pode ser comprovado pela ausência de picos de óxido de cálcio.

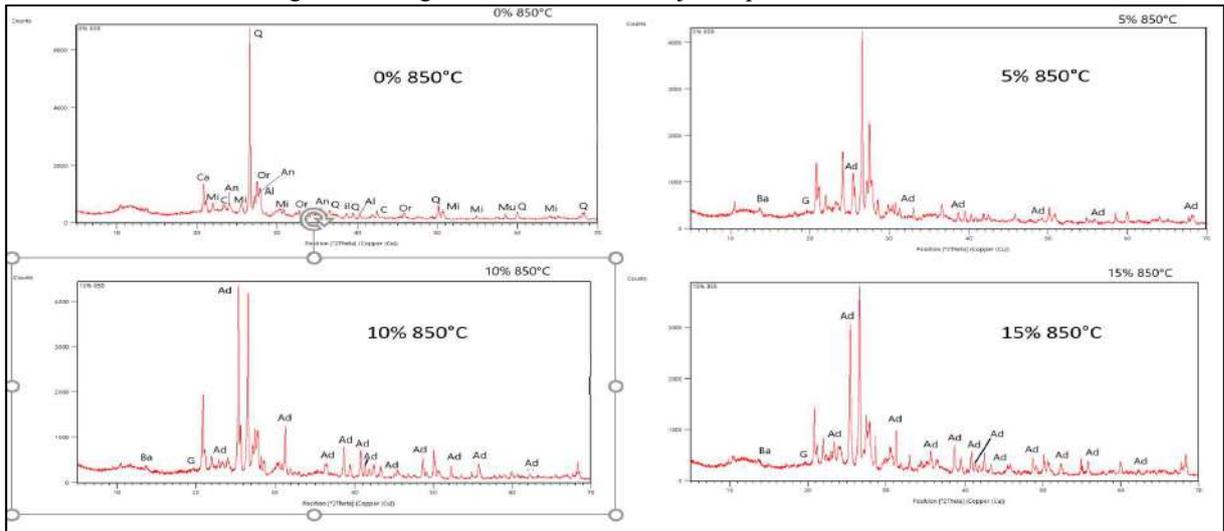
Figura 19 – Diagramas de raio X dos tijolos queimados a 750°C.



Fonte: A Autora (2021).

Na Figura 19 percebe-se que o aumento do percentual de substituição tende a aumentar a intensidade dos picos de RGA, representados por: Gipsita ($2\theta = 20$); Bassanita ($2\theta = 13,8$) e Anidrita ($2\theta = 23,7 - 25,8 - 31,4 - 36,7 - 38,8 - 39,7 - 40,4 - 42,6 - 51,1 - 55,7 - 62,2 - 64,0 - 68,3$).

Figura 20 - Diagramas de raios X dos tijolos queimados a 850°C.



Fonte: A Autora (2021).

Ao queimar os tijolos a 850°C (Figura 20) ocorre o surgimento dos mesmos picos citados para os sinterizados a 750°C, porém a quantidade de picos presentes e sua intensidade vai depender do percentual adicionado, a tendência da quantidade de picos ser maior nos maiores percentuais como 10% e 15% de RGA permanece. Isto indica que também nesta temperatura não há decomposição do sulfato de cálcio hemiidratado.

Na Tabela 16, é mostrada a quantificação das fases da matéria-prima (Argilas e RGA) e dos tijolos queimado nas suas respectivas substituições (0%, 5%, 10%, 15%) e temperaturas de queima (750°C e 850°C). Nela é possível analisar os percentuais das fases presentes nos tijolos e suas diferenças quando se aumenta o RGA e a temperatura de sinterização.

Tabela 16 – Quantificação das fases da matéria-prima e dos tijolos queimados a 750°C e 850°C.

Fase Cristalina / Amorfa	Matéria-prima			Tijolos após Queima							
	AP %	APP %	RGA	750°C				850°C			
				0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Quartzo	9,83	10,49	-	14,79	10,46	9,85	11,14	18,80	13,45	12,48	11,11
Albita	8,65	7,08	-	6,37	3,97	1,45	3,26	11,35	2,36	9,01	11,72
Anortita	6,23	4,21	-	4,91	7,19	4,58	4,38	8,67	9,32	2,65	8,21
Microcline	3,15	8,54	-	8,39	9,30	8,03	2,79	10,06	4,75	8,63	6,04
Oligoclasio	7,43	8,8	-	11,49	15,71	7,41	8,32	5,22	19,82	4,27	5,13
Ortoclasio	12,93	16,26	-	19,86	16,25	15,55	17,79	21,15	18,53	10,26	15,41
Muscovita	4,41	9,78	-	6,09	7,29	4,38	5,48	2,11	8,55	4,98	3,50
Montmorilonita	17,71	13	-	0,47	4,73	4,52	6,10	7,99	4,53	4,82	6,09
Caulinita	2,34	0,67	-	6,65	0,96	0,78	0,06	3,01	0,74	2,05	0,06
Cristobalita	1,94	2,66	-	2,89	1,78	0,59	1,86	1,02	0,60	0,51	1,03
Ilita	23,97	17,95	-	16,49	13,39	12,19	11,80	9,96	8,53	5,72	4,90
Hematite	1,42	0,57	-	1,59	1,17	0,33	0,32	0,65	1,25	0,00	1,03
Anidrita	-	-	3,19	-	5,82	27,45	24,02	-	6,20	33,36	21,79
Bassanita	-	-	96,38	-	0,46	1,40	1,27	-	0,11	0,01	2,83
Gipsita	-	-	0,43	-	1,53	1,49	1,40	-	1,26	1,25	1,14
Fase Amorfa	0,61	0,57	26,9	13,59	5,6	7,86	16,62	18,13	13,62	10,37	11,99

Fonte: A Autora (2021).

Em diferentes temperaturas, cada fase, vai sofrendo alterações na sua microestrutura. Em alguns casos, podem haver apenas rearranjos permanecendo a mesma fase, como no caso do quartzo. Os percentuais dessa fase sugerem que ela ainda permaneça nas duas temperaturas de sinterização, porém por volta dos 573°C ele passa da forma alfa para a forma beta e essa transição provoca expansão volumétrica de aproximadamente 0,45% (Le Chatelier, 1889), o que justifica pequenas variações nos percentuais de uma amostra para outra.

Alguns argilominerais são consumidos, como: Caulinita que aos 600°C sofre desidroxilação completa formando a Metacaulinita; A Ilita e Muscovita (que possuem formas trioctaédricas) que em torno de 550°C perdem água de hidroxilas, observando-se também a destruição da estrutura cristalina. Já as Montmorilonitas possuem essa quebra da estrutura cristalina até os 700°C (Sousa Santos, 1928).

Os feldspatos sofrem perda de ordem cristalina no processo de fusão. Os valores apresentados na Tabela 16 sugerem que alguns feldspatos permanecem significativamente ordenados, como a Anortita, Microclina, Oligoclasio, Ortoclasio. Mesmo assim, acredita-se que tenham ocorrido algumas transformações, pois em alguns tijolos estas fases possuem percentual reduzido. Observa-se a redução do percentual de albita, à medida que aumenta o % de RGA

nos tijolos sinterizados a 750°C. Já nos tijolos queimados a 850°C, não é possível fazer correspondência.

Como esperado, foi observado que não ocorreu a decomposição de sulfato de cálcio (gipsita, bassanita e anidrita), pois a temperatura de sinterização foi escolhida para evitar a liberação do enxofre, o que poderia provocar intercorrências prejudiciais aos resultados de desempenho. No entanto, à medida que se incorporou o RGA ocorreu o aumento da fase Anidrita que surgem a partir de 250°C, uma pequena redução da Gipsita e oscilações na Bassanita. Os dados de retração linear não apresentaram variações significativas para as limitações especificadas por norma, isso sugere que o RGA não passa por fenômenos térmicos que causem tais variações, o que aponta seu uso seguro do ponto de vista na regularidade dimensional pós queima.

Percebe-se uma mudança brusca de influência de fases do RGA (Anidrita, Bassanita e Gipsita) quando se passa da proporção de 5% para 10%, sendo essa diferença um pouco atenuada quando se incorpora 15% do RGA no sistema. Esse comportamento acaba dando sentido os resultados de resistência, provando que a partir dos 10% de adição essas fases ganham maior interação e interferência nos arranjos atômicos, diminuindo assim a resistência dos tijolos cerâmicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Os resultados das análises de desempenho de todos os percentuais de substituição do RGA atenderam as exigências mínimas exigidas por normas, para ambas as temperaturas estudadas.
- A diferença de resistência deve ser associada a uma mudança brusca de influência de fases do RGA (Anidrita, Bassanita e Gipsita) quando se passa da proporção de 5% para 10%, sendo essa diferença um pouco atenuada quando se incorpora 15% do RGA no sistema.
- A alta plasticidade das argilas usadas para a produção da massa cerâmica foi confirmada pela presença significativa dos argilominerais Montmorilonita [17,71% (AP) e 13,0% (APP)] e Ilita [23,97% (AP) e 17,95% (APP)] que possuem características plásticas.
- Foi constatado que nos tijolos cerâmicos, a presença de Montmorilonita e Muscovita com suas propriedades expansivas de caráter linear, tenha atenuado a retração das demais fases, e assim refletindo em retrações lineares inferiores a 1% nos tijolos queimados.
- A composição mineralógica das argilas com considerável percentual de feldspatos 29,74% na Argila Plástica e 36,35% na Argila Pouco Plástica (caracterizados como materiais fundentes), provavelmente, permitiu o adequado molhamento das partículas, favorecendo o preenchimento de poros, mesmo em temperaturas de sinterização mais baixas. Isso deve ter contribuído para valores baixos de absorção de água e maiores resistências nos tijolos de referência.
- Os espectros de FTIR e os difratogramas de raios X sugerem que não ocorre a decomposição da gipsita em todas as massas cerâmicas estudadas, permitindo a produção de tijolos cerâmicos com RGA com desempenho tecnológico adequado, sem emissão de gases de enxofre que tem potencial poluidor para a atmosfera.
- O percentual de 5% de substituição de material argiloso por RGA no sistema cerâmico forneceu os melhores resultados de desempenho tecnológico para ambas as temperaturas de sinterização estudadas, por resultar em pequenas perdas de desempenho em relação aos tijolos sem resíduo, sugerindo uso mais seguro nesta concentração.

- A substituição de RGA na matriz cerâmica é viável em termos de desempenho tecnológicos, de meio ambiente e sustentabilidade. Sugere-se a verificação da possibilidade de arrasre do RGA incorporado nos tijolos através de mecanismos de solubilização ou lixiviação.

REFERÊNCIAS

UKWATTA, A.; MOHAJERANI, A. **Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks.** *Constr. Build. Mater.*, 142 (2017), pp. 11-22.

KADIR, A.A.; SALIM, N.S.A.; SARANI, N.A.; RAHMAT, N.A.I.; ABDULLAH, M.M.A.B. **Properties of fired clay brick incorporating with sewage sludge waste.** *AIP Conf. Proc.* (2017), p. 020150.

ABI, C. B. E. **Effect of borogypsum on brick properties.** *Construction and Building Materials*, 2014.

AL-FAKIH A., MOHAMMED B. S., LIEW M. S, NIKBAKHT E. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: An update review. **Journal of Building Engineering**, V. 21. pag. 37-54. 2019.

AREIAS, I. O. R.; VIEIRA, C. M. F.; MANHÃS, R. da S. T.; INTORNE, A.C. Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ete) em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, vol.63 no.367 São Paulo jul./set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA VERMELHA – ABCERAM. **Informações técnicas - definição e classificação.** <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/> Acessado: 20 de novembro de 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYWALL - ABRAGESSO. **Números do segmento.** Disponível em: <www.drywall.org.br>, 2011. Acesso em: 03 mai. 2019.

BARBA, A.; NEGRE, F.; ORTS, M.J.; Escardino, A. **Oxidation of black core during the firing of of ceramic ware** – 3. Influence of the thickness of the piece and the composition of the black core. *Ceram. Trans. J.*, 91, p. 36, 1992.

BARRETO, G. N. S.; D. G. C. G.; G. M. C. B.; V. C. M. F.; B. M. P. **Desenvolvimento de cerâmica vermelha com blend de resíduo**. 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, São Paulo, 2018.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 829-834, 2002.

BRASIL, Resolução CONAMA nº 431, de 24 de maio de 2011. **Classificação de Resíduos**. Publicado no D.O.U. de 21 maio 2012.

BRUXEL, F. R.; OLIVEIRA, E. C.; STULP, S.; MULLER, C. S.; ETCHEPARE, H. D. Estudo da adição de resíduo (lodo) de gemas na massa cerâmica vermelha. **Cerâmica. São Paulo**, v. 58, n. 346, p. 211-215, 2012.

CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CARTER, C.B.; NORTON, M.G. *Ceramic Materials Science and Engineering*, Springer Science+Business Media, LLC, 2007.

CIPRIANO, P. B. **Produção de cerâmica vermelha utilizando argila da mineração de gipsita e resíduo de gesso**. Revista Acta Brasiliensis, V. 3, Nº1, 2019.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, R. R.; SANTOS, G.T.A; GÁSQUEZ, M.G; ROMERO, M.; BOLÍVAR J. P. **Influence of the addition of phosphogypsum on some properties of ceramic tiles**. Construction and Building Materials, 2018.

COTA, T. G. **Incorporação de Resíduos da Fabricação de Ferro-ligas de Manganês e de Finos de Esteatito na Produção de Cerâmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

D. ELICHE-QUESADA, M. FELIPE-SESÉ, J. LÓPEZ-PÉREZ, A. Infantes-Molina.

Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks. *Ceram. Int.*, 43 (1) (2017), pp. 463-475.

DONTSOVA, K. M., & NORTON, L. D. **Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg.** *Soil Science*, 167(3), 184-193, 2002.

DNPM, 2012. **Sumário Mineral. Mica.** Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7398.

DUARTE, C. N. **Fosfogesso em Cerâmica Vermelha para Fabricação de Tijolo.** 15º Concurso Falcão Bauer, 2008.

G. GOEL, A.S. KALAMDHAD. **Degraded municipal solid waste as partial substitute for manufacturing fired bricks** *Constr. Build. Mater.*, 155 (2017), pp. 259-266.

GLAYDSON SIMOES DOS REIS, BOGDAN GRIGORE CAZACLIU , LEXIS COTHENET, PHILIPPE POUILLAIN, MICHAELA WILHELM , CARLOS HOFFMANN SAMPAIO, EDER CLAUDIO LIMA ,ESLEI AMBROS, JEAN-MICHEL TORRENTI. **Fabrication, microstructure, and properties of fired clay bricks using construction and demolition waste sludge as the main additive.** *Journal of Cleaner Production*, 2020.

GOMES, C. B. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia.** Edgard Blücher Ltda. São Paulo (SP), 1984. 218p.

GOMES,C.F. **Argilas. O que são e para que servem,** Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986, 457p.

GRIM, R. E.; **Clay Mineralogy**, 2 ed. New York, McGraw Hill, 596 p (1968).

História. **Luzarte**, 2021. Disponível em: <<https://luzarte.com.br/historia/>>. Acesso em: 05, dezembro de 2019.

H. LE CHATELIER, **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris** 108 (1889) 1046.

JUNIOR, M. C. **Panorama da Indústria Cerâmica de Sanitários no Brasil**. Revista Cerâmica Industrial, 2010.

K.M. HASSAN, K. FUKUSHI, K. TURIKUZZAMAN, S.M. MONIRUZZAMAN. **Effects of using arsenic-iron sludge wastes in brick making**. Waste Manag., 34 (6) (2014), pp. 1072-1078.

KANNO, W. M. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. Tese de Doutorado. 130p. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciências e Engenharia dos Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

KRINDGES, I. **Avaliação da incorporação de pós de rochas e da temperatura de sinterização no desempenho e microestrutura de cerâmicas vermelhas**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

MARYAM ACHIK , HAYAT BENMOUSSA, ABDELLAH OULMEKKI, MUSTAPHA IJJAALI, NOUREDDINE EL MOUDDEN, ABDELHAMID TOUACHE, GIL GONZALEZ ÁLVARO, FRANCISCO GUTIÁN RIVERA, ANTONIA INFANTES-MOLINA, DOLORES ELICHE-QUESADA, OLGA KIZINIEVIC. **Evaluation of technological properties of fired clay bricks containing pyrrhotite ash**. Construction and Building Materials, 2020.

M. SUTCU, H. ALPTEKIN, E. ERDOGMUS, Y. ER, O. GENCEL. **Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials**. Constr. Build. Mater., 82 (2015), pp. 1-8.

N. PHONPHUAK, S. KANYAKAM, P. CHINDAPRASIRT. **Utilization of waste glass to enhance physical–mechanical properties of fired clay brick**. J. Clean. Prod., 112 (2016), pp. 3057-3062.

NEVES, GELMIRE ARAÚJO. **Reciclagem de Resíduos da Serragem de Granitos para uso como Materia-Prima Ceramica**. Universidade Federal de Campina Grande Centro de Ciências e Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Campina Grande – Paraíba. 2004.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

OLIVEIRA, C. **Influência do teor de feldspato espodumênio e albita na sinterização de uma massa cerâmica triaxial**. São João del-Rei, UFSJ, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2012.

PETRUCCI, E.G. **Materiais de construção**, 12ª edição, Editora São Paulo: Globo, 2003.

RAMOS, S. O.; MACEDO R. S.; CARTAXO, M. J.; MENEZES, R. R.; NAVARRO, L. N. L.; NEVES, G. A. N. **Caracterização de argilas usadas para cerâmica estrutural**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.5.3 65-70, 2010.

ROCHA, F.N.; SUARES, P.A.; GUIMARÃES, E.M. **Argilas e suas Aplicações em Utensílios e Materiais Cerâmicos**. Revista Virtual de Química, V. 6. no. 4. p. 1105-1120., 2014.

S. ABBAS, M.A. SALEEM, S.M.S. KAZMI, M.J. MUNIR. **Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: mechanical and durability properties**. J. Build. Eng., 14 (2017), pp. 7-14.

S.M.S. KAZMI, M.J. MUNIR, Y.-F. WU, A. HANIF, I. PATNAIKUNI. **Thermal performance evaluation of eco-friendly bricks incorporating waste glass sludge**. J. Clean. Prod., 172 (2018), pp. 1867-1880.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de Argilas, Fundamentos e Aplicações**, Editora Universitária, São Paulo, 1975.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia de argilas**, v.1, 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 408p.

SCRIBOT, W. M. C.; B. M.; M. Y.; A. N. **A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production.** Construction and Building Materials, 2018.

SILVA, J. B. **Avaliação da Potencialidade dos Resíduos de Gesso de Revestimentos Incorporados em Formulações de Massas Cerâmicas.** Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SILVA, R. H. L. **Incorporação de Resíduo Pós-sinterização da Indústria de Cerâmica Hidrosanitária a sua própria formulação.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

SOARES, J. P. **Caracterização do Gessos-Alfa Produzidos por Processo Hidrotermal e Calcinação sob Pressão de Vapor de Água pela Técnica de Difração de Raio-X de Alta Resolução.** 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Junho, 2005.

SOKEN, A. M. **Reaproveitamento do Gesso Descartado na Construção Civil em Cerâmica Vermelha.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia dos Materiais). UTFPR. Londrina, 2015.

TURKEL, S.; AKSIN, E. **A comparative study on the use of fly ash and phosphogypsum in the brick production.** Indian Acad Sci 2012; 37:595-607.?