



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

MARCOS VINÍCIUS DA SILVA FERREIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE CORPOS CERÂMICOS
INCORPORADOS COM RESÍDUO SIDERÚRGICO**

FORTALEZA

2019

MARCOS VINÍCIUS DA SILVA FERREIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE CORPOS CERÂMICOS
INCORPORADOS COM RESÍDUO SIDERÚRGICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F442a Ferreira, Marcos Vinícius da Silva.
Análise das propriedades físicas de corpos de prova cerâmicos incorporados com resíduo siderúrgico / Marcos Vinícius da Silva Ferreira. – 2019.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Profa. Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios.

1. Cerâmica Vermelha. 2. Resíduo Siderúrgico. 3. Pó de Ciclone. I. Título.

CDD
620.1

MARCOS VINÍCIUS DA SILVA FERREIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE CORPOS CERÂMICOS
INCORPORADOS COM RESÍDUO SIDERÚRGICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Alexandra de Sousa Rios (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Sílvio Veras Albuquerque
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe e padrasto, Jaila e Sales,
e ao meu tio, Professor Clielder.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me mostra a cada dia a sua graça e me faz perceber que o dom da vida é muito mais valioso que qualquer outra coisa.

A minha mãe e padrasto por todo o suporte durante esses cinco anos em que me dediquei completamente aos estudos. Por todo o investimento desde a educação básica e todo esforço que fizeram para que o sonho da minha formatura se tornasse realidade.

Aos amigos do baja, com quem vivenciei bons momentos.

Aos amigos do Laboratório LPTS da UFC, com quem dividi enriquecedores momentos de aprendizado.

Aos amigos da graduação que certamente levarei por toda a vida: Arthur Vieira, Anderson Germano, Caio Maciel, Phellipe Peterson, João Marcos, Laís Raynne e Rai Bernardo por todos os momentos em que dividimos noites viradas de estudo, angustias e dificuldades durante o curso, mas também momentos de comemoração dos êxitos obtidos.

Ao professor Perboyre por me permitir usufruir do Laboratório de Materiais de Construção Civil do IFCE para a realização dos ensaios, e à bolsista Janaína, que foi muito solícita ao ajudar na realização dos mesmos.

A minha namorada Thiane Fontenele, por compactuar com os meus sonhos e sempre me fazer acreditar que é possível realizá-los.

Ao meu antigo chefe Saulo Oliveira, por me incentivar e me mostrar que a engenharia ainda é uma bela e promissora área do conhecimento.

Ao ex-colega de trabalho Wellington Pereira por ajudar-me quando mais precisei durante a mudança de estágio.

Ao meu tio Clielder, por todo o suporte e incentivo financeiro e moral durante os primeiros anos de curso.

RESUMO

Este trabalho visou avaliar as propriedades físicas de massas argilosas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha feitas com a incorporação de resíduo sólido em forma de pó, também chamado de pó de ciclone, proveniente do setor siderúrgico em sua formulação. As massas fabricadas continham os seguintes teores de resíduo: 5, 7 e 10% em peso. O traço de argila utilizado foi 1:1 que continha 50% de argila plástica e 50% de argila não plástica proveniente de uma jazida de cerâmica vermelha localizada em Itaitinga (CE). Os resultados de retração linear total, perda de massa total, absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente são apresentados para a massa argilosa. 45 corpos-de-prova foram conformados por prensagem hidráulica e queimados nas temperaturas 800 °C, 850 °C e 900 °C. As propriedades físicas foram determinadas, então, em função da composição e da temperatura de queima. As amostras com 10% de resíduo obtiveram em média 15,37% de Absorção de Água; 28,59% de porosidade aparente e 1,86 g/cm³ de massa específica aparente. Desta forma, estes ensaios indicaram que a adição de resíduo não apresentou diferença significativa aos resultados obtidos em amostras sem resíduo, mostrando que o mesmo tem potencial para ser utilizado na indústria cerâmica vermelha.

Palavras-chave: Resíduo siderúrgico, cerâmica vermelha, pó de ciclone.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the physical properties of clayey masses used in the red ceramic industry made with the incorporation of solid residue in the form of powder, also called cyclone powder, from the iron and steel industry in its formulation. The manufactured masses contained the following residue contents: 5, 7 and 10% by weight. The trace of clay used was 1:1 which contained 50% of plastic clay and 50% of nonplastic clay from a red ceramic deposit located in Itaitinga (CE). The results of total linear retraction, total mass loss, water absorption, apparent porosity and apparent specific mass are presented for the clay mass. 45 specimens were formed by hydraulic pressing and were burned at temperatures of 800 °C, 850 °C and 900 °C. The physical properties were then determined according to the composition and the firing temperature. The specimens with 10% of residue obtained 15.37% of Water Absorption on average; 28.59% of Apparent Porosity and 1.86 g/cm³ of Apparent Specific Mass. Thus, these tests indicated that the addition of residue did not present significant difference to the results obtained in samples without residue, showing that it has potential to be used in the red ceramic industry.

Keywords: Blast furnace residue, red ceramics, cyclone powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Classificação das argilas de queima vermelha.....	19
Figura 2	– Estágios de limpeza do gás do alto forno.....	20
Figura 3	– Composição em massa do Pó de Ciclone.....	21
Figura 4	– Variação da pressão e potência de extrusão em função do teor de umidade para argila mais plástica e menos plástica.....	24
Figura 5	– Processo de extrusão de massa cerâmica.....	25
Figura 6	– Prensagem de tijolos.....	26
Figura 7	– Secagem do sistema argila-água.....	27
Figura 8	– Exemplo de curva de queima.....	29
Figura 9	– Molde metálico utilizado para conformação dos corpos-de-prova.....	33
Figura 10	– Secagem dos corpos-de-prova.....	33
Figura 11	– Corpos-de-prova submersos.....	38
Figura 12	– Pesagem dos corpos-de-prova imersos.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Absorção de água para os três percentuais de resíduo.....	49
Gráfico 2	– Porosidade Aparente para os três percentuais de resíduo.....	51
Gráfico 3	– Massa Específica Aparente para os três percentuais de resíduo.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Retração linear total para peças queimadas a 800 °C.....	42
Tabela 2 – Retração linear total para peças queimadas a 850 °C.....	43
Tabela 3 – Retração linear total para peças queimadas a 950 °C.....	43
Tabela 4 – Perda de massa total para peças queimadas a 800 °C.....	44
Tabela 5 – Perda de massa total para peças queimadas a 850 °C.....	45
Tabela 6 – Perda de massa total para peças queimadas a 900 °C.....	46
Tabela 7 – Absorção de água para peças queimadas a 800 °C.....	47
Tabela 8 – Absorção de água para peças queimadas a 850 °C.....	47
Tabela 9 – Absorção de água para peças queimadas a 900 °C.....	48
Tabela 10 – Porosidade Aparente para peças queimadas a 800 °C.....	50
Tabela 11 – Porosidade Aparente para peças queimadas a 850 °C.....	50
Tabela 12 – Porosidade Aparente para peças queimadas a 900 °C.....	51
Tabela 13 – Massa Específica Aparente para peças queimadas a 800 °C.....	52
Tabela 14 – Massa Específica Aparente para peças queimadas a 850 °C.....	53
Tabela 15 – Massa Específica Aparente para peças queimadas a 900 °C.....	53
Tabela 16 – Comparativo das médias das medições ao longo dos corpos-de-prova.....	55
Tabela 17 – Comparação dos melhores resultados.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
FIEC	Federação das Indústrias do estado do Ceará
IAU	Instituto de Arquitetura e Urbanismo
IEL	Instituto Evaldo Lodi
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
MEA	Massa específica aparente
PA	Porosidade aparente
PT	Perda de massa total
RB	Percentual de resíduo bruto
RLq	Retração linear de queima
RLs	Retração linear de secagem
RLt	Retração linear total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Argilas	18
3.1.1	<i>Classificação das argilas</i>	18
3.2	Utilizações de resíduo em cerâmica vermelha	19
3.3	Processos de limpeza do gás do alto forno	20
3.3.1	<i>O resíduo: Pó de ciclone</i>	20
3.4	Processos de fabricação de cerâmica vermelha	21
3.4.1	<i>Preparação da matéria-prima</i>	21
3.4.2	<i>Preparação da massa argilosa</i>	22
3.4.3	<i>Formação das peças</i>	22
3.4.3.1	<i>Extrusão</i>	22
3.4.3.2	<i>Prensagem</i>	25
3.4.4	<i>Tratamento térmico</i>	26
3.4.4.1	<i>Secagem</i>	26
3.4.4.2	<i>Queima</i>	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	Matérias-primas: argila e resíduo siderúrgico	31
4.1.1	<i>Seleção do traço</i>	31
4.2	Preparação dos corpos de prova	32
4.3	Ensaio tecnológicos	34
4.3.1	<i>Retração linear</i>	34
4.3.2	<i>Perda de Massa</i>	35
4.3.3	<i>Absorção de água</i>	36
4.3.3.1	<i>Determinação da massa seca</i>	37
4.3.3.1	<i>Determinação da massa úmida</i>	37
4.3.3.1	<i>Determinação do índice de absorção de água</i>	38
4.3.4	<i>Porosidade Aparente</i>	38
4.3.4	<i>Massa específica aparente</i>	40

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Ensaio tecnológico	41
5.1.1	<i>Retração linear</i>	41
5.1.2	<i>Perda de massa</i>	44
5.1.3	<i>Absorção de água</i>	46
5.1.4	<i>Porosidade aparente</i>	49
5.1.5	<i>Massa específica aparente</i>	52
5.2	Comparações de Resultados	54
6	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	APÊNDICE – Análises estatísticas	62

1 INTRODUÇÃO

Cerâmicas vermelhas são materiais presentes na construção civil geralmente na forma de tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos. Possuem esse nome por conta da sua coloração predominantemente vermelha.

A constante busca por redução de custos e melhoria nos processos de produção de cerâmicas vermelhas tem motivado diversas publicações e artigos científicos. Alguns traços (proporções das misturas utilizadas na confecção dos produtos) estão sendo constantemente analisados, sempre com o intuito de buscar a melhor combinação de matéria-prima com o menor custo de fabricação e melhores propriedades físico-químicas.

Na indústria de cerâmica vermelha, a matéria-prima fundamental é a argila (ALMEIDA, 2009). No passado, esse produto era composto basicamente de dois tipos de argila: a plástica, comumente chamada de “forte”, ou também “dura” ou “gorda”; e a não plástica, também chamada de “fraca”, “mole”, ou ainda “magra”. Porém, ao avaliar o setor minero-cerâmico brasileiro, percebe-se que as condições de suprimento dessas matérias-primas são insatisfatórias (Cabral Junior *et al*, 2010), o que leva grande parte dos ceramistas a formularem novas massas de mistura e compósitos de forma aleatória, por meio de tentativa e erro, baseando-se apenas na experiência, reduzindo assim a confiabilidade do produto final e ocasionando retrabalhos. Além disso, segundo o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas-SEBRAE (2015), a maioria dos empresários do ramo cerâmico não tem compreensão ampla sobre as características, desejos e expectativas dos consumidores, consequentemente esses empresários tendem a desenvolver produtos a partir de critérios que atendem a sua própria percepção.

Siderúrgicas no estado do Ceará produzem toneladas de resíduos sólidos, em forma de pó, por mês e uma opção para a disposição final deste é a sua incorporação na indústria cerâmica vermelha, uma vez que este pó possui alguns metais pesados e componentes que não o tornam totalmente apropriado para reutilização no processo de produção do aço. Além disso, devido à classe do resíduo, este não pode ser depositado em nenhum aterro sanitário do estado, sendo o mais próximo localizado no estado da Paraíba, o que torna o transporte oneroso.

Como uma alternativa para essa problemática, o presente trabalho realizou estudos em corpos de prova argilosos compostos por mistura de três componentes, que são: argila plástica e não plástica, ambas extraídas de uma jazida de cerâmica vermelha em Itaitinga (Ceará),

incorporadas de resíduo proveniente do processo de limpeza de gás do alto forno, especificamente do equipamento chamado Ciclone, de uma companhia siderúrgica situada no Pecém (Ceará).

Este trabalho pretendeu, portanto, avaliar as propriedades físicas dessas massas argilosas a partir de resultados obtidos através de ensaios de: retração linear total, perda de massa total, absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente, conforme respectivas normas e também se pretende comparar esses resultados com ensaios previamente realizados em amostras sem o aditivo.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a aplicabilidade de um resíduo siderúrgico na indústria cerâmica vermelha a partir da análise das propriedades físicas de corpos-de-prova compostos por um traço 1:1 de argilas plásticas e não plásticas contendo resíduo proveniente do processo de limpeza de gás do alto forno, também chamado Pó de Ciclone, em sua composição.

Desejou-se, então, mostrar o comportamento desses corpos-de-prova a partir de ensaios normativos de retração linear, perda de massa, absorção de água e massa específica aparente. Esses ensaios são quantitativos e servem como base comparativa para determinar, juntamente com ensaios posteriores, se blocos cerâmicos contendo esses resíduos siderúrgicos podem ser comercializados, representando assim uma aplicação viável para este material.

2.1 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento físico das amostras contendo resíduo siderúrgico em suas composições e que foram moldadas e sinterizadas em três temperaturas de queima diferentes (800 °C, 850 °C e 900 °C);
- Comparar os resultados obtidos em três composições diferentes de resíduo, quais sejam: 5%, 7% e 10% em peso de pó de ciclone;
- Comparar os resultados obtidos nos corpos-de-prova com resíduo siderúrgico a ensaios realizados em amostras sem o aditivo formadas pelas mesmas argilas e com o traço 1:1;
- Estabelecer análise estatística para avaliar se a variação dos resultados está ou não diretamente ligada à quantidade de resíduo adicionado nas amostras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Argilas

ALMEIDA (2009) apresenta a argila como sendo a principal matéria-prima para a confecção de cerâmicas vermelhas. Elas podem ser encontradas na superfície terrestre em seu estado puro ou conjugadas a outros minerais.

Segundo BALDUINO (2016), as argilas são formadas por rochas sedimentares, pela alteração dos silicatos de alumínio de origem magmática, metamórfica ou sedimentar e são constituídas por partículas finamente divididas essencialmente por argilominerais, materiais terrosos de granulação fina que adquirem plasticidade ao serem hidratados. A ABCERAM (2016) estabelece que esses argilominerais são principalmente: caulita, ilita e esmectitas, e o que os diferenciam são os tipos das estruturas e as composições químicas, as quais podem apresentar diferenças por conta da substituição do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro. Além disso, o mesmo órgão afirma também que a neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions representam outra diferença entre esses argilominerais.

3.1.1 Classificação das argilas

CABRAL JÚNIOR *et al* (2005) classifica as argilas em dois grandes grupos, quais sejam: argilas quaternárias e argilas de bacias sedimentares. As primeiras são caracterizadas pela elevada umidade e plasticidade, pois são oriundas de locais sujeitos a inundações periódicas e por conta disso acumula-se matéria orgânica nas camadas argilosas. Os dois tipos mais comuns desse grupo são a plástica (gorda) e a não plástica (magra).

De acordo com o mesmo autor, as argilas sedimentares são aquelas provenientes de eras geológicas antigas (paleozoica, mesozoica e terciária). Dois tipos clássicos dessas argilas são a Alterada e a Sã, que apresentam médias e baixas temperaturas de sinterização, ao contrário das quaternárias.

Na Figura 1 podemos diferenciar esses dois grupos de argilas.

Figura 1 – Classificação das argilas de queima vermelha.

Tipo de Argila	Bacia Sedimentar		Quaternária	
	Alterada	Sã	Plástica "gorda"	Não plástica "magra"
Minerais dominantes	Caulinita e ilita	Ilita	Caulita	Caulita e quartzo
Moldagem Plástica	Média a alta	Baixa	Alta a muito alta	Média a baixa
Velocidade de secagem	Lenta a média	Lenta a média	Lenta	Rápida
Retração de secagem	Alta	Média a alta	Alta	Baixa
Temperatura de queima	Média	Média a baixa	Média a alta	Alta
Resistência Mecânica	Média	Alta a média	Média a baixa	Baixa
Absorção de água	Média	Baixa a média	Alta a média	Alta

Fonte: Motta *et al* (2004). Adaptado pelo Autor.

3.2 Utilizações de resíduo em cerâmica vermelha

PEDROTI (2011) afirma que ao transformar matérias-primas, de modo a torná-las úteis a sociedade, o homem produz quantidades apreciáveis de resíduos que, no momento em que são produzidos, são inúteis e, ao longo do tempo, acabam por comprometer o meio ambiente. Nesse sentido, muitas pesquisas estudam a utilização destes resíduos, em sua maioria não biodegradáveis, na fabricação de cerâmicas vermelhas como uma alternativa para a reciclagem dos mesmos e redução do impacto ambiental. VIEIRA *et al* (2016), por exemplo, estudou a reutilização de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente na cerâmica vermelha e conseguiu obter melhoras nas propriedades físicas. GODINHO *et al* (2000) mostrou que resíduo de vidro de tubo de televisão diminui a absorção de água em telhas. MORETE *et al* (2006) avaliou a influência da adição de escória de soldagem nas massas cerâmicas e verificou que este modifica significativamente as propriedades tecnológicas da mistura.

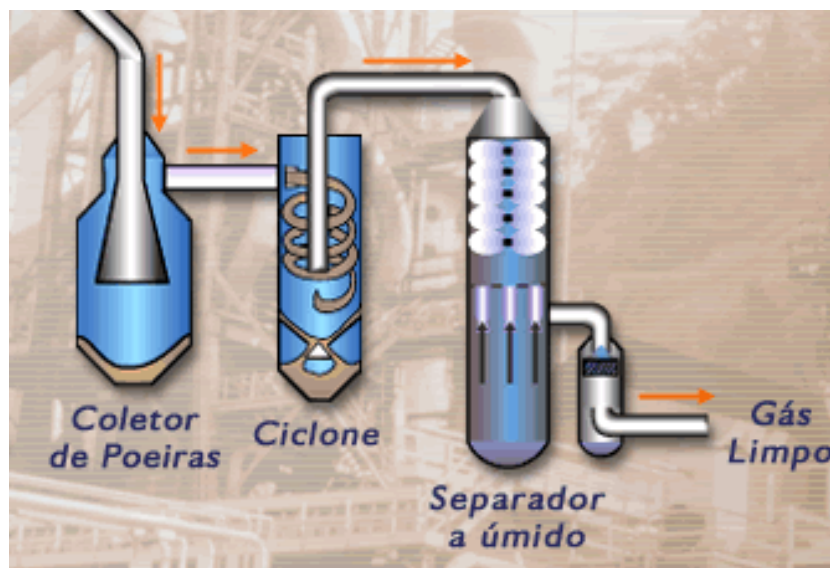
SANTOS *et al* (2006) avaliou a viabilidade da incorporação do pó de despoejamento siderúrgico em cerâmica vermelha e apresentou bons resultados. Este resíduo estudado pelo autor é extraído de parte do processo de limpeza de gás do alto forno.

3.3 Processos de limpeza do gás do alto forno

Alto Forno (em inglês “Blast Furnace”) é a fornalha utilizada na siderúrgica para fundir minérios de ferro, como a hematita ou a magnetita, a fim de produzir ferro gusa. Esse processo é do tipo redutor e os agentes são o monóxido de carbono e o hidrogênio (CIMM, 2019).

O processo de produção de ferro gusa gera gases que, para não comprometer a qualidade do aço, precisam passar por processos de limpeza para retirada de particulados sólidos. Para tanto, o gás sai do topo do alto forno (daí o nome gás de topo) arrastando o particulado para dois estágios de limpeza: a seco e a úmido. O primeiro é composto pelo coletor de poeira e pelo ciclone, nos quais as partículas mais grossas são removidas. No segundo estágio ocorre a separação a úmido através da aspersão de água, para remoção de particulados mais finos (INFOMET, 2019).

Figura 2 – Estágios de limpeza do gás de Alto Forno.



Fonte: INFOMET (2019)

3.3.1 O resíduo: Pó de Ciclone

Segundo ISPAT GURU (2016), o gás de topo contém monóxido de carbono (CO) e é conhecido como gás de alto forno após sua limpeza. O objetivo do primeiro estágio (a seco) é remover o máximo de poeira possível em condições secas para reutilização e reciclagem.

O Ciclone é uma estrutura cilíndrica normalmente com diâmetro grande e com altura necessária. Geralmente é forrado para isolar o gás e evitar a condensação de umidade, dessa forma, o mesmo permanece seco e não se dispersa ao longo do equipamento. Assim, o gás flui livremente para a parte cônica inferior do Ciclone, para a remoção das partículas. Esse particulado é comumente chamado de Pó de Ciclone (ISPAT GURU, 2016).

A Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) realiza ensaios de caracterização do pó de ciclone. De acordo com os ensaios, o Pó extraído possui elevada quantidade de Carbono e Ferro. A Figura 3 representa as quantidades percentuais de cada produto do processo.

Figura 3 – Composição em massa do Pó de Ciclone.

Pó (25 kg)	
Componente	Percentual em peso
T-Fe	34,61%
C	34,90%
SiO ₂	7,03%
CaO	4,82%
Al ₂ O ₃	1,97%

Fonte: CSP (2011). Adaptado pelo Autor.

3.4 Processos de fabricação de cerâmica vermelha

Os materiais cerâmicos vermelhos e os cerâmicos em geral possuem processos de fabricação muito similares entre si, com exceção do setor de vidro, cuja formação se dá através de fusão do material. Se comparados a outros meios de fabricação de materiais não cerâmicos, como, por exemplo, o aço, a confecção desses produtos é de complexidade reduzida. De um modo geral ela compreende as etapas de preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento. (ABCERAM, 2016)

3.4.1 Preparação da matéria-prima

Boa parte da matéria-prima argilosa utilizada na indústria ceramista é natural, ou seja, não passa por nenhum processo industrial ou artificial para serem formadas. Portanto, são encontradas espalhadas pela crosta terrestre em depósitos. Após a extração, esses minérios são

desagregados e moídos. Só então, tem início o processo de fabricação propriamente dito (ABCERAM, 2016).

3.4.2 Preparação da massa argilosa

Na indústria ceramista moderna, é rara a preparação utilizando apenas um tipo de argila. Geralmente, tenta-se combinar uma ou mais características provenientes de tipos de argilas diferentes. Dessa forma, é de fundamental importância a dosagem correta dos componentes, para que não haja a prevalência de características de apenas um minério na massa argilosa em questão, a menos que esse fenômeno seja pretendido. Além disso, é importante garantir também que aditivos não desejados, tais como areia e contaminantes, estejam em menor percentual possível na mistura. Para a formação da massa, é necessário também adicionar água, que serve como elemento de união para as argilas e auxilia na formação de massa coesiva que pode ser moldada com mais facilidade (VIEIRA, 2003).

Segundo a ABCERAM (2016), as massas argilosas podem ser classificadas em: a) massa de suspensão, para a obtenção de peças em moldes ou resinas; b) massas secas ou semi-secas, para obtenção de peças por prensagem; c) massas plásticas, para obtenção de peças por extrusão. De acordo com essa classificação, o presente trabalho lida com massas do tipo massa seca ou semi-seca.

3.4.3 Formação das peças

De posse da massa argilosa no traço desejado, a próxima etapa de fabricação da cerâmica vermelha é a formação das peças que, de acordo com NORTON (1973), pode ser dividida em quatro tecnologias distintas, quais sejam: extrusão, prensagem, moldagem plástica e colagem.

Para a produção de blocos cerâmicos, os processos por extrusão e por prensagem são mais comumente utilizados, por isso merecem destaque e serão apresentados a seguir.

3.4.3.1 Extrusão

É a técnica mais comum para a produção de blocos cerâmicos de produtividade em grande escala (AMARAL, 2013).

A massa plástica é colocada no equipamento de extrusão, e então é compactada por um pistão de modo que a pressão é suficiente para fazer com que o material transpasse um bocal (ou molde), o qual determinará o formato da cerâmica. Assim, obtêm-se uma coluna cerâmica, cujo comprimento final é determinado pelo corte. É deste modo que são confeccionados tijolos vazados, blocos, tubos e outros produtos com o formato da extrusora em questão (ABC, 2015).

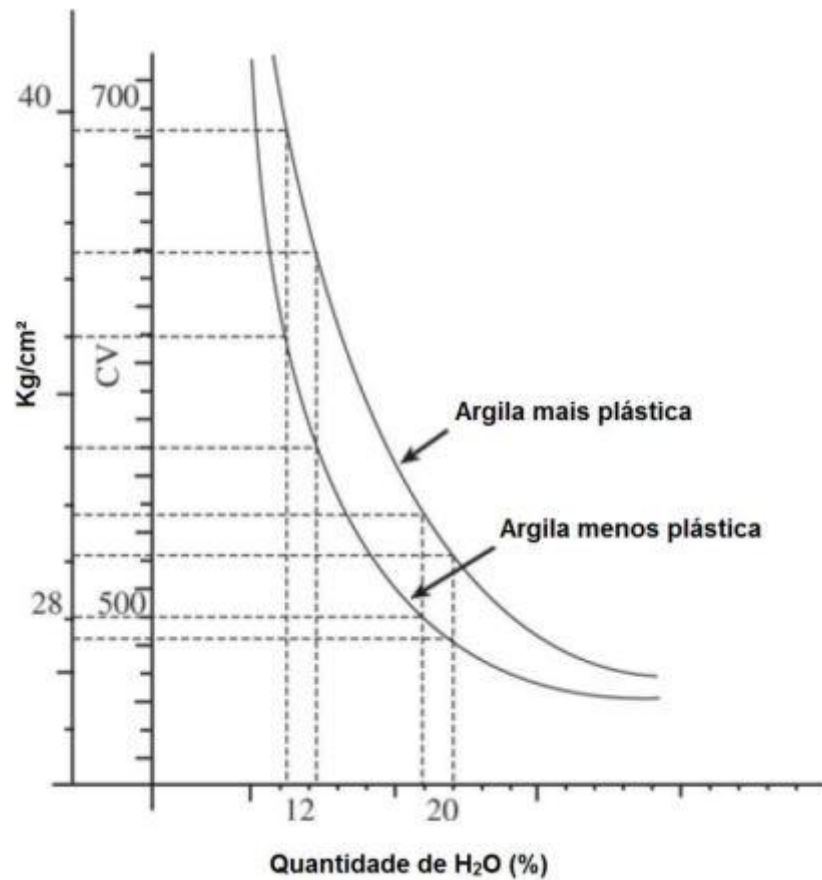
Para que o processo de extrusão seja bem sucedido, a massa cerâmica deve apresentar plasticidade tal que permaneça no mesmo formato delimitado pelo molde até a etapa de corte (AMARAL, 2013), do contrário, o material apresentará divergências dimensionais e de formato, e correrá o risco de não obedecer as características geométricas determinadas pela norma ABNT NBR 15270-1:2005, que regulamenta as condições ideais de comercialização dos blocos.

A homogeneização da mistura é fundamental durante todo o processo de fabricação para que o mesmo produto não apresente divergências de propriedades ao longo de sua estrutura, tais como composição química e tamanho de grão (AMARAL, 2013).

Um aspecto que deve ser observado cuidadosamente na confecção de massas argilosas para que tal homogeneização seja alcançada é o teor de umidade da mistura. Variações pequenas de umidade ao longo da massa podem interferir diretamente na plasticidade do material, comprometendo assim a qualidade do processo de extrusão. As duas argilas comumente utilizadas no processo de fabricação de blocos cerâmicos se comportam de forma diferente nesse aspecto. A argila gorda (plástica) é bastante afetada pela variação de umidade, enquanto que a argila fraca (não plástica) é menos influenciada (FACINCANI, 1993; RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2003).

A Figura 4 ilustra a comparação entre esses dois tipos de argilas e a influência da variação dessa umidade na pressão necessária durante o processo de extrusão.

Figura 4 – Variação da pressão e potência de extrusão em função do teor de umidade para argila mais plástica e menos plástica.



Fonte: Ribeiro, Ferreira e Labrincha (2003).

Ao analisar a Figura 4, percebe-se que para uma mesma quantidade percentual de umidade na mistura, a argila plástica necessita de maior potência e pressão para ser conformada por extrusão.

Alguns defeitos são originados pelo processo, destacam-se: deformações e trincas, que são ocasionados principalmente pela variação da velocidade de extrusão. De acordo com AMARAL (2013), durante a conformação as regiões com maior velocidade tracionam as partículas que estão nas regiões de menor velocidade, gerando regiões tensionadas, o que originará trincas no processo de secagem das peças. Assim sendo, deve-se ter um controle de velocidade durante toda a fabricação de um lote cerâmico extrudado (RIBEIRO; FERREIRA; LABRINCHA, 2003). A Figura 5 ilustra o processo de extrusão em linha de produção industrial.

Figura 5 – Processo de extrusão de massa cerâmica.



Fonte: Kawaguti (2004).

3.4.3.2 Prensagem

Nesse processo, a massa argilosa não deve conter alto percentual de umidade, uma vez que será submetida à elevada pressão. No caso de peças muito úmidas, um mesmo valor de pressão aplicada acarretará maior compactação. Daí a necessidade de observar a correta quantidade de água adicionada durante a mistura da massa (AMARAL, 2013).

Para a prensagem, podem ser utilizadas diferentes prensas, como a de fricção, hidráulica e hidráulico-mecânica, podendo ser de mono ou dupla ação (ABC, 2015).

Para produção em larga escala, e também para preparação de corpos de prova cerâmicos, a pressão é exercida somente sobre a face maior, para que assim a extração da peça do molde seja facilitada e também para manter a uniformidade da carga aplicada sobre toda a face (ABC, 2015).

Os processos de prensagem mais comumente utilizados na indústria cerâmica vermelha são o uniaxial de ação simples, para peças com geometria simples e de ação dupla, para peças de maior complexidade geométrica (AMARAL, 2013).

Para evitar o surgimento de trincas e falhas no processo, o pistão deve ser cuidadosamente posicionado sobre o material a ser conformado, evitando assim o

empenamento do corpo cerâmico e o surgimento de trincas internas durante o processo (PEÇANHA JUNIOR, 2006). A Figura 6 mostra um exemplo de prensagem.

Figura 6 – Prensagem de tijolos.



Fonte: Arquitetura e Tecnologia (2011).

3.4.4 Tratamento térmico

O tratamento térmico da massa cerâmica é quem determina as propriedades finais do produto. A resistência mecânica, a redução da porosidade, a mudança de coloração das peças, etc, são alcançadas pela elevação e manutenção da temperatura dos corpos de prova cerâmicos por determinado tempo (AMARAL, 2013). Segundo a ABC (2015), os tratamentos térmicos são divididos em duas etapas: secagem e queima.

3.4.4.1 Secagem

Na etapa de preparação da massa argilosa, água é adicionada ao processo para facilitar a conformação. O objetivo da secagem, então, é eliminar essa água contida na peça. Essa eliminação ocorre por evaporação mediante aporte de calor. A secagem é um processo que exige atenção e delicadeza, porque é comum que nesta etapa ocorram defeitos que só são perceptíveis após a queima (VIEIRA, 2003).

Segundo VAN VLACK (1973) e AMARAL (2013), a água está presente na argila de algumas formas, sendo elas: água interparticular, água dos poros, água adsorvida e água do reticulado. Em peças conformadas por extrusão é comum a presença de água interparticular,

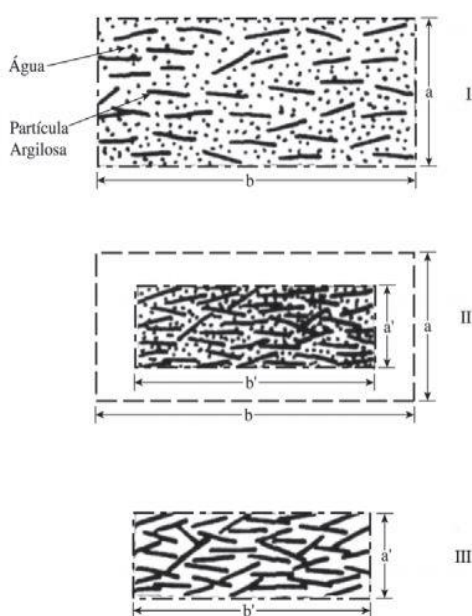
que como o nome sugere, encontra-se entre as partículas da argila e é a primeira a ser removida durante a secagem, ocasionando a aproximação das partículas e a redução dimensional (NORTON, 1973).

A água dos poros é a remanescente após a retirada da água interparticular e, por permanecer em poros de dimensão reduzida, não interfere no tamanho da peça de forma significativa. Água adsorvida e a água do reticulado são aquelas que formam a estrutura cristalina da argila devido às ligações químicas. Só são relevantes quando as peças cerâmicas são de dimensão extremamente pequena (NORTON, 1973; VAN VLACK, 1973).

Para AMARAL (2013), o principal defeito ocasionado pela secagem é o trincamento das peças. Para evitar que isso ocorra, algumas soluções são aplicadas, dentre elas destacam-se duas. A primeira consiste em utilizar uma atmosfera saturada de água e elevar as temperaturas de secagem, assim, a viscosidade do líquido é reduzida sem que ocorra secagem inicial. A segunda alternativa é a adição de materiais não plásticos à massa argilosa, os quais reduzem a quantidade de água interparticular, logo, reduzem as retrações de secagem.

A Figura 7 representa o processo de eliminação da água durante o processo de secagem. Em I temos água interparticular em grande quantidade. À medida que a secagem tem andamento, essa água vai sendo eliminada, restando apenas a água dos poros em II. Nota-se que na transição de I para II houve redução dimensional da peça. Em III, toda a água interparticular foi eliminada e não houve retração em relação a II (VIEIRA, 2003).

Figura 7 – Secagem do sistema argila-água.



Fonte: Abajo (2000) extraído de AMARAL (2013).

Existem dois tipos de secagem: a natural e a artificial (ALMEIDA, 2009). No primeiro, as peças são posicionadas ao ar livre de modo a secarem pela ação do vento. No segundo, são utilizadas estufas que possuem ventiladores os quais transportam o ar quente para seu interior, favorecendo o aumento de temperatura e a troca térmica por convecção e radiação. (LIMAVERDE, 1983).

3.4.4.2 *Queima*

A queima é realizada em fornos cuja concepção possui grande variedade.

Uma classificação pertinente para os fornos é a de BAUER (1975), que determina dois tipos: o contínuo e o intermitente, que diferem entre si pelo fato de que o intermitente não é capaz de manter produção contínua, sendo necessária a parada para trocas de lotes a serem cozidos. Fornos contínuos podem ser dos tipos Anular (Hoffman) e Túnel. Já os intermitentes podem ser dos tipos Caieira, Chama Reversível, Paulistinha e Plataforma. Juntamente com a secagem, a queima é o processo que consome a maior parte de combustível, daí a necessidade de constantes estudos serem realizados para que esses processos sejam otimizados (ALMEIDA, 2009).

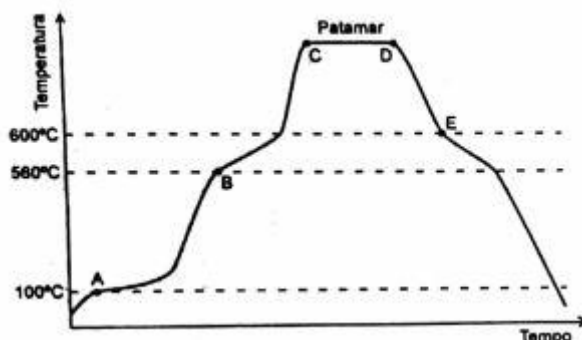
A energia utilizada nos fornos provém de diferentes fontes, como, por exemplo, biomassa, gás natural, óleo, lenha, etc. Por ser um processo essencialmente energético, a queima é a etapa mais cara do da produção (MONTEIRO *et al*, 2007). O objetivo dessa transferência de calor é o aquecimento da carga até a evaporação da umidade remanescente na secagem e o fornecimento de aporte térmico para que ocorra a decomposição e cristalização dos componentes químicos presentes na cerâmica (ALMEIDA, 2009).

É na queima que ocorre o aumento da resistência mecânica, a redução da porosidade e a coloração desejada à cerâmica (PADOA, 1990; AMARAL, 2016).

É necessário que escolha-se a programação adequada de queima levando em consideração os produtos, os tipos de fornos, o arranjo das peças, o consumo de insumos e a curva de queima (FIEC, 2007).

Segundo o IEL (2007), a Curva de Queima é a programação da queima definindo a temperatura que o forno deve atingir em função do tempo e deve ser cumprida para garantir a qualidade do processo. A partir da análise da Curva é possível determinar as transformações que acontecem na cerâmica em determinada temperatura. A Figura 8 traz um exemplo de curva de queima.

Figura 8 – Exemplo de Curva de Queima.



Fonte: FIEC (2007).

As variações que ocorrem na cerâmica vermelha durante a queima são de dois tipos: físico-químicas e mecânicas. Na primeira, ocorrem mudanças na estrutura química e cristalina, na porosidade, na cor, no tamanho, além de aumento de resistência à umidade, etc. Já no segundo, ocorre o aumento da resistência à compressão, à tração, à abrasão, etc. Alguns fenômenos químicos são responsáveis por essas mudanças, são eles: desidratação (perda de umidade), calcitação (perda de massa na forma de gases), oxidação (ligação de elementos químicos na peça com o oxigênio presente no forno), formação de silicatos e sinterização (MONTEIRO *et al*, 2007).

BACCELLI (2010) estabelece que a temperatura de queima é da ordem de 750 a 900°C para tijolos, de 900 a 950°C para telhas e 950 a 1200°C para tubos cerâmicos.

A Curva de Queima não segue um padrão perfeitamente definido para todas as cerâmicas vermelhas devido à diversidade de composições químicas das argilas e aos diferentes locais de sua extração e processamento. Ainda assim, DUTRA (2007) classifica as temperaturas em que ocorrem as principais transformações nos materiais cerâmicos com a seguinte tendência:

- Entre 200 a 300°C: tem-se a eliminação da água adsorvida dos minerais montmoriloníticos, com grande perda de massa (SANTOS, 2001);
- De 250 a 350°C: ocorre a liberação das oxidrilas dos hidróxidos (como o hidróxido de alumínio) (SANTOS, 2001);
- Entre 400 e 550°C: a água estrutural dos diversos minerais argilosos é eliminada;
- Entre 450 e 650°C: ocorre a decomposição das argilas, com liberação, sob forma de vapor, da água de constituição (quimicamente combinada na caulita, constituinte fundamental da argila, contendo sílica e alumina) (SANTOS, 2001);

- Em torno de 570°C: dá-se a transformação do quartzo na sua forma cristalina alfa para quartzo beta (SANTOS, 2001);
- Acima de 700°C: desenvolvem-se reações químicas da sílica e da alumina com os elementos fundentes (SANTOS, 2001);
- Em cerca de 800°C: Tem-se normalmente a máxima dilatação e para argilas carbonatadas, ocorre a dissociação do carbonato de cálcio. (SANTOS, 2001);
- Entre 900 e 950°C: inicia-se a retração de sinterização e transformações mineralógicas.

O resfriamento das peças geralmente acontece dentro do forno para evitar a alta taxa de troca de calor que pode ocasionar defeitos na produção. Um ponto de atenção nesse processo é que, ao atingir a temperatura de entre 600 e 500°C, o resfriamento deve ser mais lento, pois nesse intervalo ocorre a transformação alotrópica do quartzo beta para o quartzo alfa, fazendo com que a peça apresente baixa resistência ao choque térmico (DUTRA, 2007).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matérias-primas: argila e resíduo siderúrgico

Para a realização do trabalho, foram selecionados 10 quilogramas de argila plástica e 10 quilogramas de argila não plástica oriundas da jazida de Itaitinga (Ceará). Normalmente, esses minérios não se apresentam em um percentual inicial de 100% de argila, mas contêm outros tipos de partículas, em sua maioria sólidos, quais sejam: pedaços de dejetos naturais, rochas não argilosas, etc. Portanto, uma primeira filtragem foi realizada nas argilas de modo a retirar das mesmas os particulados grossos e visíveis.

Além disso, as argilas geralmente apresentam-se bastante compactas e densas quando retiradas da jazida. Desta forma, após a filtragem inicial, se fez necessária a quebra desses pedaços de argila mais densos, para que os mesmos fossem reduzidos às dimensões adequadas para a trituração.

Feito isso, os pedaços de argila foram então triturados utilizando o triturador tipo BB 100 Mangan, da marca Retsch.

De posse do material triturado, as argilas foram peneiradas com o auxílio de uma peneira nº 325 (44 µm).

Foram coletados também 20 kg de pó siderúrgico provenientes do componente Ciclone do processo de limpeza do gás de alto forno de uma siderúrgica localizada no Pecém-CE. Estes não passaram por processo de peneiramento nem de separação de resíduos sólidos, uma vez que apresentou uma composição homogênea em toda a amostra coletada. Como apresentou granulometria reduzida, também não foi submetido à trituração.

4.1.1 Seleção do traço

MAIA (2018) realizou ensaios de retração linear, absorção de água, porosidade aparente, perda de massa e massa específica aparente nas mesmas argilas extraídas da jazida de Itaitinga, utilizando as temperaturas de queima 800, 850 e 900 °C e traços 1:1 (50% de argila plástica e 50% de argila não plástica) e 3:2 (60% de argila plástica e 40% de argila não plástica).

Suas análises mostraram que o traço 1:1 apresenta uma menor retração linear, menor porosidade, baixa absorção de água e maior massa específica aparente. Sendo assim, o traço 1:1 se mostrou mais desejável se comparado ao 3:2.

Partindo desses resultados, o presente trabalho utilizou o traço 1:1 e percentuais de resíduos que variavam de 5, 7 e 10% de pó siderúrgico.

A nomenclatura utilizada nas amostras foi a seguinte: o primeiro algarismo representou a composição de resíduo da amostra, e o segundo (em algarismos romanos) o número da amostra, que ia de I à XV em cada composição.

Exemplo:

Amostra 5 II: corpo-de-prova de número 2 da composição 5% de resíduo.

Amostra 7 II: corpo-de-prova de número 2 da composição 7% de resíduo.

Amostra 10 II: corpo-de-prova de número 2 da composição 10% de resíduo.

Amostra 5 XIV: corpo-de-prova de número 14 da composição 5% de resíduo.

4.2 Preparação dos corpos-de-prova

Foram produzidos 15 corpos-de-prova para cada percentual de resíduo, totalizando então 45 corpos-de-prova. Cada corpo de prova pesa em torno de 80 gramas devido às dimensões do molde.

De início, prepararam-se as argilas, misturando-as em proporções iguais de modo que fosse suficiente para todos os corpos-de-prova de cada composição. Para confeccionar as 15 amostras, considerou-se um montante de 1200 gramas de toda a mistura (argila, pó de ciclone). As seguintes composições foram feitas:

- Para amostras com 5% de resíduo: misturou-se 1140 gramas de argila (1:1) e 60 gramas de resíduo;
- Para amostras 7% de resíduo: misturou-se 1116 gramas de argila (1:1) e 84 gramas de resíduo;
- Para amostras com 10%: misturou-se 1080 gramas de argila (1:1) e 120 gramas de resíduo.

Uma vez preparadas as massas argilosas, os corpos de prova foram então colocados no molde metálico de dimensões 117,4 x 25 x 14,6 mm como ilustra a Figura 9. Em seguida, cada amostra foi submetida à prensagem utilizando a prensa hidráulica da marca Potente Brasil, sob pressão de 2 toneladas por 20 segundos, de acordo com a norma NBR 15270.

Figura 9 – Molde metálico utilizado para conformação dos corpos-de-prova.



Fonte: Autor.

Após a prensagem, as dimensões dos corpos-de-prova crus foram verificadas e também as suas massas. Isso foi feito com o auxílio de um paquímetro digital de 150 mm e precisão de 0,1 mm e também de uma balança digital com capacidade máxima de 2 kg e precisão de 0,01 g.

Com os corpos de prova crus devidamente conformados e dimensionados, era necessário então retirar boa parte da umidade dos mesmos para a continuidade dos procedimentos. Desta forma, os corpos foram submetidos à secagem em estufa da marca Medclave, por um período ininterrupto de 24 horas à 100°C, como ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Secagem dos corpos-de-prova.



Fonte: Autor.

Com os corpos de prova secos, o próximo e último passo da fabricação foi a queima. Esta foi feita em um forno elétrico da marca Linn Elektro Therm, utilizando três temperaturas diferentes para cada percentual de resíduo, que foram 800, 850 e 900 °C, seguindo o mesmo range de temperaturas analisado por MAIA (2018). Desta forma, os três percentuais analisados (5, 7 e 10%) foram sinterizados nas 3 temperaturas, ou seja, cinco amostras de cada percentual foram queimadas a 800° C, totalizando 15 amostras; outras cinco amostras de cada percentual foram queimadas a 850 °C e outras cinco de cada percentual foram queimadas a 900 °C.

A queima foi realizada durante 1 hora, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e o resfriamento foi feito a temperatura ambiente.

4.3 Ensaios tecnológicos

Para o presente trabalho, foram realizados ensaios de: retração linear, perda de massa, absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente.

4.3.1 Retração linear

A retração linear é dividida em dois estágios, a retração linear de secagem e a retração linear de queima. Estas nada mais são que a variação do comprimento antes e depois do processo de secagem e queima.

Para a determinação da retração linear de secagem deve-se, portanto, observar a Equação 1:

$$RLS(\%) = \left(\frac{L_o - L_f}{L_f} \right) * 100 \quad (1)$$

Na qual:

RLs = retração linear de secagem;

Lo = comprimento do corpo de prova antes da secagem, em milímetros;

Lf = comprimento do corpo de prova após a secagem, em milímetros.

A Equação 2 é similar a 1 e é utilizada para o cálculo da redução de comprimento durante a queima. Assim, temos:

$$RLq(\%) = \left(\frac{L_f - L_{fq}}{L_{fq}} \right) * 100 \quad (2)$$

Na qual:

RLq = retração linear de queima;

Lf = comprimento do corpo de prova seco, após a secagem, em milímetros;

Lfq = comprimento do corpo de prova após a queima, em milímetros.

Baseando-se nessa forma de analisar a redução de comprimento, é possível também utilizar uma expressão matemática para a retração linear total, isto é, toda a perda percentual no comprimento durante secagem e queima. Assim, tem-se a Equação 3:

$$RLt(\%) = \left(\frac{L_c - L_{fq}}{L_{fq}} \right) * 100 \quad (3)$$

Com:

RLt = retração linear total (secagem + queima);

Lc = comprimento do corpo de prova cru, antes da secagem, em milímetros;

Lfq = comprimento do corpo de prova após a queima, em milímetros.

4.3.2 Perda de Massa

De similar modo, é possível estabelecer uma relação de perda de massa durante o processo de secagem e queima. Uma vez que a umidade é retirada e que particulados e gases entram em processo de evaporação, a amostra perde massa com o aumento da temperatura. SANTOS (1989) estabelece que a perda de massa ao fogo pode ser dada pela relação percentual expressa na Equação 4:

$$PF(\%) = \left(\frac{M_s - M_q}{M_q} \right) * 100 \quad (4)$$

Na qual:

PF = perda de massa ao fogo;

Ms = massa do corpo de prova seco, após a secagem, em gramas;

Mq = massa do corpo de prova após a queima, em gramas.

Partindo desse conceito matemático de redução percentual, podemos então determinar também a perda de massa não só durante a queima, mas também durante todo o processo de secagem e queima. Desta forma, temos a Equação 5:

$$PT(\%) = \left(\frac{M_c - M_q}{M_q} \right) * 100 \quad (5)$$

Na qual:

PT = perda de massa total (secagem + queima);

Mc = massa do corpo de prova cru, antes da secagem, em gramas;

Mq = massa do corpo de prova após a queima, em gramas.

Retração linear e Perda de massa são propriedades importantes para os industriais, uma vez que quanto maior a retração e a perda de massa, mais matéria-prima será perdida no processo. Porém, o comportamento do material a outros ensaios, tais como: absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente tem peso maior na determinação da melhor mistura, já que estão mais fortemente atrelados às propriedades físicas e químicas do material.

4.3.3 Absorção de Água

O índice de absorção de água é o parâmetro que determina a capacidade do corpo-de-prova em absorver água. Como blocos cerâmicos são utilizados na construção civil como estrutura de vedação, deseja-se que o corpo absorva pouca água.

A norma ABNT NBR 15270-3, que lida com blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação, estabelece o procedimento padrão para a execução do ensaio de Absorção de Água.

4.3.3.1 Determinação da massa seca

Massa seca é a massa do corpo-de-prova após a queima e sem umidade absorvida. Como os ensaios podem não ser feitos em sequência, o simples fato de a amostra estar em repouso por um período de alguns dias pode fazer com que ocorra a absorção de umidade e consequentemente aumento de massa. Portanto, a Norma NBR 15270-3 estabelece que os corpos-de-prova devam ser submetidos a uma nova secagem em estufa para retirar essa umidade. Essa secagem deve ser feita em temperatura de 105 ± 5 °C. A massa individual deve ser determinada em intervalos de 1h até que pesagens consecutivas mostrem uma diferença de no máximo 0,25%, ou seja, quando boa parte da umidade foi retirada da peça, daí o nome Massa seca.

4.3.3.2 Determinação da massa úmida

Com os resultados das medições de massa seca, parte-se agora para o próximo passo do processo que é a determinação da massa úmida, segundo a mesma Norma. Para tanto, as amostras são submersas em água parada, que deve cobrir todos os corpos-de-prova conforme ilustra a Figura 11, por um período de 24 horas seguidas.

Passadas às 24 horas, as amostras são retiradas e postas em uma bancada para retirada do excesso de água. A água que ainda ficar visível sobre as peças deve ser removida utilizando um pano limpo. Feito isso, as amostras são então pesadas. Vale salientar que esse processo de determinação de massa úmida deve ser feito em no máximo 15 minutos para não comprometer os resultados das pesagens.

Figura 11 – Corpos-de-prova submersos.



Fonte: Autor.

4.3.3.3 Determinação do índice de Absorção de Água (AA)

A norma NBR 15270-3 estabelece que o índice de Absorção de Água seja determinado pela Equação 6:

$$AA(\%) = \left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) * 100 \quad (6)$$

Na qual:

AA = índice de Absorção de Água;

Mu = massa do corpo-de-prova úmido, em gramas;

Ms = massa do corpo-de-prova seco, em gramas.

A Norma informa também que um índice aceitável de Absorção de Água para o tijolo, ou bloco cerâmico, deve ficar entre 8 e 25%.

4.3.4 Porosidade Aparente

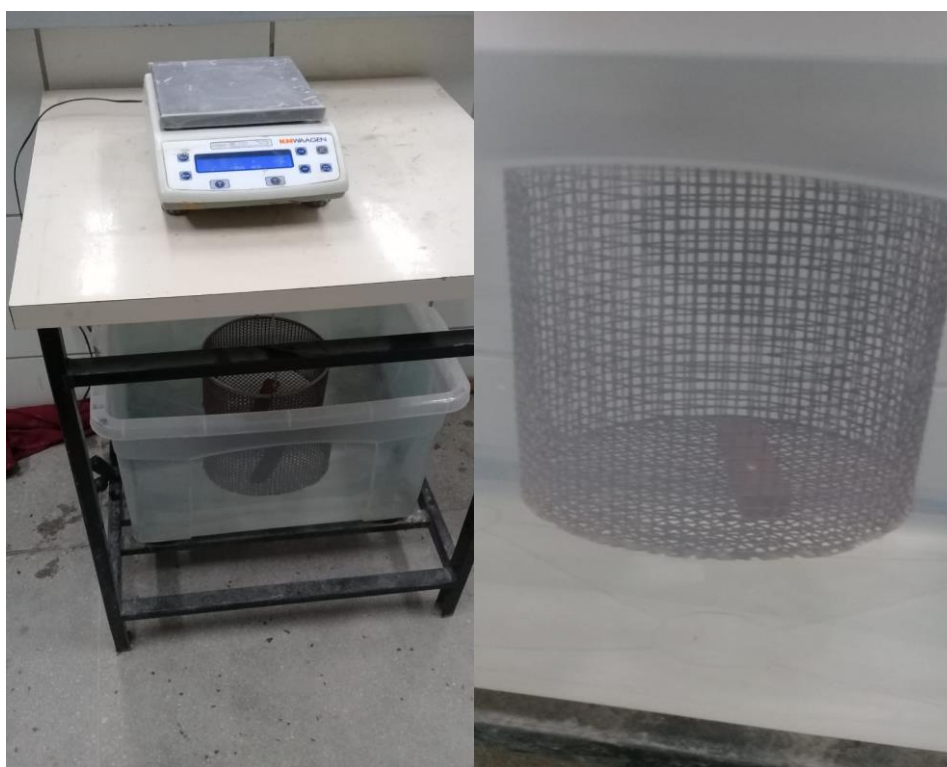
Souza *et al* (2017) afirma que a porosidade aparente (PA) é o ensaio que quantifica, em percentual, o volume total de poros abertos em relação ao volume dos corpos-de-prova.

O procedimento para coleta de dados que serão utilizados na quantificação da porosidade aparente é o mesmo utilizado na absorção de água, diferindo apenas as medições

que foram utilizadas. Assim sendo, as amostras são secas na estufa a uma temperatura de (105 ± 5) °C até que as pesagens consecutivas não difiram de 0,25%. Assim, temos o valor de massa seca. Logo em seguida são então submersas em água parada por um período de 24 horas. Passado esse tempo, as amostras são colocadas em bancada e o excesso de água é retirado com o auxílio de um pano limpo e seco. Desta forma podemos pesar e então teremos os valores de massa úmida.

Com o auxílio de uma balança, submergimos amostra por amostra. Dessa forma, obtém-se a massa imersa de cada corpo-de-prova. Vale salientar que esse processo deve ser realizado com bastante cautela, pois a balança é sensível ao movimento da água. Portanto, é necessário esperar até que as pequenas ondulações ocasionadas pelo movimento de inserir a peça no recipiente cessem, para não haver erros na leitura da massa imersa. A Figura 12 ilustra o processo.

Figura 12 – Pesagem dos corpos-de-prova imersos.



Fonte: Autor.

De posse dos valores de massa seca, massa úmida, e massa submersa, podemos determinar uma relação percentual para relacionar a massa de poros que foram gerados durante o processo de queima e a massa bruta (massa total) de cada amostra. Para tanto, é comum a utilização Equação 7:

$$PA(\%) = \left(\frac{M_u - M_q}{M_u - M_i} \right) * 100 \quad (7)$$

Sendo:

PA = porosidade aparente;

Mu = massa do corpo-de-prova úmido, em gramas;

Mq = massa do corpo-de-prova após a queima e re-secagem, em gramas.

Mi = massa do corpo-de-prova imerso em água, em gramas.

4.3.5 Massa Específica Aparente

Segundo Meyer *et al* (2016), a massa específica aparente (MEA) é a razão entre a massa do corpo-de-prova e seu volume e é a propriedade que quantifica o volume total de poros fechados do mesmo, evidenciando assim a sua leveza.

É determinada por uma unidade de massa sobre unidade de volume. No caso de blocos cerâmicos, é comumente expressa em g/cm^3 .

Em suma, a MEA é a relação da massa dos corpos-de-prova e suas partículas e poros. Desta forma, ao contrário das outras propriedades apresentadas até então, deseja-se um *maior* percentual de massa específica aparente no bloco cerâmico. Podemos determinar a MEA através da Equação 8:

$$MEA(g/cm^3) = \left(\frac{M_q}{M_u - M_i} \right) * 100 \quad (8)$$

Na qual:

MEA = massa específica aparente;

Mu = massa do corpo-de-prova úmido, em gramas;

Mq = massa do corpo-de-prova após a queima e re-secagem, em gramas.

Mi = massa do corpo-de-prova imerso em água, em gramas.

O processo de obtenção das massas utilizadas na equação 8 é o mesmo utilizado para determinar as massas durante as análises de porosidade aparente e absorção de água.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados encontrados foram analisados de acordo com a orientação da Norma NBR 15270.

Para cada temperatura de sinterização, que foram três: 800, 850 e 900 °C, cinco amostras de cada composição foram analisadas. Dessa forma, foi possível calcular o desvio médio e o erro padrão, sempre utilizando o software Microsoft Excel, que também foi útil para a elaboração de gráficos e tabelas. Os resultados para estas análises são encontrados no Apêndice.

O traço de argila utilizado em todas as amostras foi o 1:1, conforme os resultados de MAIA (2018).

5.1 Ensaios tecnológicos

5.1.1 *Retração Linear*

Foi analisada a retração linear total de todas as amostras, já considerando as retrações durante secagem e queima como uma única retração, utilizando a Equação 3.

Os resultados obtidos dos experimentos nas três composições foram concatenados em tabelas e gráficos para facilitar o entendimento e diferenciação.

Baseando-se nos resultados de MAIA (2018) para amostras de traço 1:1 sem adição de resíduo, pôde-se obter os resultados de Retração Linear Total utilizando a Equação 3. Assim como também o mesmo cálculo foi feito para os corpos-de-prova com adição de resíduo. Foi calculado também o desvio-padrão médio para todas as peças.

As amostras de MAIA (2018) foram numeradas de 1 a 15. Dessa forma, foi possível estabelecer uma comparação das amostras com e sem adição de resíduo para uma temperatura de sinterização de 800 °C. A Tabela 1, comparativa, foi representada da seguinte forma:

Tabela 1 – Retração linear total para peças queimadas a 800 °C.

Temperatura de queima a 800 °C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)
1	0,77%	5 II	0,70%	7 IX	0,78%	10 I	1,39%
2	1,31%	5 IV	0,70%	7 XI	0,78%	10 V	1,13%
3	1,30%	5 VII	0,78%	7 XII	0,78%	10 VIII	2,37%
4	0,87%	5 IX	0,69%	7 XIII	0,86%	10 IX	2,19%
5	1,39%	5 XV	0,61%	7 XV	0,69%	10 XV	2,10%
Média	$\bar{X} = 1,13\%$		$\bar{X} = 0,69\%$		$\bar{X} = 0,78\%$		$\bar{X} = 1,84\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,248\%$		$\sigma = 0,037\%$		$\sigma = 0,035\%$		$\sigma = 0,462\%$

Fonte: Autor.

Os resultados mostram que entre todos os ensaios realizados, as amostras com 5% de resíduo apresentaram uma retração linear total menor até mesmo que corpos-de-prova sem resíduo.

Pode-se perceber também que a única composição que retrai mais que a condição sem aditivo é a com 10% de resíduo, que dentre todas as condições foi a que retraiu mais.

Observa-se também que entre 5 e 7% de resíduo não houve diferença significativa.

A decomposição dos carbonatos gera CO_2 , e, de acordo com os estudos de Jacomino *et al* (2000), mais da metade da massa do pó de ciclone em peso é composto por monóxido de carbono, que aumenta a quantidade de carbonatos presentes nas amostras e por consequência incrementa também a decomposição dos mesmos durante a queima. Isso pode explicar o fato de que as amostras com 10% de resíduo retraiam mais que as demais.

As peças que foram sinterizadas a 850 °C, também foram comparadas às amostras sem resíduo de MAIA (2018) e apresentaram os resultados da Tabela 2:

Tabela 2 – Retração linear total para peças queimadas a 850 °C.

Temperatura de queima a 850 °C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)
6	1,37%	5 V	1,04%	7 I	0,60%	10 II	1,37%
7	2,69%	5 VI	0,95%	7 II	0,95%	10 IV	1,63%
8	1,99%	5 VIII	0,60%	7 IV	1,12%	10 VI	1,20%
11	1,71%	5 X	0,69%	7 V	1,03%	10 XI	2,23%
15	2,09%	5 XII	1,03%	7 XIV	1,11%	10 XIV	2,06%
Média	$\bar{X} = 1,97\%$		$\bar{X} = 0,86\%$		$\bar{X} = 0,96\%$		$\bar{X} = 1,70\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,343\%$		$\sigma = 0,175\%$		$\sigma = 0,149\%$		$\sigma = 0,357\%$

Fonte: Autor.

Novamente observa-se que as amostras que continham resíduo siderúrgico em sua composição retraíram menos, em média, do que amostras sem resíduo. É mais uma vez a composição 10% retraiu mais, dentre os corpos-de-prova com o aditivo.

De modo semelhante, as amostras sinterizadas a 900 °C apresentaram os resultados da Tabela 3:

Tabela 3 – Retração linear total para peças queimadas a 900 °C.

Temperatura 900 °C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)	Amostras	Rl_t (%)
9	1,90%	5 XI	0,60%	7 III	0,77%	10 III	1,54%
10	1,54%	5 I	0,70%	7 VI	0,86%	10 VII	1,29%
12	1,89%	5 XIII	0,83%	7 VII	0,68%	10 X	2,14%
13	1,92%	5 XIV	0,85%	7 VIII	0,77%	10 XII	2,31%
14	1,90%	5 III	0,78%	7 X	0,77%	10 XIII	2,15%
Média	$\bar{X} = 1,83\%$		$\bar{X} = 0,75\%$		$\bar{X} = 0,77\%$		$\bar{X} = 1,89\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,116\%$		$\sigma = 0,082\%$		$\sigma = 0,035\%$		$\sigma = 0,377\%$

Fonte: Autor.

Podemos observar que, considerando o erro padrão, não houve diferença significativa entre as amostras com 5 e 7% de resíduo. Também não houve entre 10% e sem resíduo.

Como a linha de comparação, por conveniência, é sempre a condição sem resíduo. Pode-se observar que na análise de retração linear total nas três temperaturas de sinterização analisadas, as amostras com resíduo apresentaram resultados satisfatórios e não divergiram significativamente, em média, das amostras sem aditivo.

5.1.2 Perda de Massa

De similar modo aos resultados apresentados no ensaio de Retração Linear, a Perda de Massa será mostrada em uma visão por temperatura de queima, para facilitar a comparação.

Também se tomou como linha de comparação os resultados das amostras sem adição de resíduo de MAIA (2018).

Para os resultados, foi considerada a Perda de Massa Total, ou seja, a relação percentual feita entre corpo de prova cru (antes da secagem) e corpo de prova após a queima, conforme a Equação 5 mostra. Desta forma, considerou-se toda a perda de massa da secagem e da queima como uma única perda total.

Os resultados de perda de massa total para as peças sinterizadas a 800 °C foram os da Tabela 4:

Tabela 4 – Perda de Massa Total para peças queimadas a 800 °C.

Temperatura 800 ° C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)
1	14,44%	5 II	15,93%	7 IX	15,75%	10 I	17,04%
2	14,09%	5 IV	15,94%	7 XI	15,51%	10 V	17,77%
3	14,60%	5 VII	15,25%	7 XII	15,54%	10 VIII	17,03%
4	14,28%	5 IX	15,62%	7 XIII	15,43%	10 IX	17,34%
5	14,83%	5 XV	15,39%	7 XV	15,43%	10 XV	17,19%
Média	$\bar{X} = 14,45\%$		$\bar{X} = 15,63\%$		$\bar{X} = 15,51\%$		$\bar{X} = 17,27\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,214\%$		$\sigma = 0,247\%$		$\sigma = 0,088\%$		$\sigma = 0,225\%$

Fonte: Autor.

Aqui, observa-se que as peças com resíduo perderam mais massa durante o processo que as peças sem o aditivo.

Nota-se também que, considerando o erro padrão, não houve diferença de perda entre as amostras com 5 e 7% de pó de ciclone em sua composição e, apesar de essas duas composições terem apresentado perdas de massa maiores que os corpos-de-prova sem resíduo, a diferença não foi significativa, mostrando que essas duas condições são satisfatórias nesse quesito.

Os corpos-de-prova com 10% de resíduo apresentaram perda de massa maior que todas as outras condições.

A Tabela 5 apresenta os resultados para a sinterização a 850 °C.

Tabela 5 – Perda de Massa Total para peças queimadas a 850 °C.

Temperatura 850 ° C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)
6	14,85%	5 V	15,33%	7 I	15,20%	10 II	16,99%
7	16,98%	5 VI	14,82%	7 II	15,26%	10 IV	17,43%
8	16,77%	5 VIII	14,83%	7 IV	15,36%	10 VI	16,68%
11	15,67%	5 X	15,02%	7 V	15,15%	10 XI	17,43%
15	16,84%	5 XII	15,10%	7 XIV	15,06%	10 XIV	17,18%
Média	$\bar{X} = 16,77\%$		$\bar{X} = 15,02\%$		$\bar{X} = 15,21\%$		$\bar{X} = 17,18\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,770\%$		$\sigma = 0,156\%$		$\sigma = 0,084\%$		$\sigma = 0,246\%$

Fonte: Autor.

Com esses resultados, podemos verificar que as amostras sem resíduo não apresentaram incremento de perda de massa significativo, estando na mesma faixa de perda das amostras sinterizadas a 800 °C, enquanto que para as amostras sem aditivo houve maior incremento dessa perda, em torno de 2% a mais na média, se comparadas à mesma condição em 800 °C.

Nota-se também que as composições 5 e 7% continuaram a não apresentar diferenças, se considerarmos o erro padrão.

A composição com 10% de resíduo continuou sendo a com maior perda de massa.

A Tabela 6 traz os resultados para a sinterização a 900 °C.

Tabela 6 – Perda de Massa Total para peças queimadas a 900 °C.

Temperatura 900 ° C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)	Amostras	PT (%)
9	15,95%	5 XI	13,99%	7 III	16,51%	10 III	19,39%
10	15,54%	5 I	16,18%	7 VI	16,49%	10 VII	18,24%
12	15,69%	5 XIII	15,91%	7 VII	15,49%	10 X	17,81%
13	15,93%	5 XIV	15,86%	7 VIII	15,68%	10 XII	17,97%
14	15,89%	5 III	16,62%	7 X	16,16%	10 XIII	17,75%
$\bar{X} = 15,80\%$		$\bar{X} = 15,71\%$		$\bar{X} = 16,07\%$		$\bar{X} = 18,23\%$	
$\sigma = 0,148\%$		$\sigma = 0,609\%$		$\sigma = 0,385\%$		$\sigma = 0,465\%$	

Fonte: Autor.

Novamente as composições 5 e 7 % não apresentaram variação considerável.

A composição com 10% de resíduo incrementou a perda de massa em torno de 1%, mas também continuou na mesma faixa de perda das sinterizações em menores temperaturas, caso o desvio médio seja considerado.

Espera-se que em cerâmicas vermelhas ocorra um delta maior de perda de massa com o aumento da temperatura. Porém, Batista *et al* (2008) coloca que entre 600 e 1000 °C ocorre perda de massa devido a sinterização da matéria orgânica. A pouca variação de perda de massa durante o range de temperatura estudado, que está dentro da faixa estudada pelo autor, indica que o resíduo não possui quantidade significativa de matéria orgânica para ser queimada.

A partir dos resultados obtidos, podemos ver que entre 800 e 850 °C não houve grande variação de perda de massa e que a mesma somente é um pouco incrementada em temperaturas mais elevadas, indo de acordo com a afirmação de Moreno *et al* (2009) que considera que quanto maior o aumento da temperatura, maior a perda de massa.

5.1.3 Absorção de Água

Todos os resultados dos ensaios de Absorção de Água foram obtidos de acordo com a orientação da Norma NBR 15270, que determina que a Equação 6 deste trabalho deva ser utilizada para tanto.

Novamente, os resultados das amostras com adição de resíduo foram comparados às amostras contendo apenas argila gorda e magra baseando-se nos estudos de MAIA (2018).

Para facilitar a visualização, os resultados foram separados em tabelas de acordo com a temperatura em que foram sinterizados. Os valores calculados para os corpos-de-prova queimados a 800 °C encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Absorção de Água para peças queimadas a 800 °C.

Amostras sinterizadas a 850 °C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)
6	14,25%	5 V	16,54%	7 I	16,02%	10 II	15,12%
7	14,25%	5 VI	17,24%	7 II	17,28%	10 IV	15,14%
8	14,57%	5 VIII	16,76%	7 IV	16,49%	10 VI	15,78%
11	14,25%	5 X	17,19%	7 V	16,70%	10 XI	15,37%
15	14,12%	5 XII	16,75%	7 XIV	19,22%	10 XIV	15,77%
Média	$\bar{X} = 14,29\%$		$\bar{X} = 16,90\%$		$\bar{X} = 17,14\%$		$\bar{X} = 15,44\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,424\%$		$\sigma = 0,262\%$		$\sigma = 0,448\%$		$\sigma = 0,302\%$

Fonte: Autor.

Percebe-se que das condições com adição de resíduo, a única que se aproximou da condição ideal sem resíduo estudada por MAIA (2018) foi a composição com 10%.

A composição com 7% de resíduo apresentou uma maior absorção de água dentre todas as outras.

A Tabela 8 contém os dados de AA para as peças que foram sinterizadas a 850 °C.

Tabela 8 – Absorção de Água para peças queimadas a 850 °C.

Amostras sinterizadas a 850 °C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)
6	14,25%	5 V	16,54%	7 I	16,02%	10 II	15,12%
7	14,25%	5 VI	17,24%	7 II	17,28%	10 IV	15,14%
8	14,57%	5 VIII	16,76%	7 IV	16,49%	10 VI	15,78%
11	14,25%	5 X	17,19%	7 V	16,70%	10 XI	15,37%
15	14,12%	5 XII	16,75%	7 XIV	19,22%	10 XIV	15,77%
Média	$\bar{X} = 14,29\%$		$\bar{X} = 16,90\%$		$\bar{X} = 17,14\%$		$\bar{X} = 15,44\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,424\%$		$\sigma = 0,262\%$		$\sigma = 0,448\%$		$\sigma = 0,302\%$

Fonte: Autor.

Verifica-se que, ao contrário do esperado, houve uma redução na média para as amostras com 7% de resíduo em sua composição, se comparadas ao resultado encontrado para a AA após 800 °C de queima. Porém, ao analisarmos o erro médio e o desvio médio, podemos

observar que os valores encontram-se dentro da mesma faixa estatística permitida. Logo, é conveniente afirmar que não houve variação na absorção de água com o aumento da temperatura de queima para essa condição.

As outras amostras com resíduo apresentaram leve acréscimo na Absorção de Água, porém não significativo, de modo que podemos afirmar que permaneceram no mesmo percentual, caso o erro e o desvio sejam considerados.

A Tabela 9 traz resultados para a Absorção de Água dos corpos-de-prova sinterizados a 900 °C.

Tabela 9 – Absorção de Água para peças queimadas a 900 °C.

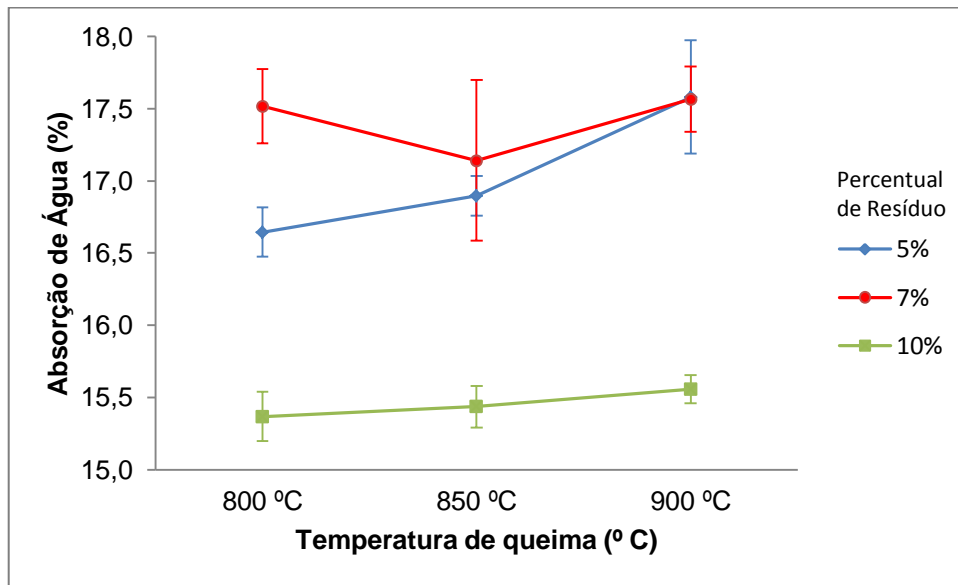
Amostras sinterizadas a 900 ° C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)	Amostras	AA (%)
9	14,98%	5 XI	18,54%	7 III	16,98%	10 III	15,38%
10	11,09%	5 I	16,62%	7 VI	17,43%	10 VII	15,59%
12	12,42%	5 XIII	18,32%	7 VII	17,84%	10 X	15,32%
13	14,59%	5 XIV	17,68%	7 VIII	18,29%	10 XII	15,87%
14	12,45%	5 III	16,75%	7 X	17,30%	10 XIII	15,63%
Média	$\bar{X} = 13,11\%$		$\bar{X} = 17,58\%$		$\bar{X} = 17,57\%$		$\bar{X} = 15,56\%$
Desvio Médio	$\sigma = 1,345\%$		$\sigma = 0,718\%$		$\sigma = 0,397\%$		$\sigma = 0,166\%$

Fonte: Autor.

Desta vez, houve um aumento da absorção de água, média, para as três condições. Porém, estatisticamente pode-se dizer que estão dentro da mesma faixa.

A título de comparação, o Gráfico 1 foi confeccionado com as três condições de resíduo e as três sinterizações.

Gráfico 1 – Absorção de Água para os três percentuais de resíduo.



Fonte: Autor.

Como se pode perceber pelo Gráfico 1, a condição que menos absorveu água dentre as três analisadas foi a com 10% de aditivo. Por conter mais aditivos, essas amostras também possuem mais Carbono e metais pesados em sua composição, uma vez que o pó siderúrgico adicionado contém elevado percentual em peso desses aditivos segundo o estudo de Jacomino *et al* (2000), o que facilita a não absorção de água.

A Norma NBR 15270 estabelece que o índice de Absorção de Água para blocos cerâmicos deve estar entre 8 e 25%. Desta forma, as três condições atendem estes requisitos.

5.1.4 Porosidade Aparente

Respeitando a linha de apresentação de resultados deste trabalho, os valores encontrados nos ensaios de porosidade aparente foram separados por temperatura de sinterização e foram calculados de acordo com a Equação 7 e foram comparados aos resultados de MAIA (2018) para amostras sem resíduo.

A Tabela 10 traz resultados para a Porosidade Aparente realizada nas amostras que foram queimadas a 800 °C.

Tabela 10 – Porosidade Aparente para peças queimadas a 800 °C.

Amostras sinterizadas a 800 ° C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)
1	28,94%	5 II	30,63%	7 IX	31,10%	10 I	28,76%
2	28,99%	5 IV	30,21%	7 XI	30,32%	10 V	28,80%
3	28,07%	5 VII	29,31%	7 XII	31,76%	10 VIII	28,09%
4	29,39%	5 IX	30,41%	7 XIII	30,83%	10 IX	28,31%
5	27,95%	5 XV	30,19%	7 XV	31,91%	10 XV	29,26%
Média	$\bar{X} = 28,67\%$		$\bar{X} = 30,15\%$		$\bar{X} = 31,18\%$		$\bar{X} = 28,64\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,524\%$		$\sigma = 0,335\%$		$\sigma = 0,518\%$		$\sigma = 0,355\%$

Fonte: Autor.

Verifica-se que a Porosidade Aparente das amostras com 10% de resíduo não divergiu significativamente à PA da condição sem resíduo para esta temperatura de queima.

Nota-se também que as condições com 5 e 7% de aditivo apresentaram maior porosidade aparente para esta temperatura de sinterização.

A Tabela 11 apresenta os resultados para a queima a 850 °C.

Tabela 11 – Porosidade Aparente para peças queimadas a 850 °C.

Amostras sinterizadas a 850 ° C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)
6	27,16%	5 V	30,10%	7 I	29,32%	10 II	28,21%
7	27,16%	5 VI	30,99%	7 II	30,73%	10 IV	28,20%
8	27,62%	5 VIII	30,32%	7 IV	29,86%	10 VI	29,09%
11	27,20%	5 X	30,86%	7 V	30,21%	10 XI	28,45%
15	27,00%	5 XII	30,59%	7 XIV	33,83%	10 XIV	29,02%
Média	$\bar{X} = 27,23\%$		$\bar{X} = 30,57\%$		$\bar{X} = 30,79\%$		$\bar{X} = 28,59\%$
Desvio Médio	$\sigma = 0,158\%$		$\sigma = 0,289\%$		$\sigma = 1,217\%$		$\sigma = 0,369\%$

Fonte: Autor.

O resultado mostra que estatisticamente não houve variação na porosidade aparente para as amostras com adição de resíduo.

A Tabela 12 traz os resultados para a PA após sinterização a 900 °C.

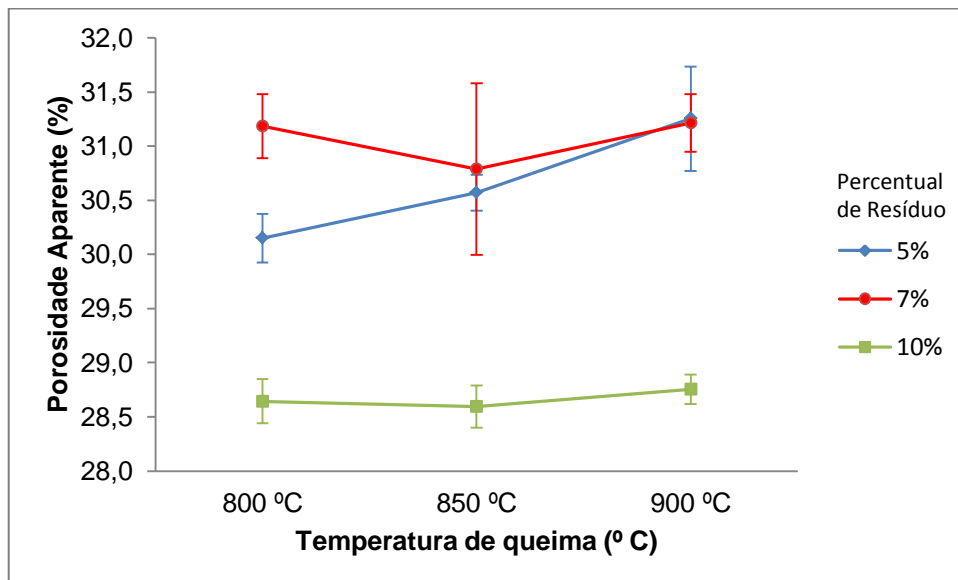
Tabela 12 – Porosidade Aparente para peças queimadas a 900 °C.

Amostras sinterizadas a 900 ° C							
Sem resíduo		5% resíduo		7% resíduo		10% resíduo	
Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)	Amostras	PA (%)
9	28,22%	5 XI	32,36%	7 III	30,53%	10 III	28,48%
10	22,43%	5 I	30,10%	7 VI	31,05%	10 VII	28,76%
12	24,55%	5 XIII	32,23%	7 VII	31,53%	10 X	28,44%
13	27,72%	5 XIV	31,39%	7 VIII	32,07%	10 XII	29,16%
14	24,61%	5 III	30,20%	7 X	30,90%	10 XIII	28,93%
Média	$\bar{X} = 25,51\%$		$\bar{X} = 31,26\%$		$\bar{X} = 31,21\%$		$\bar{X} = 28,75\%$
Desvio Médio	$\sigma = 1,970\%$		$\sigma = 0,844\%$		$\sigma = 0,467\%$		$\sigma = 0,233\%$

Fonte: Autor.

Novamente, observa-se que não houve variação estatística na porosidade aparente entre as amostras com 7 e 10% de resíduo. Já os corpos-de-prova com 5% de resíduo obtiveram um leve incremento, mas não significativo, na PA.

Os resultados obtidos foram agrupados na forma de gráfico para facilitar a visualização.

Gráfico 2 – Porosidade Aparente para os três percentuais de resíduo.

Fonte: Autor.

Comparando o Gráfico 2 de porosidade aparente ao Gráfico 1 de Absorção de Água, vemos que o comportamento é similar.

Percebe-se que a condição com 10% de aditivo é menos porosa nas três condições de temperatura de queima.

Para elevadas temperaturas, não há diferença significativa de porosidade aparente para as amostras com 5 e 7% de resíduo.

Souza *et al* (2017) afirma que a porosidade aparente é a relação entre o volume de poros abertos e o volume do corpo de prova. Desta forma, deseja-se uma menor porosidade aparente. Assim, para esta condição, o traço que continha 10% de resíduo apresentou resultados mais satisfatórios.

5.1.5 Massa Específica Aparente

Os resultados Massa Específica Aparente (MEA) também foram separados por temperatura de sinterização das amostras.

Novamente, fez-se uma comparação das amostras com resíduo às amostras sem resíduo estudadas por MAIA (2018).

A Equação 8 foi utilizada para os cálculos.

A Tabela 13 apresenta os resultados de MEA para as amostras sinterizadas a 800 °C.

Tabela 13 – Massa Específica Aparente para peças queimadas a 800 °C.

Amostras sinterizadas a 800 °C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)
1	1,87	5 II	1,80	7 IX	1,78	10 I	1,86
2	1,87	5 IV	1,81	7 XI	1,81	10 V	1,86
3	1,90	5 VII	1,83	7 XII	1,77	10 VIII	1,88
4	1,85	5 IX	1,81	7 XIII	1,79	10 IX	1,88
5	1,90	5 XV	1,80	7 XV	1,76	10 XV	1,84
Média	$\bar{X} = 1,88$		$\bar{X} = 1,81$		$\bar{X} = 1,78$		$\bar{X} = 1,86$
Desvio Médio	$\sigma = 0,0176$		$\sigma = 0,009$		$\sigma = 0,016$		$\sigma = 0,013$

Fonte: Autor.

Observa-se que a condição com maior massa específica aparente dentre as amostras com adição de resíduo foi a 10%, que não divergiu estatisticamente da condição ideal sem resíduo de MAIA (2018).

A Tabela 14 traz os resultados de MEA para amostras queimadas a 850 °C.

Tabela 14 – Massa Específica Aparente para peças queimadas a 850 °C.

Amostras sinterizadas a 850 ° C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)
6	1,91	5 V	1,82	7 I	1,83	10 II	1,87
7	1,91	5 VI	1,80	7 II	1,78	10 IV	1,86
8	1,90	5 VIII	1,81	7 IV	1,81	10 VI	1,84
11	1,91	5 X	1,80	7 V	1,81	10 XI	1,85
15	1,91	5 XII	1,83	7 XIV	1,76	10 XIV	1,84
Média	$\bar{X} = 1,91$		$\bar{X} = 1,81$		$\bar{X} = 1,8$		$\bar{X} = 1,85$
Desvio Médio	$\sigma = 0,0032$		$\sigma = 0,01$		$\sigma = 0,022$		$\sigma = 0,009$

Fonte: Autor.

Verifica-se que houve pouca redução em média de massa específica aparente para as condições sem resíduo e com 10% de resíduo. Nota-se que essa variação foi proporcional ao aumento de porosidade aparente dessas condições entre 800 e 850 °C. Vale salientar que, estatisticamente, essa redução no traço com 10% de resíduo não foi significativo.

A Tabela 15 traz os resultados de MEA para as peças queimadas a 900 °C.

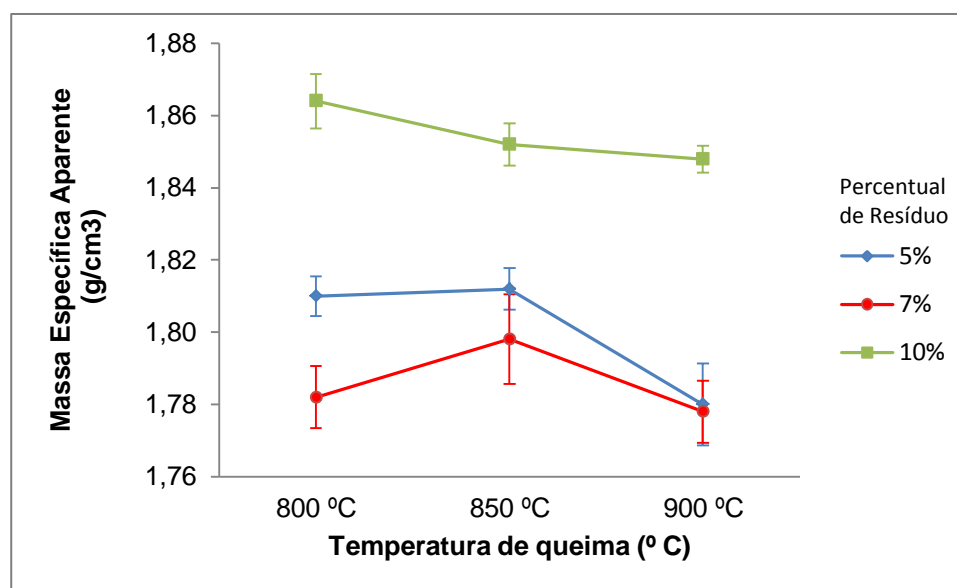
Tabela 15 – Massa Específica Aparente para peças queimadas a 900 °C.

Amostras sinterizadas a 900 ° C							
Sem resíduo		5%resíduo		7%resíduo		10%resíduo	
Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)	Amostras	MEA (g/cm3)
9	1,88	5 XI	1,75	7 III	1,80	10 III	1,85
10	2,02	5 I	1,81	7 VI	1,78	10 VII	1,84
12	1,98	5 XIII	1,76	7 VII	1,77	10 X	1,86
13	1,90	5 XIV	1,78	7 VIII	1,75	10 XII	1,84
14	1,98	5 III	1,80	7 X	1,79	10 XIII	1,85
Média	$\bar{X} = 1,95$		$\bar{X} = 1,78$		$\bar{X} = 1,78$		$\bar{X} = 1,85$
Desvio Médio	$\sigma = 0,049$		$\sigma = 0,020$		$\sigma = 0,013$		$\sigma = 0,005$

Fonte: Autor.

Houve um decréscimo na Massa Específica Aparente das amostras com resíduo. Porém, mais uma vez, não foi um decremento significativo em termos estatísticos. Para facilitar essa verificação, podemos analisar o Gráfico 3.

Gráfico 3 – Massa Específica Aparente para os três percentuais de resíduo.



Fonte: Autor.

Meyer *et al* (2016) afirma que a MEA é a relação da quantidade de poros fechados e ANDRADE (2009) afirma que há uma relação entre porosidade aparente e massa específica aparente, de modo que quanto maior a porosidade, menor a MEA. Deste modo, o Gráfico 3 apresenta aspecto inverso ao Gráfico 2 de porosidade aparente. Na condição em que a porosidade era maior, apresentou-se uma Massa Específica Aparente menor.

Dentre os três traços estudados, as amostras que continham 10% de resíduo apresentaram maior MEA. E, de acordo com as Tabelas apresentadas, essa condição não divergiu significativamente dos resultados das amostras sem resíduo de MAIA (2018).

5.2 Comparações dos resultados

Após a realização dos ensaios, todos os corpos-de-prova, incluindo os sem resíduo estudados por MAIA (2018), foram submetidos à estufa novamente para retirada de toda a umidade presente. Feito isso, foram realizadas três medições ao longo de seus comprimentos, três ao longo de suas larguras e três ao longo de suas alturas. Desta forma, foi possível obter uma média para essas medições, cujos resultados podem ser conferidos na Tabela 16.

Tabela 16 – Comparativo das médias das medições ao longo dos corpos-de-prova.

COMPARATIVO DAS MEDIÇÕES				
Sem resíduo	5%resíduo	7%resíduo	10%resíduo	Máxima diferença
Comprimento médio (mm)	Comprimento médio (mm)	Comprimento médio (mm)	Comprimento médio (mm)	Δ Comprimento médio (mm)
114,28	115,40	115,72	112,26	1,44
Altura média (mm)	Altura média (mm)	Altura média (mm)	Altura média (mm)	Δ Altura média (mm)
13,34	13,55	13,25	13,16	0,21
Largura média (mm)	Largura média (mm)	Largura média (mm)	Largura média (mm)	Δ Largura média (mm)
23,82	24,05	24,20	23,82	0,38

Fonte: Autor.

A última coluna de máxima diferença mostra o delta máximo entre as médias das medições das amostras com resíduo em relação às sem o aditivo. Como se pode perceber, a maior diferença foi de 1,44 mm no comprimento. Percentual baixo se comparado com a dimensão do comprimento do corpo-de-prova. As diferenças de altura e largura não foram significativas.

De posse de todos os resultados dos ensaios para as três temperaturas de sinterização, foi possível montar tabelas comparativas entre as condições mais satisfatórias, para assim facilitar a escolha do melhor traço.

O traço sem resíduo estudado por MAIA (2018) foi a base comparativa, uma vez que era esperado que ensaios feitos sem adição de aditivos apresentassem resultados mais satisfatórios.

Desta forma, a Tabela 17 traz os resultados obtidos enfatizados por: menor retração linear total; menor perda de massa total; menor índice de absorção de água; menor porosidade aparente e maior massa específica aparente; separados por traços com e sem resíduo.

Tabela 17 – Comparação dos melhores resultados.

MELHORES RESULTADOS				
AMOSTRAS SEM RESÍDUO				
ENSAIO	COMPOSIÇÃO	TEMPERATURA DE QUEIMA	RESULTADO	DIFERENÇA EM MÉDIA*
Retração Linear (RLt)	Sem Resíduo	800 °C	1,12%	0,43%
Perda de Massa (PT)	Sem Resíduo	800 °C	14,45%	0,57%
Absorção de Água (AA)	Sem Resíduo	900 °C	13,11%	2,26%
Porosidade Aparente (PA)	Sem Resíduo	900 °C	25,51%	3,08%
Massa Específica Aparente (MEA)	Sem Resíduo	900 °C	1,95	0,09%
AMOSTRAS COM RESÍDUO				
ENSAIO	COMPOSIÇÃO	TEMPERATURA DE QUEIMA	RESULTADO	DIFERENÇA EM MÉDIA*
Retração Linear (RLt)	5% Resíduo	800 °C	0,69%	0,43%
Perda de Massa (PT)	5% Resíduo	850 °C	15,02%	0,57%
Absorção de Água (AA)	10% Resíduo	800° C	15,37%	2,26%
Porosidade Aparente (PA)	10% Resíduo	850 °C	28,59%	3,08%
Massa Específica Aparente (MEA)	10% Resíduo	800 °C	1,86	0,09%

*Diferença para a melhor condição com resíduo

Fonte: MAIA (2018) e Autor. Adaptado pelo Autor.

O traço sem resíduo apresentou melhores resultados se comparados aos corpos-de-prova com o aditivo. Porém, nota-se que estes não são significativamente divergentes. Destaque para a condição 10%, que embora tivesse a maior quantidade de pó de ciclone em sua composição, divergiu da melhor condição entre as amostras sem o aditivo em apenas 3,08% na Porosidade Aparente.

6 CONCLUSÃO

Os resultados das medições feitas em todos os corpos-de-prova após a realização de todos os ensaios indicam que não houve significativa diferença dimensional entre as amostras com resíduo nas três composições e as amostras sem resíduo. Como não há diferença entre as dimensões, por consequência também não há divergências abruptas em se tratando de retrações volumétricas. Este resultado é satisfatório, uma vez que para produções em larga escala a redução dimensional implica em perda de matéria-prima.

Os resultados dos ensaios de Retração Linear Total, considerando a secagem e a queima como uma única retração, mostraram que os traços com 5% e 7% de resíduo apresentaram comportamento similar em todas as temperaturas de queima. Já as amostras com 10% de resíduo em sua composição apresentaram o mesmo comportamento em média que as amostras sem aditivo para as temperaturas de 850 °C e 900 °C. Caso seja considerado o erro padrão, podemos dizer que estatisticamente não divergiram entre si. Como um dos objetivos deste trabalho foi verificar a aplicabilidade desses resíduos na mistura cerâmica vermelha, pode-se afirmar que as três condições apresentaram resultados satisfatórios para esta aplicabilidade.

Para a análise de Perda de Massa Total, considerando perdas na secagem e queima, as amostras com 5% e 7% de resíduo não apresentaram diferenças, em termos estatísticos, ao longo das três temperaturas de sinterização (800, 850 e 900 °C). Já as amostras com 10% de resíduo perderam mais massa que todas as outras nas três condições de temperatura. Observa-se que a 900 °C não houve diferença entre as amostras com 5%, 7% e sem resíduo. Desta forma, analisando a Perda de Massa Total, dentre as amostras com aditivo, as mais adequadas para a industrialização são as com 5 e 7% de pó de ciclone, já que apresentam menores retrações e perdas de matéria.

Esses ensaios mostraram que a adição em pequena quantidade de resíduo de Pó de Ciclone não tornou os blocos cerâmicos suscetíveis à temperatura, uma vez que não apresentaram um delta considerável de perda de massa e retração nas três temperaturas.

As três composições (5%, 7% e 10%) de resíduo não apresentaram resultados muito diferentes de percentual de água absorvido, ao contrário das amostras sem resíduo que reduziram o percentual de absorção com o aumento da temperatura. As amostras com 5 e 7% de pó siderúrgico não apresentaram também variações em 850 e 900 °C, apesar de absorverem mais líquido que a condição à 10%. Deste modo, o traço mais satisfatório segundo esta análise

foi o de 10% de resíduo. Todas as composições apresentaram resultados de AA dentro dos valores de 8% a 25% estabelecidos pela Norma ABNT NBR 15270.

As amostras com 10% de resíduo se mostraram menos porosas e apresentaram resultados similares para as três temperaturas de sinterização. Além disso, para a queima a 800 °C, não divergiu significativamente da condição ideal sem resíduo. Desta forma, dentre os corpos-de-prova com aditivo, apresentou resultados mais satisfatórios para esta análise.

As três condições de resíduo também não apresentaram significativos deltas de Massa Específica Aparente nas três temperaturas de queima. Como uma maior MEA é desejável, as amostras que apresentaram maiores resultados foram as com 10% de pó de ciclone.

Observa-se que em geral a adição de resíduo siderúrgico à massa cerâmica não influencia diretamente para variações ao longo das três temperaturas, ou seja, amostras da mesma composição não apresentam resultados muito diferentes em 800, 850 e 900 °C. As variações nas propriedades acontecem quando é adicionada uma maior quantidade em peso de resíduo, especialmente a uma composição de 10%.

As amostras com 5 e 7% de resíduo comportaram-se de forma similar em todos os ensaios realizados.

Assim sendo, o traço mais desejável é o que continha 10% de resíduo em sua composição, pois apresentou menor absorção de água, menor porosidade aparente e maior massa específica aparente em massa e, dentre as três amostras com resíduo, foi a que mais se assemelhou à condição ideal sem o aditivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAJO, M.F. *Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos*: ed. Beralmar, 2000.
- ALMEIDA, Genival da Silva. *Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais*. 2009. 214 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- AMARAL, Lucas Fonseca. *Formulação de Massa cerâmica para fabricação de telhas*. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos do Goytacazes, 2016.
- ANDRADE, Fernando. *Estudo da Formação de Massas Cerâmicas Provenientes da Região de Seridó-RN para Fabricação de Telhas*. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN, 2009.
- INFORMAÇÕES TÉCNICAS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO*. Abceram. Disponível em: <<https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em: 08 jan. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação**. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.
- BACELLI, Gilberto. *Avaliação do Processo Industrial da Cerâmica Vermelha na Região do Seridó - RN*. 541 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- BALDUINO, Ana Paula Zenóbia. *Estudo da Caracterização e Composição de Argilas de Uso Cosmético*. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016.
- BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. *Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais*. **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v.3.1, p. 46-61, 2008.
- BAUER, L. A. Falcão. *Materiais de Construção*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1979.
- CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M; ALMEIDA, A. S. *Argila para Cerâmica Vermelha. Rochas & Minerais Industriais: usos e aplicações*, 2 Ed. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2005.
- O QUE É ALTO FORNO?*. CIMM. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/1268-alto-forno>>. Acesso em: 19 jan. 2019.
- DUTRA, R.P. S. *Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural*, 138p. Tese (Doutorado em engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2007.
- GODINHO, K.O. et al. *Efeito da adição de vidro sobre propriedades de queima de uma argila vermelha*. **Congresso Brasileiro de Cerâmica**. São Pedro: Cbc, 2005. p. 1 - 12.

IEL; FIEC. *Curso de Queima de produtos da cerâmica vermelha e controle da qualidade do processo produtivo*. Teresina, 2007.

LIMPEZA DOS GASES. Infomet. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/siderurgia-3a-limpeza-gases.php>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS. IAU. Disponível em: <<https://www.iau.usp.br/pesquisa/grupos/arqtema/erica/cdrom-erika/pecascericas/processo.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

CLEANING OF BLAST FURNACE GAS. Ispat Guru. Disponível em: <<http://ispatguru.com/cleaning-of-blast-furnace-gas/>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

JACOMINO, V. M. F. et al. *Controle Ambiental das indústrias de Ferro-gusa em altos fornos a carvão vegetal*. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente/ SEGRAC, 002a. 302p.

LIMAVERDE, João. *A Indústria de Cerâmica Vermelha no Nordeste*. 4. ed. Fortaleza: BNB.ETENE, 1983.

MAIA, Francisco Aldo Marceno. *Análise das Propriedades Físicas das Misturas Cerâmicas Utilizadas na Indústria de Cerâmica Vermelha*. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

MORENO, M.m.m.t. et al. *Análise do Comportamento de Queima de Argilas e Formulações para Revestimento Cerâmico*. **A Scientific Electronic Library Online - Scielo**, Rio Claro, v. 8, n. 55, p.286-295, ago 2009.

MORETE, G. F. et al. *Avaliação de Algumas Propriedades Físico-Mecânicas de Corpos Cerâmicos Incorporados com Resíduo de Escória de Soldagem*. **Revista Matéria**, Campos do Goytacazes, v. 11, n. 3, p.232-237, ago. 2006.

MOTTA, J.F.M.; ZANARDO, A.; CABRAL JR., M.; TANNO, L. C. e CUCHIERATO, G. (2004). *As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: argilas e caulins*. **Cerâmica Industrial**, vol.9, n.2, p.33-46.

PEÇANHA JUNIOR, L. A. F. *Reformulação de Massa Cerâmica para Telhas do Município de Campos dos Goytacazes*. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2006.

PEDROTI, Leonardo Gonçalves. *Desenvolvimento de Massa Cerâmica com o Uso de Resíduo de Granito para Obtenção de Blocos Cerâmicos Prensados de Encaixe de Matriz Argilosa*. 191 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos do Goytacazes, 2011.

RIBEIRO, M.J.; FERREIRA, A.A.L.; LABRINCHA, J.A. *Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas cerâmicas vermelhas*. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 1, p. 37-42, 2003.

SANTOS, D.m.s. et al. *Análise da Viabilidade da Incorporação do Pó de Despoeiramento Siderúrgico em Cerâmica Vermelha*. **Cbecimat**, 2016. p. 1303 - 1304.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1989.

SOUSA, João Batista Monteiro et al. *Análise De Porosidade Aparente Na Fabricação De Porcelanato Utilizando Resíduos De Caulim E Granito Sinterizados A Temperatura De 1250 °c*. **CONTECC**. Belém: Soea, 2017. p. 1 - 5.

TAVARES, Sergio F. et al. *Análise De Processos Produtivos Em Cerâmica Vermelha – Estudo De Caso Comparativo Entre Brasil E Alemanha*. Foz do Iguaçu. **Entac**, 2002. p. 1 - 10.

TIJOLOS PRENSADOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO SIDERÚRGICO. *Arquitetura e Tecnologia*. Disponível em: <<http://arquiteturaetecnologia.blogspot.com/2011/03/prensagem-de-tijolos-produzidos-partir.html>>. Acesso em 22 mar. 2019.

VIEIRA, Carlos Maurício Fontes et al. *Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha Através da Curva de Bigot*. **Cerâmica Industrial**, 2003. Campos do Goytacazes.

VIEIRA, C.m.f. et al. *Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente*. **A Scientific Electronic Library Online - Scielo**, Rio de Janeiro, v. 62, n. 364, p.376-385, dez. 2016.

APÊNDICE – Análises Estatísticas

Absorção de Água.

ABSORÇÃO DE ÁGUA - AMOSTRAS 5%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média (%)	16,65	16,90	17,58
Desvio Padrão	0,38	0,30	0,88
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,17	0,14	0,39

ABSORÇÃO DE ÁGUA - AMOSTRAS 7%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	17,52	17,14	17,57
Desvio Padrão	0,58	1,25	0,51
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,26	0,56	0,23

ABSORÇÃO DE ÁGUA - AMOSTRAS 10%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	15,37	15,44	15,56
Desvio Padrão	0,38	0,32	0,22
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,17	0,15	0,10

Fonte: Autor.

Massa Específica Aparente.

MASSA ESPECÍFICA APARENTE - AMOSTRAS 5%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	1,81	1,81	1,78
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,03
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,01	0,01	0,01

MASSA ESPECÍFICA APARENTE - AMOSTRAS 7%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	1,78	1,80	1,78
Desvio Padrão	0,02	0,03	0,02
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,01	0,01	0,01

MASSA ESPECÍFICA APARENTE - AMOSTRAS 10%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	1,86	1,85	1,85
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,01
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,01	0,01	0,00

Fonte: Autor.

Perda de Massa Total.

PERDA DE MASSA TOTAL - AMOSTRAS 5%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	15,63	15,02	15,71
Desvio Padrão	0,31	0,21	1,01
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,14	0,09	0,45

PERDA DE MASSA TOTAL - AMOSTRAS 7%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	15,53	15,21	16,07
Desvio Padrão	0,13	0,11	0,47
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,06	0,05	0,21

PERDA DE MASSA TOTAL - AMOSTRAS 10%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	17,27	17,14	18,23
Desvio Padrão	0,30	0,32	0,67
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,14	0,14	0,30

Fonte: Autor.

Porosidade Aparente.

POROSIDADE APARENTE - AMOSTRAS 5%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	30,15	30,57	31,26
Desvio Padrão	0,50	0,37	1,08
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,22	0,16	0,48

POROSIDADE APARENTE - AMOSTRAS 7%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	31,18	30,79	31,22
Desvio Padrão	0,66	1,78	0,60
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,29	0,79	0,27

POROSIDADE APARENTE - AMOSTRAS 10%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	28,64	28,59	28,75
Desvio Padrão	0,46	0,43	0,30
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,20	0,19	0,14

Fonte: Autor.

Retração Linear Total.

RETRAÇÃO LINEAR TOTAL - AMOSTRAS 5%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	0,69	0,86	0,75
Desvio Padrão	0,06	0,21	0,10
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,03	0,09	0,05

RETRAÇÃO LINEAR TOTAL - AMOSTRAS 7%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	0,77	0,96	0,77
Desvio Padrão	0,06	0,21	0,06
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,03	0,10	0,03

RETRAÇÃO LINEAR TOTAL - AMOSTRAS 10%			
	800 °C	850 °C	900 °C
Média	1,80	1,70	1,89
Desvio Padrão	0,53	0,44	0,45
Tamanho	5	5	5
Erro Padrão	0,24	0,20	0,20

Fonte: Autor.