



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MÁRIO ANDREAN MACEDO CASTRO

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE
DESPOEIRAMENTO EM TIJOLOS DE VEDAÇÃO**

**MARABÁ
2017**

MÁRIO ANDREAN MACEDO CASTRO

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE
DESPOEIRAMENTO EM TIJOLOS DE VEDAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Sul e
Sudeste do Pará em cumprimento as
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Adriano Alves Rabello.

MARABÁ
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Castro, Mário Andreato Macedo

Reaproveitamento do resíduo siderúrgico pó de despoejamento em tijolos de vedação / Mário Andreato Macedo Castro; orientador, Adriano Alves Rabelo. — 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2017.

1. Reaproveitamento (sobras, refugos, etc.). 2. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 3. Argila. 4. Usinas siderúrgicas I. Rabelo, Adriano Alves, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 363.7282

MÁRIO ANDREAN MACEDO CASTRO

**REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE
DESPOEIRAMENTO EM TIJOLOS DE VEDAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Sul e
Sudeste do Pará em cumprimento as
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de
Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO: 20/03/2017

CONCEITO: _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano Alves Rabello
(**FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador**)

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
(**FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro**)

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra
(**FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro**)

Dedico este trabalho a minha mãe e
meu irmão mais velho, que nunca
mediram esforços para realização deste
sonho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos.

A minha mãe Gracinete Maria Oliveira Macedo, a meu pai Mário Antônio Pereira Castro (In memoriam) e ao meu avô Carlos Gomes de Macedo. Ambos sempre acreditaram em mim e me apoiaram ao longo dessa jornada.

Aos meus irmãos André Augusto Macedo Castro, Andrezza Meline Macedo Castro e minha cunhada Lídia Maués Carvalho Castro por todo apoio, incentivo e conselhos.

Aos amigos Douglas Alves, Luiz Ferreira e Marco Chaves, pela prontidão, ajuda e união durante todo esse ciclo.

Aos amigos Danilo Luz e Fiama Gomes pela parceria e reciprocidade na realização desses e dos diversos trabalhos concluídos ao longo do curso.

A todos os professores que eu tive durante o curso em especial: Elias Fagury, Marcio Mafra, Edemarino Hildebrando, Alacid Neves, Márcio Correia e Fabio Gonçalves.

Ao meu orientador Prof. Adriano Alves Rabelo, pela disposição em me auxiliar nesse trabalho e pelas oportunidades concedidas a mim durante o curso.

*Você pode encarar um erro como uma
besteira a ser esquecida, ou como um
resultado que aponta uma nova direção*

Steve Jobs

REAPROVEITAMENTO DO RESÍDUO SIDERÚRGICO PÓ DE DESPOEIRAMENTO EM TIJOLOS DE VEDAÇÃO

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação tecnológica de cerâmicas de vedação com pó de despoeiramento produzidas em dimensões comerciais. O resíduo utilizado no trabalho é oriundo da produção do aço nas siderúrgicas. A produção foi realizada com o intuito de avaliar a influência do coproduto nos parâmetros geométricos, físicos, mecânicos e visuais, conforme as normas técnicas da ABNT. Foram formuladas amostras com 10 e 25% do resíduo siderúrgico inserido, a uma temperatura de queima que variou de 900-1000 °C durante 48 horas. As matérias-primas utilizadas e as formulações foram caracterizadas através de ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg, espectroscopia de fluorescência de raios X, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por energia dispersiva. Todas as amostras apresentaram resultados não satisfatórios em pelo menos uma das especificações técnicas. As amostras com o resíduo pó de despoeiramento, por possuir em sua composição química elementos voláteis como chumbo e zinco, e elementos que se solubilizam formando eflorescências, prejudicou o desempenho frente aos ensaios realizados, além de ter atribuído um aspecto visual não muito adequado aos produtos. Os resultados mostraram que o resíduo utilizado se mostrou impróprio para o uso em cerâmicas de vedação, por ter ficado abaixo do recomendado em diversos parâmetros de avaliação. Deve-se ressaltar ainda as limitações do fabricante junto a seus produtos, recomendando que o mesmo passe por uma atualização nos métodos fabris. Quanto ao pó de despoeiramento, a inserção em menor quantidade e um tratamento prévio para a retirada de elementos deletérios, são alternativas para a melhora na sua aplicação em cerâmica vermelha.

Palavras-Chave: Cerâmicas de vedação, argila, pó de despoeiramento.

ABSTRACT

This paper presents a technological evaluation of dusting ceramics with dedusting dust produced in commercial dimensions. The residue used in the work comes from steel production at steel mills. The production was carried out with the purpose of evaluating the influence of the co-product on the geometric, physical, mechanical and visual parameters, according to ABNT technical standards. Samples were drawn with 10 and 25% of the inserted steel residue at a firing temperature ranging from 900-1000 ° C for 48 hours. The raw materials used and the formulations were characterized by particle size analysis, Atterberg boundaries, X-ray fluorescence spectroscopy, X-ray diffractometry, scanning electron microscopy and dispersive energy spectroscopy. All samples presented unsatisfactory results in at least one of the technical specifications. The samples with the dusting dust residue, as they have volatile elements such as lead and zinc in their chemical composition, and elements that solubilize forming efflorescences, hindered the performance against the tests performed, besides having attributed a visual aspect not very suitable to the products . The results showed that the residue used was unsuitable for use in sealing ceramics, because it was below the recommended level in several evaluation parameters. It should also be noted the limitations of the manufacturer with its products, recommending that it undergo an upgrade in the manufacturing methods. Regarding the dedusting powder, the insertion in a smaller amount and a previous treatment for the removal of deleterious elements, are alternatives for the improvement in its application in red ceramics.

Keywords: Ceramic sealing, clay, dedusting powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cima: Visão geral de uma maromba. Baixo: Blocos verdes sendo retirados após a extrusão.	22
Figura 2. Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.	24
Figura 3. Forno paulistinha.....	25
Figura 4. Representação dos blocos cerâmicos de vedação.	25
Figura 5. Principais elementos de um forno a arco elétrico.....	29
Figura 6. Operação de um forno elétrico.....	30
Figura 7. Visão geral do forno elétrico e do sistema de despoeiramento.	31
Figura 8. Fluxograma das etapas e dos ensaios do trabalho.	38
Figura 9. Prensa manual utilizada nos ensaios de compressão.....	42
Figura 10. Ilustração das medições das dimensões geométricas dos blocos de vedação. a) Largura; b) Altura; c) Comprimento; d) Septos e parede externa; e) Desvio em relação ao esquadro; f) Planeza das faces (convexidade); g) Planeza das faces (concavidade).....	43
Figura 11. Distribuição granulométrica da argila.	48
Figura 12. Microscopia eletrônica de varredura da argila com as principais fases identificadas.....	51
Figura 13. Distribuição granulométrica do pó de despoeiramento.	52
Figura 14. MEV do pó de despoeiramento com o mapa de cores dos elementos formadores de sais. a) MEV/EDS do pó; b) Mapa do elemento Potássio (azul); c) Mapa do elemento Enxofre (verde); d) Mapa do elemento Cálcio (vermelho).	55
Figura 15. Difractometria de raios x da F1.	56

Figura 16. Difractometria de raios x da F2.	57
Figura 17. MEV/EDS da formulação 1 com as principais fases identificadas. .	58
Figura 18. MEV/EDS da formulação 2 com as principais fases localizadas.....	59
Figura 19. Variação da absorção de água em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento na argila vermelha.	60
Figura 20. Variação da porosidade em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha.	61
Figura 21. Variação da densidade aparente em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha.....	62
Figura 22. Variação da resistência mecânica em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila.	63
Figura 23. Exemplo de gravação com os dados da empresa e dimensões efetivas em um bloco utilizado na pesquisa.	66
Figura 24. Cores desenvolvidas pelos tijolos após a queima. Esq.: F0; Centro: F1; Dir.: F2.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões de fabricação de blocos cerâmicos de vedação.	26
Tabela 2. Amostragens e critérios de aceitação ou rejeição.	27
Tabela 3. Variação da composição química do pó de despoejamento na fabricação de aços carbono e de aços inoxidáveis.	32
Tabela 4. Formulações propostas para a produção dos tijolos.	37
Tabela 5. Dimensões de referência das medidas das faces dos blocos de vedação.....	43
Tabela 6, Características exigidas para os blocos cerâmicos de vedação.	44
Tabela 7. Resultados dos Limites de Atterberg.	49
Tabela 8 Composição química da argila e perda ao fogo (PF).	50
Tabela 9, Composição química elementar do pó de despoejamento.....	53
Tabela 10. Média dos resultados dos parâmetros geométricos das formulações propostas.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DRX – Difractometria de Raios X

EAE – Escória de Aciaria Elétrica

EAF – Escória de Alto Forno

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

FRX – Fluorescência de Raios X

INMETRO – Instituto de Metrologia

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

PD – Pó de Despoeiramento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivos Gerais	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Argila	18
2.2. Tijolos Cerâmicos	21
2.3. Pó de Despoeiramento	27
2.3.1. Introdução a Aciaria Elétrica	27
2.3.2. Processo de fabricação do aço por aciaria elétrica	29
2.3.3. Mecanismo de formação do pó de despoeiramento	30
2.3.4. Composição química e mineralógica do pó de despoeiramento	32
2.3.5. Propriedades físicas do pó de despoeiramento	33
2.4. Reaproveitamento de resíduos siderúrgicos em materiais cerâmicos	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. Determinações físicas e mecânicas	39
3.1.1. Absorção de Água	39
3.1.2. Porosidade Aparente	40
3.1.3. Densidade Aparente	40
3.1.4. Resistência a Compressão	41
3.2. Determinações geométricas	42
3.3. Caracterização das matérias-primas e formulações	44
3.3.1. Análise Granulométrica da argila e do pó de despoeiramento	44
3.3.2. Limites de Atterberg	45
3.3.2.1. <i>Limite de Liquidez (LL)</i>	45
3.3.2.2. <i>Limite de Plasticidade (LP)</i>	46
3.3.3. Análise Química	46
3.3.4. Análise Mineralógica	47
3.3.5. Análise Morfológica	47

4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1.	Caracterização das formulações e matérias-primas	48
4.1.1.	Caracterização da argila	48
4.1.1.1.	<i>Análise Granulométrica</i>	48
4.1.1.2.	<i>Limites de Atterberg</i>	49
4.1.1.3.	<i>Análise química</i>	50
4.1.1.4.	<i>Análise Morfológica</i>	51
4.1.2.	Caracterização do pó de despoeiramento	52
4.1.2.1.	<i>Análise Granulométrica</i>	52
4.1.2.2.	<i>Análise Química</i>	53
4.1.2.3.	<i>Análise Morfológica</i>	54
4.1.3.	Caracterização das Formulações	56
4.1.3.1.	<i>Análise Mineralógica</i>	56
4.1.3.2.	<i>Análise Morfológica</i>	58
4.2.	Propriedades físicas e mecânicas	60
4.2.1.	Absorção de Água	60
4.2.2.	Porosidade Aparente	61
4.2.3.	Densidade Aparente	62
4.2.4.	Resistência Mecânica	63
4.3.	Propriedades geométricas	64
4.4.	Características Visuais	66
5.	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reutilização dos resíduos siderúrgicos hoje é uma problemática para as indústrias de aço brasileiras. A complexidade dos compostos químicos que constituem os diversos coprodutos gerados na produção do aço, é um fator dificultoso para a aplicação em qualquer classe de material, seja pela volatilidade ou por gerarem resultados negativos em termos das propriedades tecnológicas particular de cada produto. Dessa maneira, os principais usos dos rejeitos siderúrgicos são em aterros, adubos e na indústria cerâmica. A utilização em aterros representa uma problemática, devido aos custos do processo e ao deslocamento desses materiais a pontos mais distantes da sua origem, o que representa um risco ambiental.

Os pesquisadores em cerâmicas em geral privilegiam os coprodutos siderúrgicos inserindo-os em composições diferentes na substituição de alguma matéria-prima componente, seja argila, caulim, feldspato, filito, etc., visando uma possível melhora nas propriedades tecnológicas, que em curto prazo refletiria numa economia por parte das indústrias cerâmicas em qualquer matéria-prima que seria substituída pelo resíduo aplicado.

O pó de despoeiramento (PD) é um dos resíduos mais comuns na produção do aço, e foi o objeto de estudo desse trabalho. O PD é formado nos fornos de aciaria elétrica através de uma série de fenômenos que envolvem: volatilização dos metais não-ferrosos (Zn, Pb, Cd, etc), ejeção de gotas de aço líquido e de escória ocasionadas pela expansão de bolhas de monóxido de carbono, arraste de partículas sólidas de materiais que foram adicionados ao forno. Sua composição química contém diversos metais pesados, entre eles, zinco, ferro, cromo e chumbo. Por ser classificado como resíduo perigoso, este não pode ser descartado no meio ambiente, ficando dessa maneira, estocados em pátios ou depósitos nas indústrias produtoras [1]. A geração diária de pó de despoeiramento na indústria que disponibilizou o rejeito para o presente estudo, é de aproximadamente três toneladas por dia, o que está dentro da média nacional de produção desse resíduo.

As cerâmicas de vedação possuem a cor vermelha como característica nos seus produtos. Isso se deve aos teores de óxido ou hidróxido de ferro liberados durante a sua queima, que quanto mais homogênea for, mais

uniforme será a coloração [2]. Os tijolos maciços e vazados e as telhas são os produtos mais comuns dessa classe cerâmica, e sua comercialização se destina principalmente à construção civil.

A inserção de resíduos siderúrgicos em cerâmicas de vedação em tamanho real é algo relativamente novo na região. Apenas agora está acontecendo, pois antes havia uma restrição imposta pelos ceramistas por conta do risco de prejuízos na sua produção, quando esta é interrompida para testes que a princípio não trariam nenhum retorno financeiro. A partir de resultados prévios em laboratório inserindo o pó de despoejamento em corpos de prova de argila, e sabendo da necessidade das siderúrgicas em conseguir um fim para esse rejeito, construiu-se uma parceria entre faculdade, siderúrgica e uma fabricante de tijolos de médio porte na região, permitindo dessa forma a continuação do trabalho de pesquisa, que passou por adaptações imposta pelos ceramistas como a escolha de uma única temperatura de queima e o tempo para a produção dos corpos de prova das composições propostas no estudo em virtude da melhor forma de minimizar o prejuízo causado na parada da produção dos seus produtos.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Avaliar o uso do resíduo siderúrgico pó de despoejamento em cerâmicas de vedação com duas formulações, com ênfase nas alterações das propriedades físicas, mecânicas, geométricas e visuais dos produtos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterização do pó de despoejamento através de análises química e morfológica;
- Caracterização da argila de acordo com peneiramento, limites de Atterberg, análise química e análise morfológica;
- Produção de tijolos de vedação com e sem o resíduo e avaliação do desempenho conforme as propriedades e análises de interesse.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Argila

Os produtos cerâmicos são materiais de construção, obtidos através da secagem e cozimento de materiais argilosos. Na fabricação, a matéria-prima principal é a argila. Denomina-se argila ao conjunto de minerais, compostos principalmente de silicatos de alumínio hidratados, que possuem a propriedade de formarem com a água uma pasta plástica suscetível de conservar a massa moldada, secar e endurecer sob a ação do calor [2].

Durante muito tempo se conceituou que argilas são substâncias originadas da caulinita, constituídas essencialmente de sílica (SiO_2), alumina (AlO_3) e água (H_2O) e o resto de impureza amorfa. Hoje se sabe que as argilas constituídas essencialmente de partículas cristalinas extremamente pequenas, formadas por um número restrito de substâncias. Essas substâncias são chamadas minerais de argila ou argilominerais [2].

Os argilominerais são silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, contendo normalmente e em caráter subordinado, outros materiais e minerais associados, tais como quartzo, feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, hematita, matéria orgânica e outras impurezas, e são compostas de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm, com alta plasticidade quando úmidas e que, quando secas, formam torrões dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos [2].

Graças aos argilominerais, as argilas, na presença de água, desenvolvem uma série de propriedades tais como: plasticidade, porosidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação e viscosidade de suspensões aquosas que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas [3].

Grande parte das argilas utilizadas na indústria cerâmica é natural, sendo encontradas em depósitos dispersos pela crosta terrestre. Após a mineração, as argilas passam por uma *pré-transformação*, que consiste na redução granulométrica (desagregação ou moagem), mistura e homogeneização. O processo de fabricação das cerâmicas vermelhas propriamente dito tem início após estas operações [4].

Os elementos cerâmicos são, normalmente, fabricados a partir da composição de dois ou mais tipos diferentes de argilas. A *dosagem*, feita em equipamentos denominados *misturadores*, é uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos e deve seguir, com rigor, os percentuais previamente determinados nos ensaios de caracterização [5].

O gerenciamento das variações das massas advindas das jazidas tem despontado como um dos cuidados primários com o material. A partir do estudo das propriedades das argilas, é possível ir otimizando a massa gradativamente, a fim de obter melhor comportamento físico, plasticidade e características mecânicas finais da peça [5].

A etapa de descanso da massa, por um ou dois dias, coberta por lona preta, é mais importante, por exemplo, do que o uso de boquilhas de excelente qualidade. A regulagem dos equipamentos na fábrica é apenas a 'sintonia fina' da produção, devendo eles ser ajustados *depois* que se garantiu a adequada preparação da massa e os ensaios laboratoriais necessários [5].

O bom desempenho das etapas do processo cerâmico depende muito dos controles realizados nas matérias-primas. Esses controles se iniciam com a pesquisa das jazidas, coleta de material para análise, mineração, sazonalidade, indo até a etapa de expedição, após a saída do material queimado do forno e estocado no pátio [6].

Cada tipo de cerâmica requer um barro específico. A qualidade do barro deve ser verificada para se ver, por exemplo, se ele não tem muito carbonato de cálcio ou compostos sulfurosos, os quais originam cerâmica muito fendilhada. Se for muito suja, ou seja, com matérias orgânicas tais como raízes mortas, a cerâmica será muito porosa. Se tiver muito cal, ela poderá vir a queimar quando receber umidade, estourando o reboco ou parede [7].

A maioria das argilas é minerada a céu aberto, após a remoção da camada estéril e aproveitamento da camada de argila útil. Essa remoção é feita por meio de escavadeiras, trabalhando em uma face, ou, em algumas minas, por tratores ou aplanadores mecânicos de grande capacidade. A profundidade máxima econômica da camada estéril depende da espessura e do valor da camada de argila subjacente. Essa camada de argila pode ser removida por meio de escavadeiras, aplanadores ou por detonação, no caso de materiais duros. A argila é geralmente transportada para a fábrica por caminhões [8].

Após sua extração, a argila deve ser preparada para a industrialização. Segue-se sempre o que se chama apodrecimento das raízes. A argila é levada para depósitos ao ar livre, onde é revolvida sumariamente e passa por um período de descanso (não inferior a seis meses), objetivando principalmente a melhoria da plasticidade das argilas, lavagem dos sais solúveis, decomposição da matéria orgânica e diminuição das tensões causadas pela quebra das ligações químicas [6].

Após o período de sazonalidade é recomendável que a argila seja transportada para um pátio coberto, ou seja, recoberta com lona, evitando assim o excesso de umidade ou o ressecamento. Conforme a exigência, também é feita a eliminação de impurezas grosseiras e maior classificação, o que se consegue por lixiviação, sedimentação, centrifugação, flotação, aeração, dentre outros. Segue-se a formação da pasta, propriamente dita, que se inicia pela maceração, continua com a correção e termina com o amassamento [6].

A maceração é feita para se obterem menores partículas, grãos finos e, com isso, maior plasticidade, melhor contato entre os componentes. Muitas vezes é feita por processos rudimentares. A argila é colocada em caixas, onde é envolvida por força humana (com pás ou picaretas) ou por animais, que fazem girar pás no interior da massa. Se não houve eliminação das impurezas antes, é nessa fase que são retirados galhos, pedras ou outros corpos que estejam misturados com argilas; nesse caso, as máquinas não são de utilidade nas indústrias rudimentares [7].

Na região de Marabá, dentre outros minerais extraídos na microrregião a argila é o mais abundante. A existência de jazidas com elevada quantidade de argilominerais e indústrias instaladas faz da região uma grande produtora de cerâmicas vermelhas. As indústrias cerâmicas presentes na região são classificadas de pequeno a grande porte e a maioria destas indústrias atua com base no conhecimento do censo comum [9].

As cerâmicas produzidas na região de Marabá têm variações em suas características, como por exemplo, em sua coloração, em seu peso e outras alterações resultantes do controle de temperatura de queima que podem tornar a carga do forno parcial ou totalmente perdida. Logo que a carga é retirada do forno, as cerâmicas são classificadas em primeira e segunda qualidade de

acordo com o padrão de consumo pela construção civil. Até então, as cerâmicas não encaixadas em nenhuma das classificações, não tem reutilização no processo de produção de cerâmicas vermelhas e são destinadas a aterros urbanos [9].

Um diagnóstico realizado nas matérias-primas trabalhadas nas principais cerâmicas do município revelou que as argilas possuem características semelhantes ao considerar os minerais presentes. Com relação à percentagem dos minerais todas as argilas avaliadas possuem caulinita, mineral, responsável pela plasticidade. A muscovita que também se faz presente na matéria-prima pode ser utilizada como fundente da sílica, mineral não argiloso presente nas amostras, que proporciona uma estabilidade dimensional após a queima das cerâmicas, ou seja, diminui o efeito da retração linear [9].

2.2. Tijolos Cerâmicos

Os tijolos cerâmicos produzidos no Brasil segundo classificação, proposta pelo INMETRO [10], podem ser de vedação ou estruturais.

- **Blocos de vedação:** são aqueles destinados a compartimentar espaços, preenchendo os vãos de estruturas de concreto armado, aço ou outras estruturas. Assim sendo, devem suportar tão somente o peso próprio e cargas de utilização, como armários, rede de dormir e outros. Devem apresentar adequada resistência às cargas laterais estáticas e dinâmicas, advindas, por exemplo, da atuação do vento, impactos acidentais e outras [11].
- **Blocos estruturais (ou portantes):** são os que, além de exercer função de vedação, também constituem a estrutura resistente da edificação, podendo substituir pilares e vigas de concreto. Utilizados com furos sempre na vertical, apresentam elevada resistência mecânica e dimensões padronizadas, fazendo com que a alvenaria estrutural concorra diretamente com um sistema construtivo muito tradicional no Brasil, o concreto armado.

Após a argila ter passado pelos processos prévios de preparação (estocagem, sazonalidade e maceração), a mesma está pronta para ser conformada para a constituição do bloco cerâmico.

Entende-se por conformação ou formação a etapa do processo cerâmico onde a matéria-prima, ou melhor, a massa ou mistura, assume a forma ou formato bem definido [12].

Em se tratando de tijolos de vedação, a extrusão é o método de conformação usado. Esse método emprega a massa na forma de uma pasta plástica e rígida, que é forçada através de um molde para formar uma coluna contínua, que pode ser cortada em comprimentos apropriados [8].

A máquina usual de extrusão é conhecida como Maromba ou Extrusora e tem a função de homogeneizar, desagregar e compactar as massas cerâmicas, dando forma ao produto desejado: geralmente, é constituída de carcaça metálica cilíndrica. Percorrida inteiramente por um eixo giratório. A movimentação é fornecida através de acionamento de motor elétrico em conjunto com um sistema de engrenagens ou polias [13]. Na Figura a seguir temos um exemplo da maromba e dos blocos verdes sendo extrudados durante uma produção.

Figura 1. Cima: Visão geral de uma maromba. Baixo: Blocos verdes sendo retirados após a extrusão.



Fonte: Autor

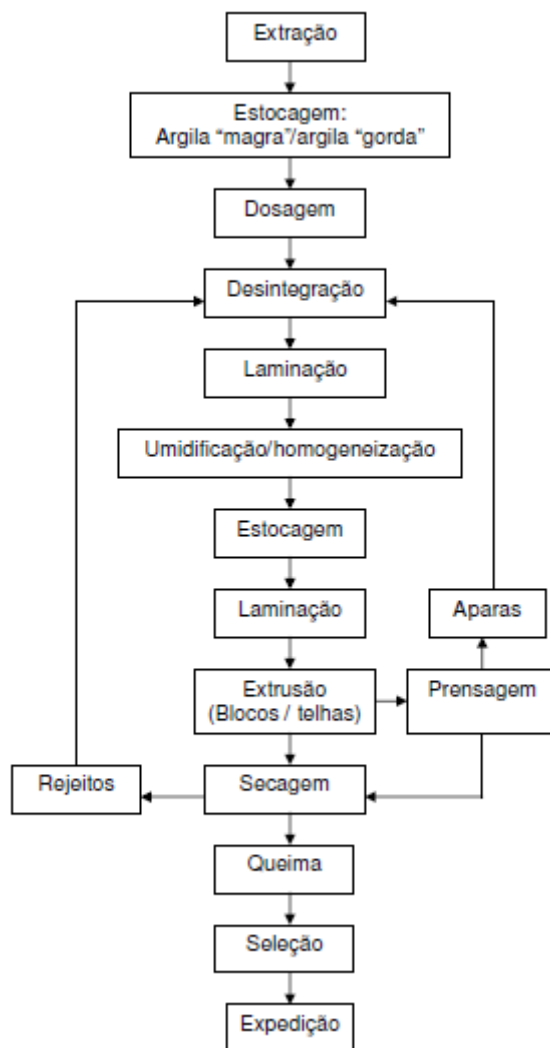
Após a conformação do bloco cerâmico é realizada a secagem, que é tão importante como o cozimento, porque, após a moldagem, ainda permanecem de 5 a 35% de água. O tijolo comum, por exemplo, conserva

cerca de 1 kg de água após a moldagem. Se a argila for levada ainda úmida para o forno, a umidade interior ficará retirada pela crosta externa, aparecendo tensões internas e o conseqüente fendilhamento. Em função disso, a secagem prévia controlada é de grande importância. Se a secagem não for uniforme, se for muito lenta, a produção se tornará antieconômica. A secagem pode levar de 3 a 6 semanas para as argilas moles, ou apenas uma semana para as argilas rijas, quando feita ao ar, por secagem natural. Outros processos são mais rápidos e constantes. Assim sendo, a estação do ano influi muito: no inverno, a produção diminui bastante. [7]

A última etapa da produção do bloco cerâmico é a queima ou sinterização, que é o processo em que o calor provoca transformações físico-químicas na massa argilosa, modificando as características de cru em *propriedades cerâmicas*. O tratamento térmico é realizado entre 800°C a 1700°C, em fornos do tipo contínuos ou intermitentes, que operam em três fases: (a) Aquecimento até a temperatura desejada; (b) Permanência em um platô, durante certo tempo à temperatura especificada; e (c) Resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C [13].

Durante a queima, que pode variar de alguns minutos a vários dias, ocorre uma série de transformações: perda de massa (por perda de água), desenvolvimento de novas fases cristalinas e soldagem dos grãos. A resistência mecânica, a contração linear, a absorção e a porosidade são aspectos adquiridos não só pela boa uniformidade e controle da massa argilosa e perfeita secagem, mas, também, a partir da boa operação do forno [14]. O fluxograma da Figura a seguir resume bem todas as etapas para a produção dos tijolos cerâmicos.

Figura 2. Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.



Fonte: [3].

Na implantação da indústria, a escolha do forno deve levar em consideração o tipo de produto a ser fabricado e as características do tipo de argila de que se dispõe. Devem ser analisados, também, o espaço disponível (leiaute do chão-de-fábrica) – dado que determinados fornos exigem áreas maiores para funcionar –, o volume de produção – quanto maior a demanda, maior deve ser a capacidade de resposta do forno – e os combustíveis disponíveis. Na aquisição do equipamento, o ceramista deve pensar no quesito *eficiência energética* [5].

Os fornos utilizados pelos ceramistas de Marabá é do tipo *paulistinha* que fazem parte da classe dos fornos intermitentes que são especialmente concebidos para a queima de pequenos volumes de peças cerâmicas. O forno paulistinha é retangular, com queimadores laterais. Muito utilizado para a

queima de telhas, mas é pouco econômico e difícil de operar. Importa verificar a relação custo/benefício e monitorar a distribuição do calor, que, se irregular, pode gerar peças com cor e resistência diferentes, mesmo num mesmo lote. Para melhores resultados, deve-se manter a constância da velocidade de queima [5]. A Figura 3 mostra o forno utilizado para fabricar os tijolos do trabalho.

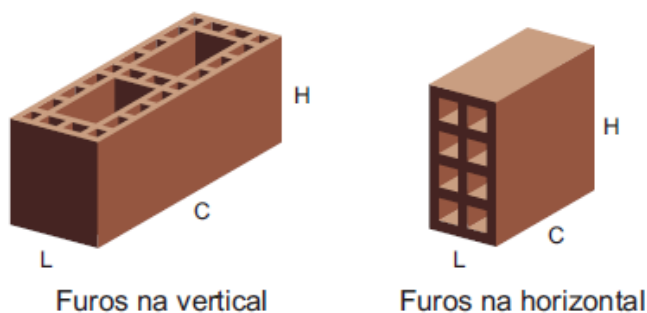
Figura 3. Forno paulistinha.



Fonte: Autor

Os blocos cerâmicos utilizados na execução das alvenarias de vedação, com ou sem revestimentos, devem atender à norma NBR 15270-1, a qual, além de definir termos, fixa os requisitos dimensionais, físicos e mecânicos exigíveis no recebimento [15]. Consideram-se dois tipos de blocos quanto ao direcionamento de seus furos prismáticos, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Representação dos blocos cerâmicos de vedação.



Fonte: [12].

As dimensões de fabricação (largura - L, altura - H e comprimento - C) devem ser correspondentes a múltiplos e submúltiplos do módulo dimensional $M = 10$ cm menos 1 cm, conforme dimensões padronizadas indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões de fabricação de blocos cerâmicos de vedação.

Largura (L)	Altura (H)	Comprimento (C)	
9	9	19	
		24	
	14	19	
		24	
		29	
	19	19	
		24	
		29	
		39	
	11,5	11,5	24
		14	24
		19	19
24			
29			
14	19	19	
		24	
		34	
		39	
19	19	19	
		24	
		34	
		39	
24	24	24	
		29	
		39	

Fonte: [15].

Para avaliação da conformidade dos blocos, além de uma inspeção geral (onde se verifica a correta identificação dos blocos, incluindo a marca do fabricante em cada peça, e as características visuais dos blocos), deve ser realizada inspeção por ensaios para determinação de suas características geométricas (valores das dimensões das faces, espessura das nervuras que

formam os septos e das paredes externas do bloco, esquadro e planeza das faces), de sua caracterização física (índice de absorção de água) e sua caracterização mecânica (resistência à compressão). Para tanto, deve-se observar os lotes de fornecimento com no máximo 100.000 blocos ou fração, de acordo com as amostragens e critérios de aceitação e rejeição apresentados na Tabela 2 [16].

Tabela 2. Amostragens e critérios de aceitação ou rejeição.

Inspeções e ensaios realizados	N° Blocos ensaiados		Blocos não-conformes			
			1° Amostragem		2° Amostragem	
	1° Amostra	2° Amostra	N° Aceitação	N° Rejeição	N° Aceitação	N° Rejeição
Identificação dos blocos	13	-	0	1	-	
Características visuais	13	13	2	5	6	7
Características geométricas	13	-	2	3	-	
Caracterização física	6	-	1	2	-	-
Caracterização mecânica	13	-	2	3	-	-

(-) não se aplica a dupla amostragem

Fonte: [16]

2.3. Pó de Despoeiramento

2.3.1. Introdução a Aciaria Elétrica

Nos processos de elaboração do aço denominados de aciaria elétrica, o calor necessário para aquecer e fundir o aço é gerado em sua maior parte pela energia elétrica. O pioneiro deste processo foi Wilhelm von Siemens que em 1878, fundiu o aço em um pequeno cadinho, por meio do fornecimento de calor através da geração de um arco voltaico, transformando energia elétrica em energia térmica [17].

O processo de elaboração utilizando a eletricidade como fonte de energia necessária para fundir e refinar o aço apresenta a vantagem de utilizar uma elevada quantidade de sucata (em alguns casos, até 100% da carga).

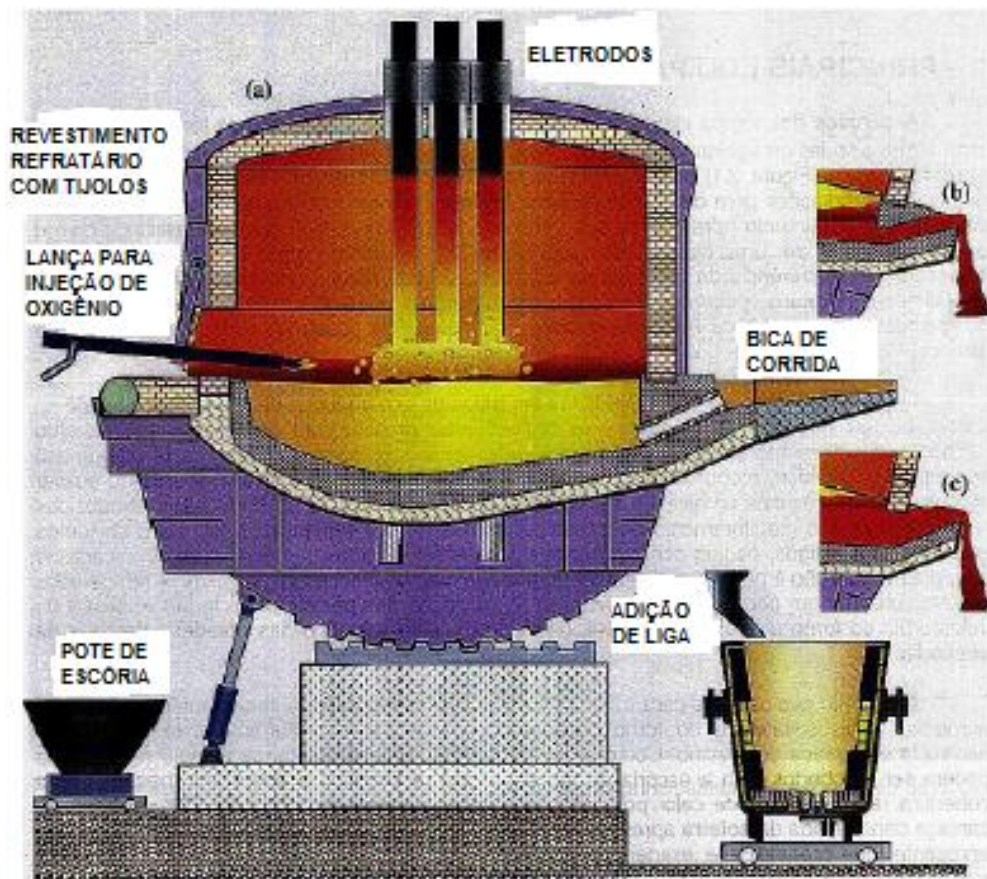
Além disso, é possível elaborar aços com um alto percentual de elementos de liga, razão pela qual esse processo é adequado para produção de aços alta liga. Outras vantagens são a facilidade de controle de temperatura e a maior flexibilidade operacional [17].

As formas de conversão de energia elétrica em calor de interesse dos processos de elaboração dos aços são: através da transferência de calor por radiação a partir de um arco elétrico gerado pela passagem de corrente de um gás ionizado, através da resistência a passagem de uma corrente elétrica em um condutor sólido e por indução eletromagnética. O arco elétrico se caracteriza por apresentar uma grande concentração de potência em um pequeno volume [18].

O forno elétrico a arco convencional de corrente alternada, que se caracteriza como o tipo mais comum utilizado na aciaria elétrica, onde a corrente elétrica passa de um eletrodo através do arco elétrico para a carga, e da carga retorna através do arco para outro eletrodo [18].

Na Figura a seguir podem-se observar os elementos fundamentais de um forno a arco elétrico (EAF) tradicional, onde ainda podemos destacar: *carcaça*, de forma normalmente circular ou ligeiramente elíptica; *painéis refrigeradores*, dotados de tubulações para circulação de água, podendo revestir a carcaça junto a massa refratária; *aberturas laterais*, uma para remoção de escória, inspeção do interior do forno, adição de materiais e injeção de oxigênio por lança, e a outra corresponde a *bica de corrida* [18].

Figura 5. Principais elementos de um forno a arco elétrico.



Fonte: [19].

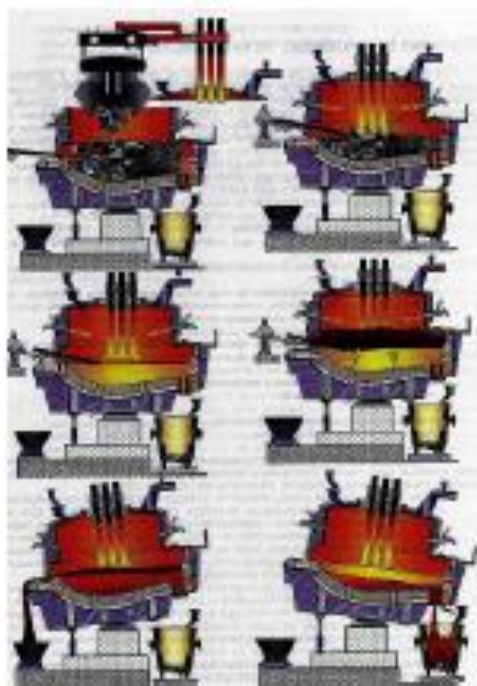
2.3.2. Processo de fabricação do aço por aciaria elétrica

As aciarias elétricas têm como matéria-prima a sucata e diferenciam-se, além da rota tecnológica, pela flexibilidade a mudanças na mistura de fontes metálicas. O processo produtivo através de EAF é realizado através da reciclagem de sucata (consumo de 78% em relação aos outros insumos) contendo ferro e outros insumos, como carbono (grafite), oxigênio e cal [20].

Em resumo, podemos representar esquematicamente as etapas do processo da elaboração de aço no forno elétrico a arco da seguinte maneira (Figura 6):

- Carregamento da carga metálica e dos fundentes;
- Início de fusão;
- Fim de fusão;
- Refino;
- Retirada de escória e amostragem;
- Vazamento.

Figura 6. Operação de um forno elétrico.



Fonte: [19].

2.3.3. Mecanismo de formação do pó de despoeiramento

Nos fornos de aciaria elétrica das usinas siderúrgicas, forma-se um material complexo oriundo de uma série de fenômenos que envolve: volatilização dos metais não-ferrosos (Zn, Pb, Cd, entre outros); ejeção de gotas de aço líquido e de escória ocasionadas pela expansão de bolhas de monóxido de carbono; arraste de partículas sólidas (materiais adicionados ao forno); e, mesmo, atomização [21]. O material em questão é denominado pó de despoeiramento, e é considerado um resíduo da produção do aço, assim como a escória e a carepa. Devido às tais circunstâncias e a sua composição, o PD é classificado como um resíduo sólido perigoso, Classe I (Não Inerte) de acordo com a norma NBR 10004 [22]. Assim, os órgãos ambientais legais exigem uma disposição adequada a esse resíduo.

Os estudos sobre a formação de pó no processo siderúrgico via arco elétrico propõem basicamente uma lista de mecanismos que teoricamente são capazes de explicá-la. Com a alta do mercado e a fomentação do caráter sustentável ambiental nas indústrias produtoras de aço, diversos estudiosos se propõem a pesquisar o tema. Por exemplo, NEIGEBAUER *et al. apud* MANTOVANI [23] estudaram os mecanismos da formação de poeira em fornos

elétricos durante a injeção de oxigênio e concluíram que as partículas, em sua maioria, foram geradas pelo mecanismo de ejeção, sendo a vaporização de importância secundária.

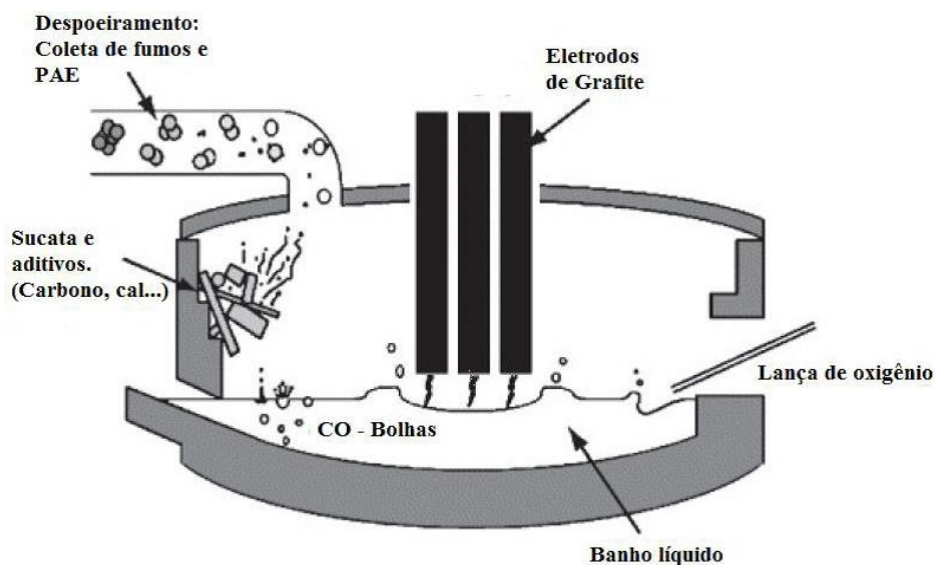
Deste modo, os seguintes mecanismos podem contribuir para geração de pós siderúrgicos em forno elétrico (podendo também ser aplicável a conversores a oxigênio):

- Vaporização de metais voláteis (Zn, Pb, Cd, entre outros);
- Ejeção de gotas de aço líquido;
- Ejeção de partículas oriundas da escória;
- Arraste de materiais adicionados ao forno;
- Atomização.

A atomização é importante durante a adição de fundentes, em especial de fina granulometria. Partículas geradas por vaporização possuem sua formação controlada pela pressão parcial de vapor nas zonas mais quentes do forno, em contrapartida as partículas ejetadas devem ter suas composições químicas semelhantes as suas fontes [24].

Durante o processo de produção do aço, os fumos são extraídos através de um equipamento de sucção projetado para a retirada de pó, gerada no forno, da aciaria. Nesse equipamento de despoeiramento, os pós e fumos são transportados para filtros manga [25]. Na Figura 7, temos uma visão geral do sistema.

Figura 7. Visão geral do forno elétrico e do sistema de despoeiramento.



Fonte: [19].

2.3.4. Composição química e mineralógica do pó de despoeiramento

A composição química do pó de despoeiramento depende principalmente do tipo da carga, além do tipo e quantidade de aditivos que fazem parte do processo siderúrgico. [18]

Pode ser observada na Tabela 3 a diferença da composição química entre pós de despoeiramento provenientes da fabricação de aços inoxidáveis em comparação com as geradas na fabricação de aço carbono comum.

Os teores de zinco e ferro no pó de despoeiramento proveniente dos aços carbono comuns são maiores se comparados com os pós gerados na fabricação dos aços inoxidáveis. Por sua vez, o PD dos aços inoxidáveis é mais rico em cromo e níquel na medida em que estes elementos são imprescindíveis nestes tipos de aço. [18]

Tabela 3. Variação da composição química do pó de despoeiramento na fabricação de aços carbono e de aços inoxidáveis.

Elementos	PD dos aços carbono (%)	PD dos aços inoxidáveis (%)
Fe total	24,9 – 46,9	22,2 – 35,9
Zn	11,1 – 26,9	1,77 – 6,22
Pb	1,09 – 3,81	0,23 – 0,78
Cd	0,03 – 0,15	0,006 – 1,79
Cr	0,06 – 0,58	2,01 – 10,1
Ni	0,01 – 0,12	0,15 – 3,34
Mo	0,02 – 0,88	0,37 – 1,46
Cu	0,06 – 2,32	0,09 – 1,26
F	0,01 – 0,88	1,36 – 4,83
Cl	0,51 – 2,36	2,36 – 4,59
Si	1,35 – 2,49	1,70 – 4,74
Mn	2,46 – 4,60	1,76 – 6,93
Mg	0,77 – 2,93	0,80 – 5,07
Ca	1,85 – 10,0	1,76 – 6,93
K	0,06 – 1,12	0,80 – 5,07
Na	0,29 – 2,31	0,47 – 4,60

Fonte: [1]

As substâncias encontradas no pó de despoeiramento podem estar presentes na forma de diferentes fases minerais. As fases geralmente presentes nesse resíduo geralmente são: magnetita (Fe_3O_4), franklinita (ZnFe_2O_4) e zinicita (ZnO). Geralmente, a técnica utilizada para identificar as principais fases é a difratometria de Raios-X [26].

2.3.5. Propriedades físicas do pó de despoeiramento

As características físicas do pó de despoeiramento podem ser analisadas através de diversas técnicas, normalmente são feitas análises granulométricas, morfológicas (análise microscópica), de densidade e área específica.

Por meio de análises granulométricas estudos relatam que o pó de despoeiramento possui aproximadamente 90% das partículas com tamanho menor que $10\ \mu\text{m}$. Os trabalhos mostram que as partículas possuem formas esféricas, confirmando os mecanismos de formação da poeira de aciaria pela ejeção de partículas provenientes da escória e do banho metálico. Além disso, micrografias obtidas através do MEV/EDS mostram que as partículas estão aglomeradas. Com isso, o resíduo possui distribuição do tamanho das partículas heterogêneas, provavelmente, devido ao estado aglomerado das partículas. A aglomeração pode prejudicar a análise granulométrica, uma vez que as partículas aglomeradas atravessam o feixe de raio laser e são contabilizadas como um único particulado [21].

O PD é caracterizado por possuir densidade baixa, ou seja, $3,5\ \text{g/cm}^3$ e $4,74\ \text{g/cm}^3$, e devido a isto é muito volumoso. A área superficial específica do pó de despoeiramento possui um valor igual a $4,72\ \text{m}^2/\text{g}$. E que 50% das partículas do resíduo estão abaixo de $0,66\ \mu\text{m}$. Já as medidas de área superficial para o pó de despoeiramento são consideradas elevadas no intervalo entre $0,40\ \text{m}^2/\text{g}$ e $5,60\ \text{m}^2/\text{g}$. [27]

O pó de despoeiramento, devido as suas características, principalmente a baixa granulometria, pode ser facilmente transportado pelo vento. Além disso, a separação sólido/líquido é dificultada quando se pretende lixiviá-lo. O armazenamento é dificultado pelas razões acima e pelo grande volume gerado. Para a reutilização no processo siderúrgico, processos de aglomeração deveriam ser empregados, porém, pelas características de fina granulometria e

alta área superficial, grandes quantidades de reagentes teriam que ser utilizados, encarecendo fortemente o processo. O valor da densidade do pó de despoejamento é intensamente dependente da umidade do mesmo, a qual pode variar na faixa de quase zero a 50%. [1]

2.4. Reaproveitamento de resíduos siderúrgicos em materiais cerâmicos

As siderúrgicas integradas geram diversos tipos e em grande quantidade de resíduos sólidos. Estes resíduos podem ser classificados em 3 grandes grupos; os ditos recicláveis contendo ferro, os finos de coque e as escórias. Entre os recicláveis contendo ferro estão: as poeiras e lamas de alto-forno e de aciaria; a lama de tratamento de água de laminação; poeiras de sinterização; e outros. As escórias são basicamente as geradas no alto-forno, na aciaria e no lingotamento contínuo [28]. Dependendo do tipo de resíduo, ele pode ser retornado ao processo, como fonte de energia ou como matéria-prima para a produção de aço, ou ainda comercializado como coproduto para outras atividades industriais [29].

A incorporação em materiais cerâmicos, atualmente, apresenta-se como uma das principais soluções tecnológicas para a disposição final de resíduos sólidos industriais e municipais [30]. A variabilidade natural das características das argilas associada a técnicas de processamento relativamente simples e ainda ao baixo desempenho exigido para os produtos permitem a presença de níveis de impurezas relativamente elevados. Com isso, pode-se deliberadamente incorporar outros tipos de materiais resultantes das mais diversas fontes de geração [31].

O uso da lama de alto-forno foi utilizada por MOTHÉ [29] em formulações de cerâmicas vermelhas. Os resultados mostraram que a lama de alto-forno é um resíduo combustível que apresenta um poder calorífico elevado, contribuindo assim para a economia de energia durante a etapa de queima da cerâmica, e apresenta também um tamanho de partícula apropriado para sua incorporação em cerâmica vermelha. Dessa forma, é recomendável incorporar lama de alto-forno em cerâmica vermelha. Entretanto, esta incorporação deve ser realizada em pequenas quantidades, máximo de 5% em massa para a mistura de argila utilizada, para evitar seu efeito deletério na qualidade da cerâmica queimada

devido à porosidade gerada pela combustão dos finos de coque e da decomposição da calcita, e ainda pela presença de compostos de ferro na microestrutura da cerâmica.

A escória é um resíduo siderúrgico que pode ser gerado no forno panela ou na aciaria elétrica, e é composta principalmente por óxidos metálicos e não metálicos. Esse resíduo vindo do forno panela foi testado por CARDOSO [32] em corpos de prova de cerâmica vermelha. Após os ensaios, permitiu-se concluir que apesar de valores negativos em alguns parâmetros avaliados como absorção de água, esse coproduto pode ser utilizado na classe de material cerâmico em questão, podendo ser incorporado até 15% do mesmo, devendo-se levar em consideração o tempo de estocagem do material.

O resíduo sólido conhecido como pó do balão, é gerado na saída de gases do alto-forno. Foram realizados testes por LIMA *et.al* [33] incorporando esse coproduto em massas argilosas para fabricação de cerâmica vermelha variando de 1,5 a 4,0% em massa e o melhor tempo de queima. Os resultados obtidos indicaram que houve melhora nas propriedades dos corpos de prova, com a utilização do pó de balão, revelando que o melhor tempo de queima foi de 2h e a composição mais adequada para a produção de cerâmica vermelha foi de 3,0%.

CASTRO *et.al* [34] estudou a viabilidade dos resíduos EAE (Escória de Aciaria Elétrica), pó de balão e pó de despoeiramento em tijolos ecológicos, inserindo os coprodutos junto com o solo e o cimento ou misturado com o refugo da produção do tijolo, em teores que variaram de 2,5 a 20% em massa para os coprodutos. Os resultados com a EAE mostraram que o resíduo é viável para ser utilizado nesse tipo de cerâmica, podendo ser inserido em até 10% para a manutenção da qualidade. A adição do pó de balão proporcionou o aumento da resistência mecânica, diminuindo a porosidade e reduzindo assim a concentração de tensões, sendo que os melhores resultados foram com as formulações de 10 e 20% de pó de balão e do pó de refugo, respectivamente. O desempenho dos tijolos com a inserção do pó de despoeiramento indicou que quanto menores os teores, maiores o desempenho mecânico do produto, apesar de que para isso, deva-se reduzir em peso a quantidade de cimento e aumentar a de solo.

Os estudos de viabilidade realizados com o pó de despoeiramento na literatura são variados, dentre os quais podemos citar o de MACHADO *et.al* [35] que avaliou o comportamento mecânico e ambiental do concreto contendo adição do PD nos teores de 10 a 20%, em relação à massa de cimento. Os resultados indicaram um aumento na resistência à compressão axial do concreto contendo 15 e 20% do resíduo, embora seja preciso aumentar o tempo de cura do produto. Além disso, observou-se um retardamento no ganho de resistência mecânica dos corpos-de-prova com teores abaixo de 15% do rejeito

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O ponto central dessa pesquisa consistiu na avaliação da qualidade dos tijolos de vedação a partir da inserção em diferentes quantidades, do resíduo siderúrgico pó de despoeiramento, permitindo a partir dos resultados, a comercialização dos produtos, utilizando para tal as normas técnicas da ABNT, especificadas para avaliação da conformidade do produto que serviram de parâmetros para os critérios e considerações feitas.

A metodologia do trabalho consistiu na escolha a partir de testes realizados em laboratórios, das melhores formulações de pó de despoeiramento e argila, para serem empregadas na mistura para a produção dos tijolos em tamanho real, as quais estão destacadas na Tabela 4.

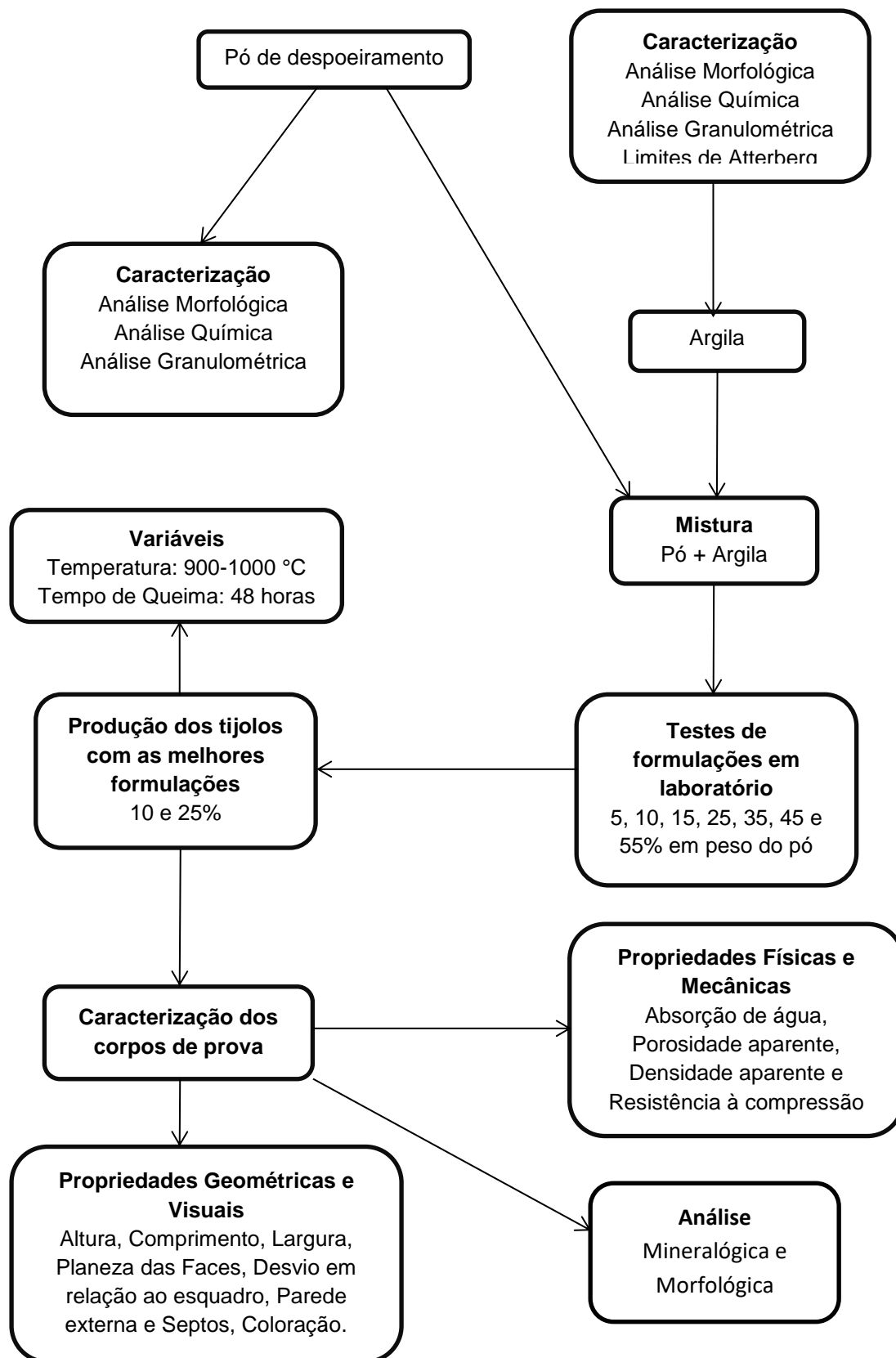
Tabela 4. Formulações propostas para a produção dos tijolos.

Formulação	Argila (%)	Pó de despoeiramento (%)
F0	100	0
F1	90	10
F2	75	25

Fonte: Autor.

A partir da determinação das formulações foi feita a concessão do resíduo junto a principal siderúrgica do município e a produção dos corpos de prova após as etapas prévias de preparação da argila. A queima das amostras foi em temperaturas que variaram de 900 a 1000 °C, em um período de 48 horas. Após a fabricação dos corpos de prova, foram feitos os ensaios geométricos, físicos e visuais para a avaliação do potencial do resíduo siderúrgico. Em paralelo a isso, fez-se análise química, morfológica e granulométrica do resíduo e da matéria prima, além da determinação dos limites de Atterberg da argila, e análise mineralógica e morfológica das formulações. O fluxograma da Figura 8 apresenta de forma simplificada, todas as etapas dessa pesquisa.

Figura 8. Fluxograma das etapas e dos ensaios do trabalho.



Fonte: Autor.

3.1. Determinações físicas e mecânicas

Os seguintes parâmetros físicos foram determinados a partir de uma amostragem da produção dos tijolos com e sem as formulações definidas.

- Absorção de Água
- Porosidade Aparente
- Densidade Aparente
- Resistência a Compressão

3.1.1. Absorção de Água

Através da absorção de água é possível calcular a porosidade dos corpos cerâmicos tanto em relação ao número de poros como no tipo de porosidade (aberta ou fechada). Alta absorção de água indica uma estrutura porosa, enquanto baixos valores deste parâmetro (para limites tendendo a zero) indicam estruturas cada vez mais compactas. Geralmente, menores valores de absorção de água correspondem ao melhor desempenho do revestimento no que diz respeito à resistência mecânica, dureza, resistência a ácidos e ao frio. Já estruturas vitrificadas apresentam baixa absorção de água [1].

Os valores de absorção de água estão diretamente ligados à porosidade aberta do material e não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. Seu cálculo é feito em porcentagem a partir da seguinte equação:

$$\%AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$$

Equação 1

Legenda:

% AA = Absorção de Água

Mu = Massa úmida (g)

Ms = Massa seca (g)

3.1.2. Porosidade Aparente

É definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. Para que se possa realizar a pesagem do corpo cerâmico imerso e úmido é necessária que os corpos de prova tenham sido imergidos em água por 24 horas. Para a realização do peso imerso, utiliza-se o princípio de deslocamento de um fluido de Arquimedes [1]. Esse parâmetro não deve exceder o valor de 35%, e é calculado em porcentagem, conforme a fórmula abaixo:

$$\%PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \times 100$$

Equação 2

Legenda:

% PA = Porosidade Aparente

Mu = Massa úmida (g)

Ms = Massa seca (g)

Mi = Massa imersa (g)

3.1.3. Densidade Aparente

A densidade aparente segue a definição clássica da razão entre massa e volume. Embora, o termo “aparente” represente que esse parâmetro nos materiais cerâmicos pode ser interpretado de formas diferentes devido a presença dos poros nos produtos [36]. Seu cálculo é feito pela seguinte fórmula:

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{Ms}{Mu - Mi}$$

Equação 3

Legenda:

DA = Densidade aparente (g/cm³)

Mu = Massa úmida (g)

Ms = Massa seca (g)

Mi = Massa imersa (g)

3.1.4. Resistência a Compressão

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por experimento. Um dos testes mais importantes a realizar nesse sentido é o teste de compressão. Embora muitas propriedades mecânicas importantes de um material possam ser determinadas por meio deste teste, ele é usado principalmente para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação normal média em muitos materiais de engenharia, principalmente as cerâmicas [37]. O cálculo desse parâmetro é feito através da equação abaixo:

$$RC \text{ (MPa)} = \frac{P}{C \times L}$$

Equação 4

Legenda:

RC = Resistência a Compressão (MPa)

P = Força suportada no ensaio (N)

C = Comprimento do tijolo (mm)

L = Largura do tijolo (mm)

Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaio destrutivos numa prensa manual Solotest (Figura 9) que contém um dispositivo adequado para a uniformização da carga aplicada no tijolo, permitindo a leitura das cargas aplicadas, com tolerância de medição de $\pm 2\%$ para a carga máxima estimada para o ensaio.

Figura 9. Prensa manual utilizada nos ensaios de compressão.



Fonte: Autor.

3.2. Determinações geométricas

As características geométricas dos blocos de vedação são as seguintes:

- Medida das faces – dimensões efetivas (largura, comprimento e altura)
- Espessura dos septos e paredes externas dos blocos
- Desvio em relação ao esquadro
- Planeza das faces

A aparelhagem necessária para a execução do ensaio foram essas abaixo:

- Paquímetro com sensibilidade mínima de 0,05 mm
- Régua metálica com sensibilidade de 0,5 mm
- Esquadro metálico de $90 \pm 0,5^\circ$

A medida das faces dos tijolos possuíam as dimensões descritas na Tabela 5, conforme a Norma 15270-1 [15].

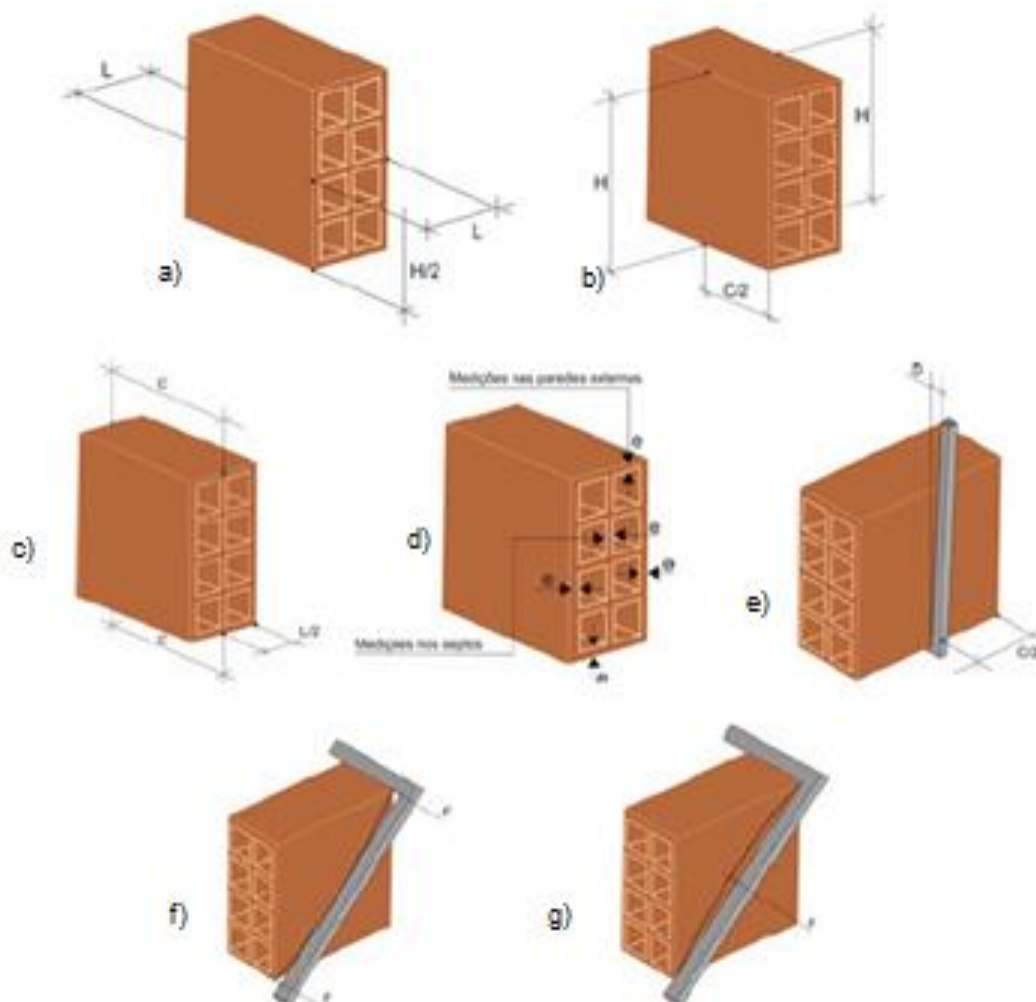
Tabela 5. Dimensões de referência das medidas das faces dos blocos de vedação.

Largura (L)	Altura (H)	Comprimento (C)
9 cm	19 cm	19 cm

Fonte: Autor.

Para a realização do ensaio, os corpos de prova devem ser recebidos, limpos, ter as rebarbas retiradas, está livre de trincas e defeitos, e ficar em ambiente protegido que preserve suas características originais [15]. A Figura 10 identifica a região do tijolo onde se deve determinar cada um dos parâmetros geométricos.

Figura 10. Ilustração das medições das dimensões geométricas dos blocos de vedação. a) Largura; b) Altura; c) Comprimento; d) Septos e parede externa; e) Desvio em relação ao esquadro; f) Planeza das faces (convexidade); g) Planeza das faces (concavidade).



Fonte: [12].

As características que os blocos cerâmicos de vedação devem apresentar, de acordo com a norma NBR 15270-1, são resumidas na Tabela 6.

Tabela 6, Características exigidas para os blocos cerâmicos de vedação.

Características Visuais	Exigências
Tolerância individual relacionada à dimensão efetiva	± 5 mm (largura, comprimento, ou altura)
Tolerância individual relacionada à média das dimensões efetivas	± 3 mm (largura, comprimento, ou altura)
Espessura das paredes internas dos blocos	≥ 6 mm
Espessura das paredes externas dos blocos	≥ 7 mm
Desvio em relação ao esquadro	≤ 3 mm
Planeza das faces	Flecha ≤ 3 mm
Resistência a compressão	$\geq 1,5$ MPa (para furos na horizontal)
Índice de Absorção de Água	$8\% \leq AA \leq 22\%$
Porosidade Aparente	$17\% \leq PA \leq 35\%$
Densidade Aparente	$\leq 2,7$ g/cm ³

Fonte: [15].

As características apresentadas na Tabela devem ser verificadas para os blocos cerâmicos conforme os procedimentos de ensaios definidos na norma NBR 15270-3. Com a finalidade de caracterização e aceitação ou rejeição dos blocos cerâmicos, essa norma descreve os métodos de ensaios para a avaliação de conformidade dos mesmos, incluindo a determinação de suas características geométricas, físicas e mecânicas. Vale ressaltar que os blocos não devem apresentar quebras, superfícies irregulares ou deformações [16].

3.3. Caracterização das matérias-primas e formulações

3.3.1. Análise Granulométrica da argila e do pó de despoejamento

A distribuição de tamanho de partícula do pó de despoejamento e da argila foi obtida usando método de peneiramento a seco, de acordo com a norma técnica da ABNT NBR-7181/84 [38]. O procedimento consiste basicamente na classificação do tamanho das partículas que ficam retidas no peneiramento de 100 g de amostra em peneiras que variaram de 18 a 200 tyler, num agitador de partículas que teve seu ciclo de trabalho realizado em oito minutos. A partir da pesagem das peneiras com a amostra retida nelas, gera-se um gráfico logarítmico para definirmos o diâmetro médio e a classificação granulométrica das matérias-primas.

3.3.2. Limites de Atterberg

São utilizados para comparar (medir) a quantidade d'água com os padrões do comportamento do solo na engenharia. São as quantidades de água nos estágios críticos do solo, que são:

- **Estado líquido:** solo com umidade muito elevada se apresenta como um fluido denso.
- **Estado plástico:** devido à evaporação da água, o solo endurece começa a perder a capacidade de fluir, porém pode ser moldado e conservar sua forma.
- **Estado semissólido:** com a continuação da perda de umidade, o estado plástico desaparece até que o solo se desmanche ao ser trabalhado.
- **Estado sólido:** continuando a secagem, ocorre a passagem gradual para o estado sólido.

Para a avaliação do comportamento do solo, faz-se uso de dois métodos fundamentais: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade.

3.3.2.1. Limite de Liquidez (LL)

É a quantidade de umidade do solo no qual o solo muda do estado líquido para o estado plástico, ou seja, perde a sua capacidade de fluir. A determinação é feita pelo Aparelho de Casagrande - MB-30, com pelo menos um ponto.

LL é a quantidade d'água na qual um corte padrão na amostra remoldada irá fechar à distância de 13 mm com 25 golpes. A determinação pode ser feita conhecendo-se apenas um ponto através da fórmula:

$$LL = \frac{h}{1,419 - 0,3 \log n}$$

Equação 5

Onde:

h = teor de umidade (%)

n = número de golpes

O intervalo do limite de liquidez pode ir de 0 a 1000, mas a maioria dos solos tem LL menor que 100.

3.3.2.2. Limite de Plasticidade (LP)

O limite de plasticidade mede a quantidade mínima de água necessária para que a argila adquira plasticidade.

Na determinação do limite de plasticidade, uma alíquota da amostra previamente preparada é colocada em um recipiente e adiciona-se água destilada em quantidade suficiente para se obter uma massa plástica e homogênea. Confecciona-se manualmente uma pequena bola e rola-se sobre uma placa de vidro para lhe dar uma forma cilíndrica. Atingindo o diâmetro de 3 mm sem fragmentar, deve-se amassar o material e proceder como anteriormente. Esta operação continua até que, por perda de umidade, o cilindro fragmenta-se ao atingir o diâmetro de 3 mm. Deve-se, então, transferir imediatamente vários destes pedaços a um recipiente e determinar o limite de plasticidade (LP), de acordo com a Equação abaixo.

$$LP = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Equação 6

Onde:

Ph = peso do material úmido (g)

Ps = peso do material seco (g) em estufa entre 105 e 110 °C

3.3.3. Análise Química

A análise química da argila e do resíduo foi determinada a partir da técnica de fluorescência de raios x, que é uma técnica adequada para análise de elementos químicos metálicos ou não metálicos, que utiliza sinais de raio x para excitar uma amostra, fazendo com que os elementos individuais presentes na amostra emitam seus raios-x característicos [18]. O equipamento de FRX utilizado foi o de modelo Axios Advanced, marca Panalytical., disponível na Sinobras, fornecedora do resíduo.

3.3.4. Análise Mineralógica

Para a caracterização química das formulações e das matérias-primas foram feitos ensaios de difratometria (análise mineralógica) de raios-x, realizados no difratômetro Rigaku no Laboratório de caracterização estrutural. Para esse ensaio, fez-se um peneiramento de 1 g de cada formulação retirada de um corpo de prova, em peneira de 100 tyler.

A difratometria de Raios-x é uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Os Raios-X ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de Raios-X após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. [18].

3.3.5. Análise Morfológica

A caracterização morfológica das matérias-primas e formulações foi feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) cujo aparelho é da marca Hitachi, modelo TM 3000. no Laboratório de caracterização estrutural. O princípio desse ensaio consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação.

Com o objetivo de se fazer uma análise semiquantitativa dos elementos presentes na amostra, foi realizada a análise de energia dispersiva de raios X (EDS) em aparelho da marca Oxford Inst., modelo SwiftED. A análise por EDS é uma ferramenta muito importante do MEV para a caracterização de materiais metálicos e semicondutores, pois permite ao pesquisador identificar a composição de sua amostra, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem [39].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a produção dos tijolos com e sem o pó de despoeiramento de acordo com as formulações escolhidas, a efetuação dos ensaios exigidos pela NBR 15270 e realização das análises químicas e físicas, os resultados serão objetos de discussão nesse tópico.

4.1. Caracterização das formulações e matérias-primas

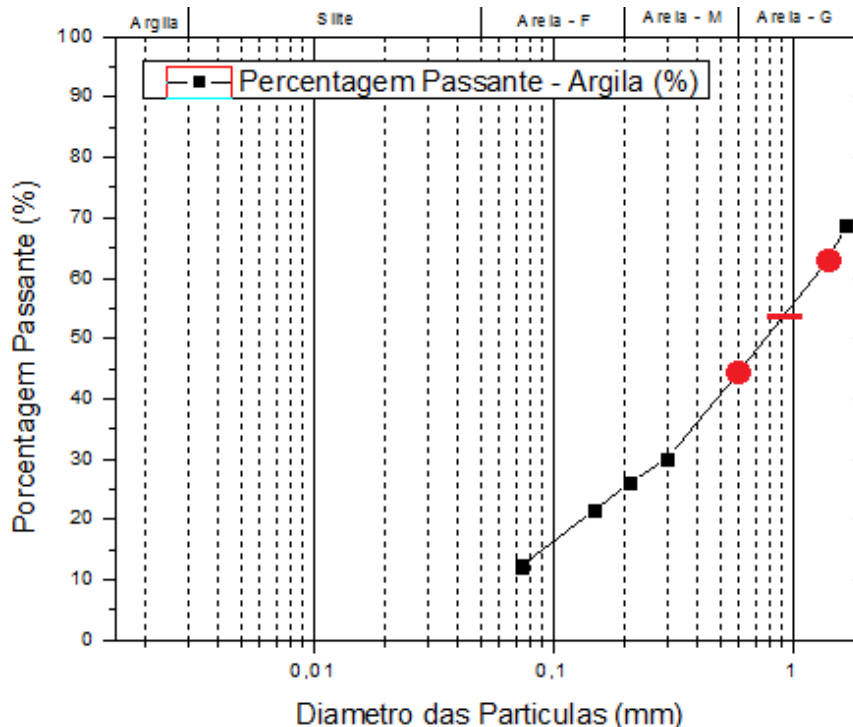
4.1.1. Caracterização da argila

Os resultados dos ensaios de caracterização da argila estão expostos e discutidos nos subtópicos seguintes.

4.1.1.1. Análise Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica em relação ao diâmetro das partículas, para a argila, estão discriminados na Figura 11.

Figura 11. Distribuição granulométrica da argila.



Fonte: Autor.

Analisando o gráfico, o diâmetro médio de partículas da matéria-prima foi de 0,9 mm. Considera-se a fração argila de uma matéria-prima de cerâmica natural a fração granulométrica com dimensão inferior a 2 μm (0,002 mm) [40]; pode-se observar que a fração argila das amostras analisadas inexistiu e a fração mais fina na análise granulométrica correspondeu a 12,3%. É recomendado na escolha de massas cerâmicas visando a produção de blocos (tijolos furados) que a fração argilosa varie de 20 a 30% no tamanho de partículas. Uma massa cerâmica por não ser constituída apenas por argila (em virtude de dificuldade que surgiriam no processamento) é formulada contendo materiais não plásticos, o que acarreta uma “mistura” de granulometrias, sendo a fração mais “fina” associada à argila e as demais (“mais grosseira”) relacionadas aos materiais friáveis, ou seja, aqueles que se fragmentam facilmente. No entanto, trabalhos analisando a viabilidade de utilização de argilas em cerâmica vermelha, indicaram argilas, cujas distribuições granulométricas também não se mostraram apropriados, mas foram consideradas viáveis para a produção de blocos cerâmicos [41, 42].

4.1.1.2. Limites de Atterberg

Na Tabela 7 têm-se os valores dos Limites de Atterberg: limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) do solo. Segundo a classificação dos solos quanto ao índice de plasticidade, para esse valor de 29,44%, essa matéria-prima apresenta alta plasticidade, muito devido a presença de argilominerais como muscovita e caulinita. Dessa forma pode-se produzir materiais que rendem boas propriedades compressíveis [43].

Tabela 7. Resultados dos Limites de Atterberg.

Limite de Liquidez (%)	49,44
Limite de Plasticidade (%)	20,00
Índice de Plasticidade (%)	29,44

Fonte: Autor.

4.1.1.3. Análise química

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises químicas e da perda ao fogo para a argila vermelha utilizada no trabalho.

Os resultados da composição química da argila utilizada na fábrica mostram que os principais constituintes desta são SiO_2 , com percentual de 57,43%, e Al_2O_3 com 23,37%, quantidade esta relacionada, normalmente, à proporção dos argilominerais presentes nas argilas utilizadas em cerâmica vermelha o que não seria diferente com a matéria-prima dessa região.

Observa-se que a argila também apresenta um teor de 4,97% de Fe_2O_3 , quantidade esta suficiente para garantir uma coloração avermelhada, como também podendo indicar a presença de hematita na amostra, a qual pode ser visualizada na análise mineralógica da matéria-prima.

A presença de K_2O , com percentual de 1,11%, indica, a presença de muscovita, mineral característico nesse tipo de matéria-prima. A presença de MgO (0,38%) é, geralmente proveniente de dolomita [44].

A perda ao fogo se deve, normalmente, à decomposição de minerais argilosos e carbonatos, e em menor proporção, à combustão de matéria orgânica.

Tabela 8 Composição química da argila e perda ao fogo (PF).

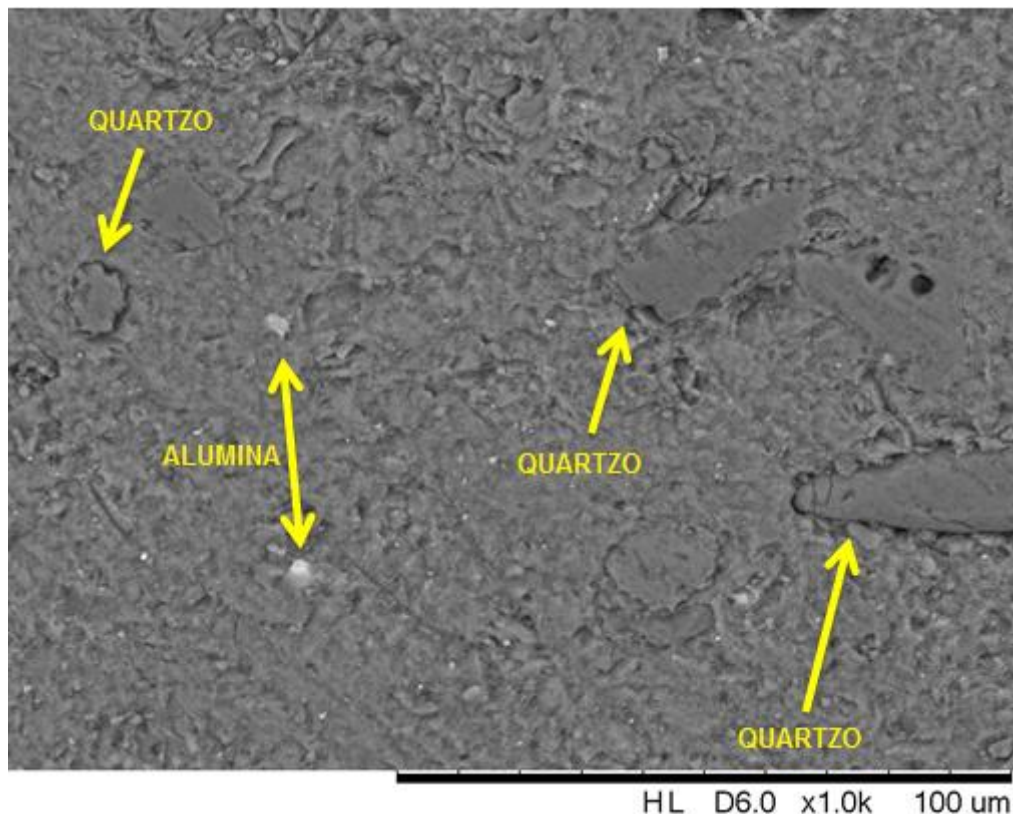
Composto	(%) em peso
SiO_2	57,42
Al_2O_3	23,37
Fe_2O_3	4,97
K_2O	1,11
TiO_2	1,01
MgO	0,38
Na_2O	0,27
P_2O_5	0,05
ZrO_2	0,03
PF	11,39
Total	100

Fonte: Autor.

4.1.1.4. Análise Morfológica

A Figura 12 mostra a micrografia eletrônica de varredura com aproximação de 100 μm , bem como algumas fases identificadas na argila, de acordo com o mapa dos elementos mais comuns produzido pelo aparelho.

Figura 12. Microscopia eletrônica de varredura da argila com as principais fases identificadas.



Fonte: Autor.

Observando a Figura, nota-se a presença intensa de quartzo livre em várias regiões e formatos diversos, o que coincide com o resultado da análise química, com 57,42% em peso do componente químico.

A alumina, segundo maior componente presente na argila em questão, com formato arredondado e esbranquiçado foi o outro composto identificado pelo MEV/EDS.

Outras fases como a titânia e muscovita, foram detectadas na análise morfológica, mas devido ao formato extremamente reduzido não foi possível identificar com clareza nos resultados.

A análise semiquantitativa pelo EDS mostrou a predominância dos seguintes elementos na argila: O (46,9%), Si (28,4%), Al (15,71%) e Fe

(6,52%). A presença desses compostos justifica a identificação das fases do MEV/EDS na Figura.

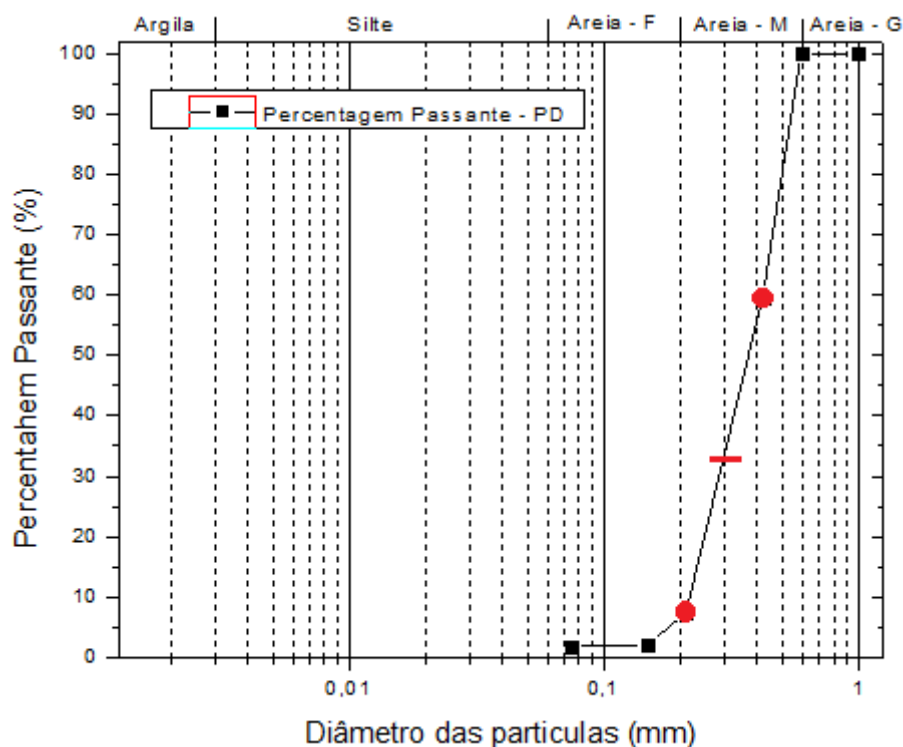
4.1.2. Caracterização do pó de despoeiramento

A caracterização do resíduo consistiu em distribuição granulométrica, análise química e análise morfológica. Os resultados serão destacados nos subtópicos seguintes.

4.1.2.1. Análise Granulométrica

Os resultados da distribuição de tamanho de partículas em relação ao diâmetro das mesmas, para o rejeito, estão apresentados na Figura 13.

Figura 13. . Distribuição granulométrica do pó de despoeiramento.



Fonte: Autor.

O traço vermelho representa o diâmetro médio das partículas que foi de cerca de 0,3 mm para o resíduo. Os pontos em vermelho representam os intervalos de diâmetros e porcentagem passante em que se encontra o diâmetro médio. Pela análise do gráfico, nota-se que 11% das partículas apresentam granulometria inferior a 0,2 mm e 89% apresentam granulometria no intervalo de 0,2 mm e 1 mm.

Esta baixa granulometria do resíduo favorece sua utilização como matéria-prima secundária na fabricação de materiais cerâmicos, pois tem como vantagem a eliminação da etapa de maceração o que acarreta ganhos em energia elétrica e tempo de preparação [21]. Observa-se ainda que a granulometria do PD encontra-se numa escala de tamanho variando entre areia fina e areia grossa em termos do diâmetro médio das partículas.

4.1.2.2. *Análise Química*

A Tabela 9 apresenta a análise química elementar do resíduo em ordem decrescente, através da técnica de fluorescência de raios X.

Tabela 9. Composição química elementar do pó de despoeiramento. *Cloro é o único elemento que está presente na sua forma elementar.

Óxidos	%
Ferro _(total)	44,25
Zinco _(total)	31,97
Cálcio	4,92
Cloro*	4,74
Chumbo	2,34
Potássio	2,11
Silício	2,08
Enxofre	2,08
Manganês	1,92
Magnésio	1,29
Bromo	0,43
Cobre	0,30

Fonte: Autor.

O resíduo analisado apresenta uma composição consistente com os rejeitos gerados na produção de aços carbono, Os resultados da composição química mostram que os principais constituintes do pó de despoeiramento em estudo são o zinco, com percentual de 31,97%, e ferro com 44,25%. Sendo que, o ferro está reportado como ferro total, pois este elemento também pode se apresentar em diferentes compostos. O zinco também está na forma total, já que o seu óxido (ZnO), é comum nesse resíduo.

A elevada concentração de zinco evidencia o aumento no uso de sucata galvanizada pela empresa geradora do resíduo. Além disso, a porcentagem de ferro, ainda que dentro dos valores encontrados para esse tipo de resíduo, sugere uma perda potencial do elemento que é o constituinte principal do produto final da empresa, o aço. A análise mostrou também a presença de chumbo (Pb), confirmando a periculosidade do resíduo, ainda que o percentual em massa desse elemento esteja dentro da faixa média para o PD.

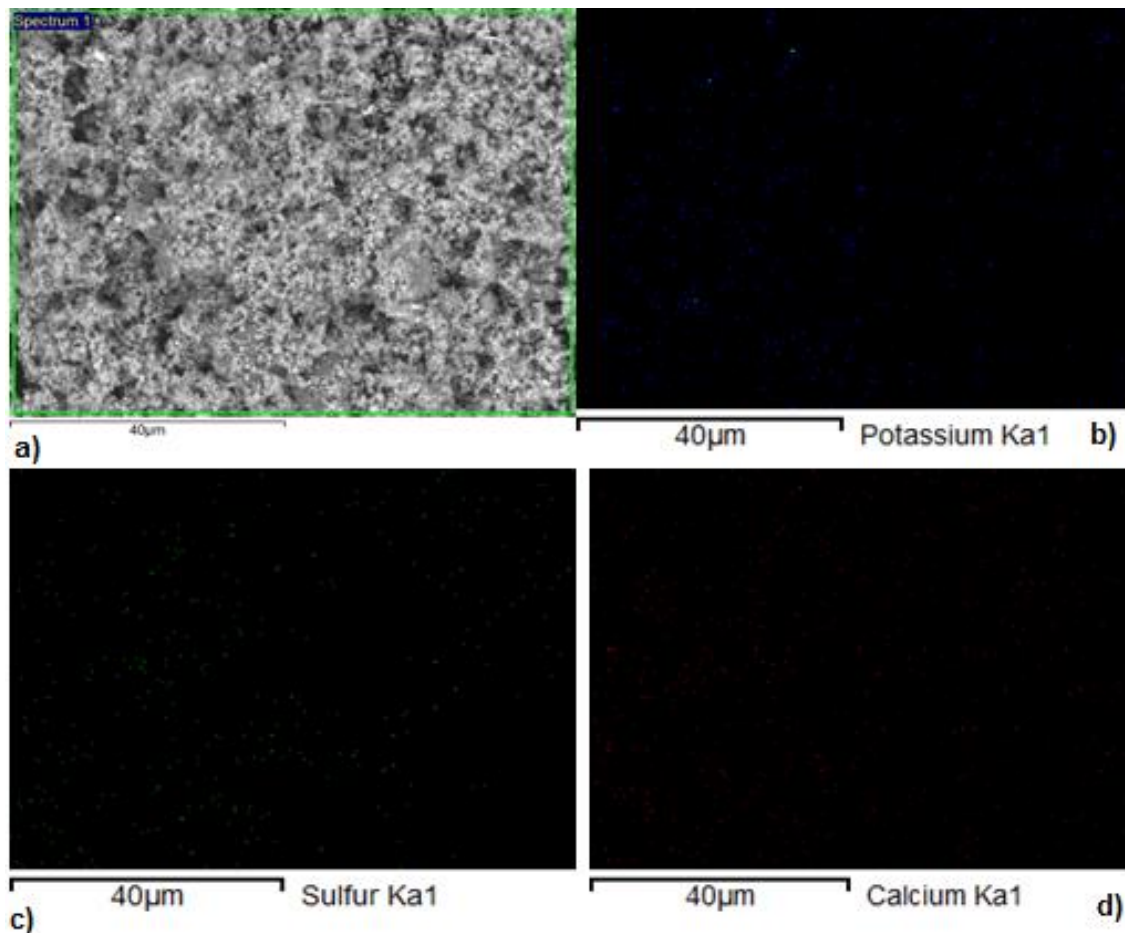
A presença de Si, provavelmente deve-se ao arraste de componentes escorificantes e/ou refratários, utilizados na fusão do aço. A grande maioria dos elementos químicos que compõem o pó de despoejamento estudado pode ser provavelmente da sucata, da injeção de finos de carvão (C), de escorificante (Ca) ou CaCO_3 , de ferro-gusa (Fe-C), ferro ligas (Fe-Cr e Fe-Si) ou de refratário (Al e Mg) utilizados durante o processo de produção de aço [21].

A análise confirmou ainda a presença de cloro (4,74%), potássio (2,11%) e enxofre (2,08%), elementos cujos sais são formadores de eflorescências nos tijolos.

4.1.2.3. Análise Morfológica

A Figura 14 é mostra o resultado do MEV/EDS do pó de despoejamento e o mapa dos elementos químicos formadores de sais presentes no rejeito.

Figura 14. MEV do pó de despeiramento com o mapa de cores dos elementos formadores de sais. a) MEV/EDS do pó; b) Mapa do elemento Potássio (azul); c) Mapa do elemento Enxofre (verde); d) Mapa do elemento Cálcio (vermelho).



Fonte: Autor.

A partir do MEV pode-se observar o formato esférico e irregular do resíduo. Essa morfologia está condizente com o principal mecanismo de formação deste material particulado, que ocorre pela ejeção de partículas tanto da escória com do metal líquido.

As cores dos pontos no mapa dos elementos são as seguintes: *Vermelho – Cálcio, Azul – Potássio, Verde – Enxofre*. A presença desses elementos comprova o resultado da análise química do rejeito. Entretanto, seus óxidos são formadores de eflorescências, fenômeno degradante nos materiais cerâmicos, portanto sua presença mesmo que baixa é prejudicial.

Os outros elementos predominantes no EDS foram: Ferro (47,28%), Zinco (23,78%) e Oxigênio (14,23%), o que confirma também os resultados do FRX do resíduo.

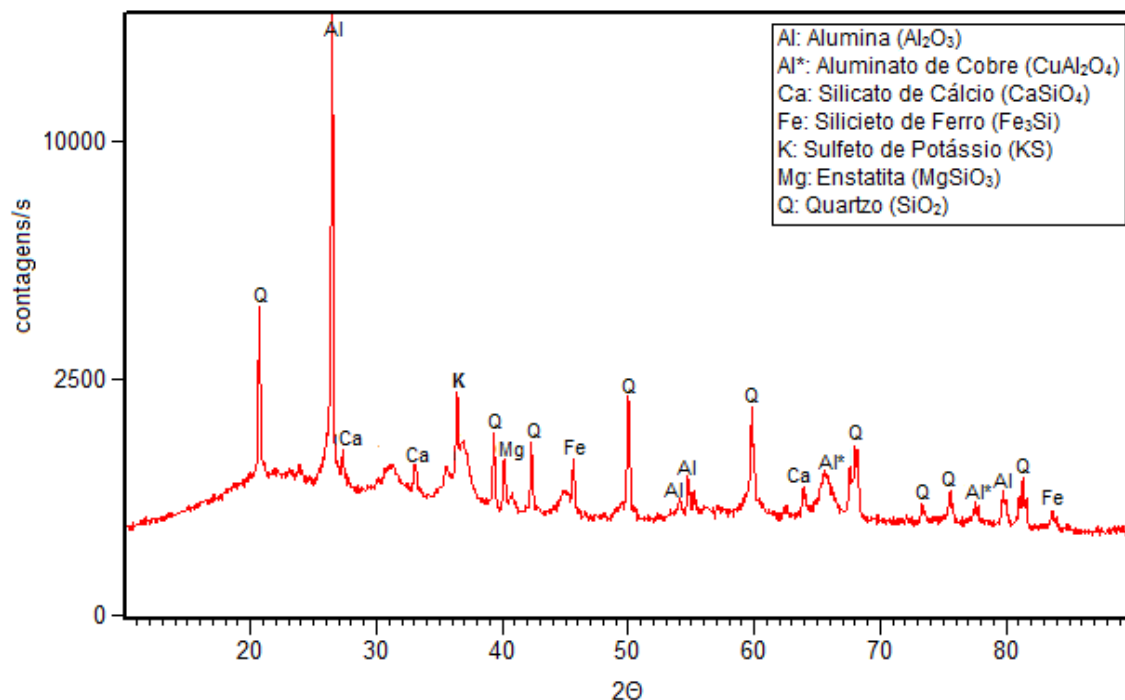
4.1.3. Caracterização das Formulações

A caracterização das formulações se baseou em análise mineralógica e análise morfológica. Os resultados serão mostrados nos subtópicos seguintes.

4.1.3.1. Análise Mineralógica

O resultado da difratometria de raios x da formulação com 10% de resíduo está ilustrado na Figura 15.

Figura 15. Difratometria de raios x da F1.



Fonte: Autor.

De acordo com as fases detectadas nos difratogramas, observou-se que, possíveis formações de novos compostos podem ter surgido durante a sinterização dos tijolos, bem como a permanência de fases que já existiam na argila, a exemplo do quartzo devido a sua abundância na matéria-prima e a alumina.

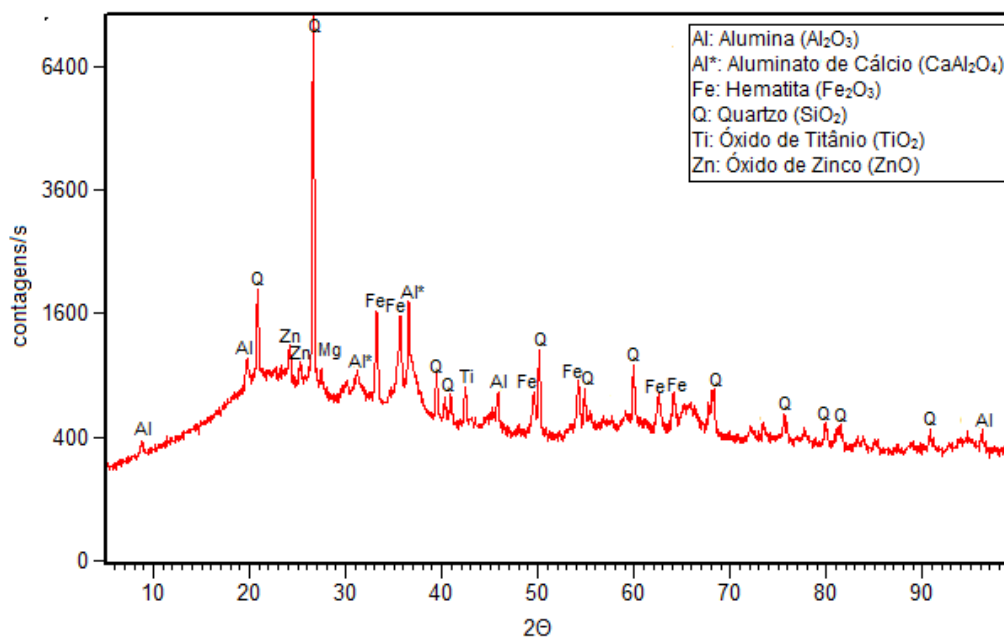
Algumas fases detectadas no difratograma surgiram possivelmente devido a reação entre compostos das matérias-primas, favorecidas pelas condições da sinterização dos blocos. Segue uma breve descrição de cada uma das fases:

- *Aluminato de cobre*: espinélio produzido no estado sólido através das reações entre a alumina (Al_2O_3 - Argila) e óxido de cobre (CuO – Pó de despoejamento), sua sinterização acontece a temperaturas acima de $900\text{ }^\circ\text{C}$ por 120 horas [45].
- *Silicato de cálcio*: composto formado a partir da síntese de quartzo (Argila e PD) e óxido de cálcio (PD), a temperaturas da ordem de $835\text{ }^\circ\text{C}$ [46].
- *Silicieto de Ferro*: Composto fundido a partir do Silício e Ferro metálico, em temperaturas de $700\text{-}800\text{ }^\circ\text{C}$ [47].

A última fase identificada no DRX foi a enstatita, mineral a base de sílica e óxido de magnésio, e que não deva ter sofrido reação para ter surgido nas formulações. Acredita-se que ela pertença aos depósitos argilosos da região a qual a argila foi extraída.

O resultado do DRX da formulação com 25% de pó do resíduo pode ser visualizado a seguir.

Figura 16. Difratometria de raios x da F2.



Fonte: Autor.

Diferente da formulação 1, o DRX não identificou a presença de minerais, as fases detectadas nos difratogramas apresentaram apenas uma possível formação de novo composto durante a sinterização dos tijolos, e houve um aumento das fases que não se solubilizaram ou dissociaram durante

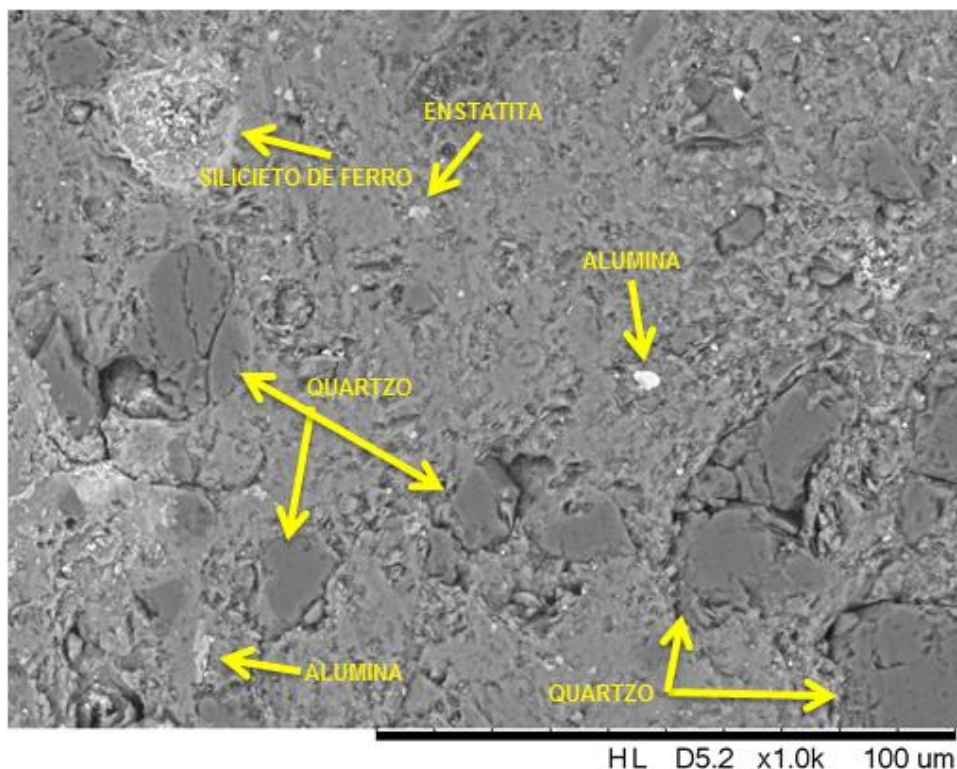
a queima como, o quartzo, a alumina, a hematita, o óxido de titânio e o óxido de zinco.

O aluminato de cálcio, único composto possível de ser formado a partir de reações de compostos existentes nas duas matérias-primas, é um espinélio produzido a partir de alumina e óxido de cálcio, sinterizados a temperaturas inferiores a 1300 °C [48]. Novamente, a condição da queima dos tijolos favorece o surgimento dessa fase pelo menos de forma residual.

4.1.3.2. Análise Morfológica

A Figura 17 mostra a micrografia eletrônica de varredura com aproximação de 100 µm da formulação 1, bem como algumas fases identificadas, de acordo com o mapa dos elementos mais comuns detectados no ensaio.

Figura 17. MEV/EDS da formulação 1 com as principais fases identificadas.



Fonte: Autor.

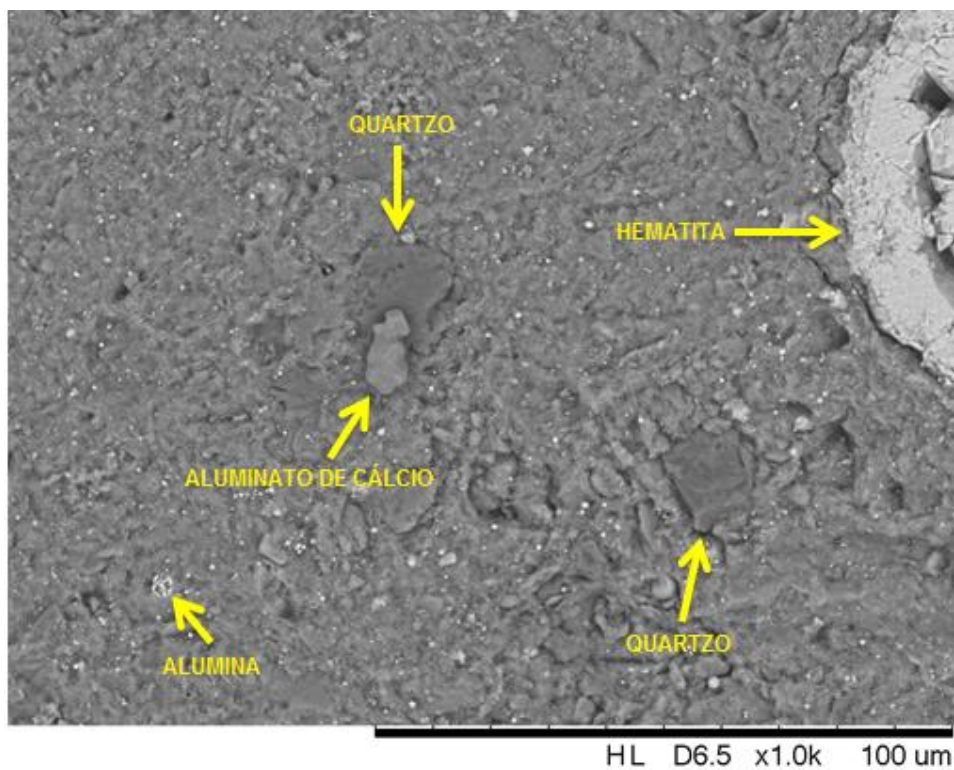
Conforme a Figura, com uma cor acinzentada, percebe-se a presença intensa de quartzo livre em várias regiões e formatos diversos, o que é justificado pela sua abundância na argila.

Com uma cor mais clara, identificou-se pelo mapa de cores a presença do composto Siliceto de Ferro, através da presença intensa de Ferro e Silício nessa região da micrografia. A alumina e a enstatita foram os outros compostos identificados no MEV/EDS. A presença dessas fases comprova o DRX feito na amostra

A análise semiquantitativa pelo EDS mostrou a predominância dos seguintes elementos na formulação: O (42,6%), Si (27,2%), Fe (12,9%) e Al (11,1%).

A Figura 18 mostra o MEV/EDS da formulação 2, aproximado em 100 μm , e algumas das fases localizadas, conforme os elementos mais comuns detectados pelo EDS.

Figura 18. MEV/EDS da formulação 2 com as principais fases localizadas.



Fonte: Autor.

Assim como o MEV/EDS da F1, temos a predominância apesar de reduzida, de quartzo livre em diversas regiões e aspectos variados, além da presença de alumina sempre com um aspecto claro, arredondado e tamanho reduzido.

O MEV/EDS detectou ainda o aluminato de cálcio com aspecto irregular numa região próxima do centro da imagem, e a hematita, composto com maior concentração em área detectado na micrografia

A análise semiquantitativa pelo EDS mostrou a predominância dos seguintes elementos na formulação: O (44,5%), Si (22,5%), Al (13,8%) e Fe (11,4%). A quantidade em peso desses elementos permite o surgimento das fases destacadas pelo DRX da amostra.

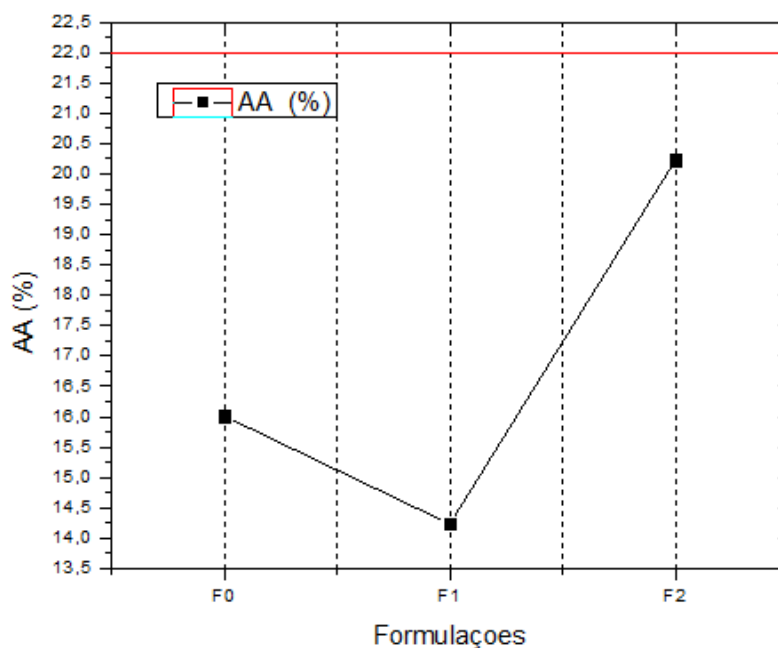
4.2. Propriedades físicas e mecânicas

Os resultados obtidos nos ensaios para caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos tijolos queimados e formulados com argila e incorporados com 10 e 25% em peso de pó de despeiramento, são apresentados a seguir.

4.2.1. Absorção de Água

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para absorção de água, para as amostras ensaiadas em função de cada formulação.

Figura 19. Variação da absorção de água em função da porcentagem em peso de pó de despeiramento na argila vermelha.



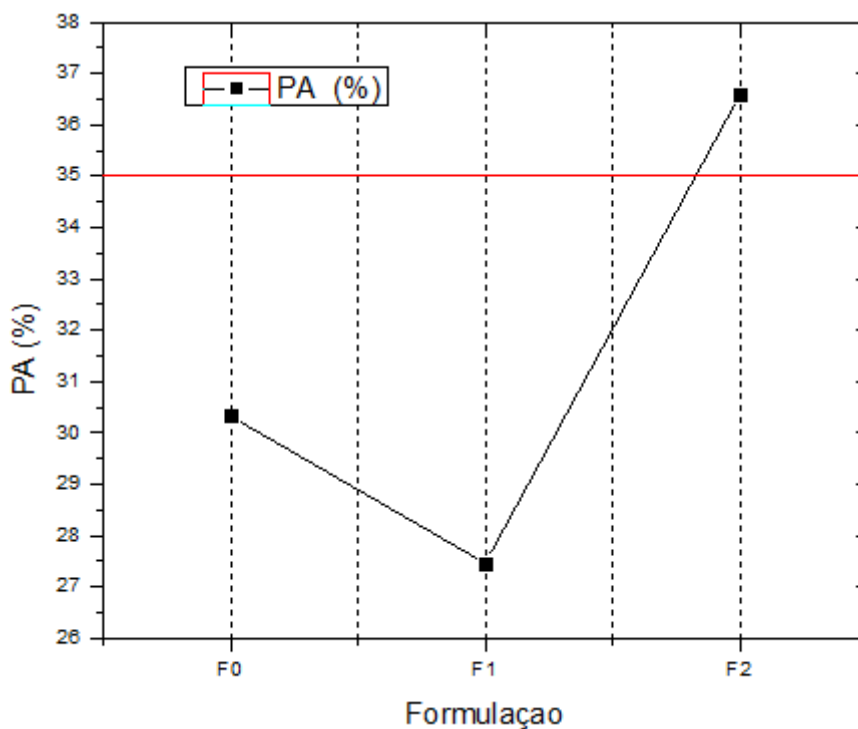
Fonte: Autor.

Observa-se uma oscilação nos resultados da absorção de água com a incorporação do rejeito. A F1 com 10% do resíduo provocou uma maior densificação nos corpos cerâmicos. Com o aumento da inserção do pó de despoeiramento para 25% na F2, o efeito foi invertido, ou seja, densificou-se menos os tijolos, aumentando o número de poros. Apesar disso todos os resultados estão dentro do previsto em norma (linha divisória vermelha no gráfico).

4.2.2. Porosidade Aparente

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos para a porosidade aparente em função dos três tipos de tijolos do trabalho.

Figura 20. Variação da porosidade em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha.



Fonte: Autor.

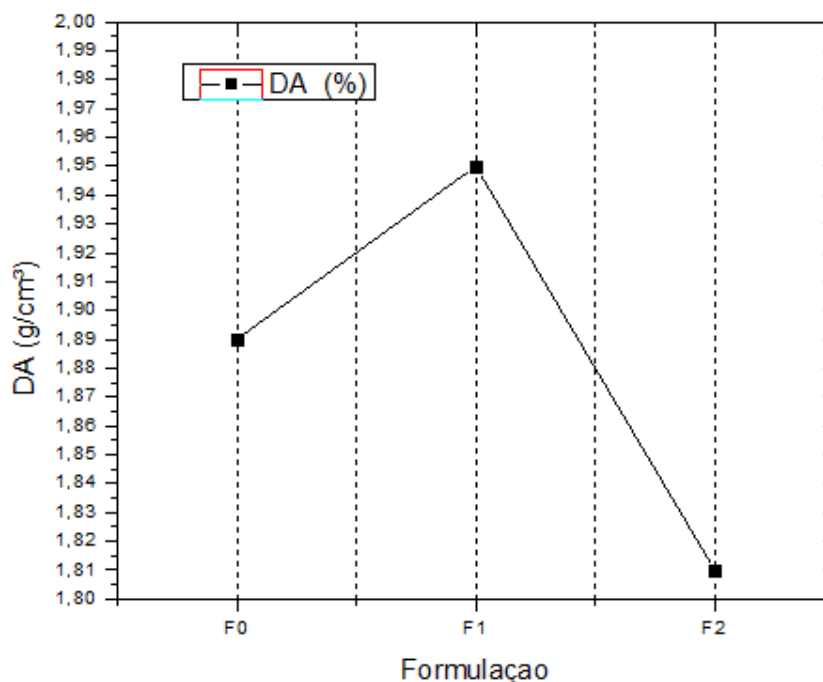
Os resultados mostraram uma relação direta da diminuição da porosidade e absorção de água após a queima do material, principalmente na F1, que obteve o melhor resultado, o que ocorre naturalmente para produtos fabricados a partir de materiais argilosos. Este comportamento é devido a temperatura da queima, o qual permite maiores transformações físico-

químicas, influenciando no comportamento do material quanto a estas propriedades, como também na sua densificação, como resultado de uma melhor sinterização/vitrificação. A maior densificação, neste caso, também deve-se à maior densidade da massa cerâmica, pois a densidade do pó é maior em relação à argila vermelha. Entretanto, assim como nos resultados de absorção de água a F2, devido ao excesso de resíduo, acabou demonstrando um efeito negativo nesse parâmetro ficando inclusive fora do limite da NBR 15270-1.

4.2.3. Densidade Aparente

Os resultados obtidos para a densidade aparente dos corpos de prova queimados na temperatura utilizada na produção podem ser observados na Figura 21.

Figura 21. Variação da densidade aparente em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila vermelha.



Fonte: Autor.

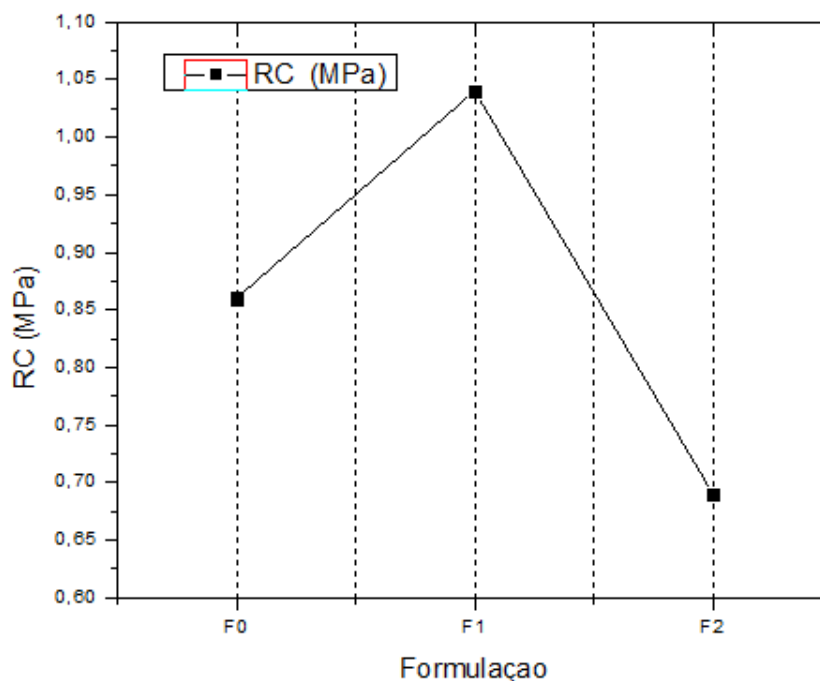
A partir da Figura verifica-se o aumento da densidade aparente em F1 em relação à formulação sem resíduo, seguida de uma queda repentina com F2, apesar de que todos os resultados se encontram dentro do limite da NBR 15270-1. À medida que se aumenta o teor de resíduo em argila até certa

quantidade, ocorre um aumento nos valores de densidade aparente. A boa sinterabilidade que os tijolos tiveram, junto com a adição do pó de despoeiramento em argila pode ter sido responsável pelo aumento da densidade, pois o tamanho de partículas influencia a densificação do material. E também, devido à maior densidade do pó em relação à argila. Quanto menor a granulometria, maior a área superficial, maior a probabilidade que ocorram reações entre o resíduo e a massa cerâmica. E esta tendência permanece até que se atinge um máximo de densificação. Todavia, percebe-se que a partir de certa quantidade em massa inserida do rejeito o efeito é revertido, isso é observado na F2, em todos os parâmetros físicos determinados.

4.2.4. Resistência Mecânica

A figura 22 apresenta os resultados médios obtidos para a resistência a compressão dos corpos de prova em função das formulações, para as amostras ensaiadas.

Figura 22. Variação da resistência mecânica em função da porcentagem em peso de pó de despoeiramento em argila.



Fonte: Autor.

Pela análise da Figura, observa-se que a inserção da composição em massa do resíduo acarreta no aumento da resistência mecânica em relação a

massa pura, seguido de um decréscimo acentuado quando se insere 25% na F2.. Este comportamento pode ser explicado pelos resultados dos parâmetros anteriores como a diminuição da porosidade aparente e aumento da densidade da massa cerâmica em F1, e o contrário acontecido com F2.

Estudo feito por FLORÊNCIO *et al.* [49], concluiu que a adição do resíduo elevou o valor da resistência mecânica, em relação à massa básica de argila, apenas para adições até 5% em peso de resíduo. Efeito idêntico aconteceu com essa pesquisa

Os resultados de MONTEDO *et al.* [50] mostram que até um percentual de 3% em peso não houve variação significativa na resistência mecânica do material. No entanto, a partir de 5% em peso de adição de pó de despoejamento, a resistência diminuiu significativamente.

Pode-se concluir com isso que, embora a sinterabilidade do material tenha aumentado, a adição de pó leva, provavelmente, a uma diminuição da plasticidade do material a partir de determinado percentual de adição, uma vez que este resíduo não é plástico, interferindo diretamente na resistência mecânica final do material.

Deve ser destacado também que apesar da melhora da resistência mecânica, nenhuma das formulações proposta e nem as amostras com a argila pura, obtiveram resultados que estivessem dentro da NBR 15270-1 que é de no mínimo 1,5 MPa para tijolos vazados. A esse fato pode ser questionado como é preparada a massa cerâmica na fábrica em que foi feita a produção, bem como os equipamentos utilizados ou até mesmo a queima do material, que pode não ter sido tão eficiente a ponto de deixar os tijolos com a resistência devida mesmo àqueles com argila pura.

4.3. Propriedades geométricas

A tabela 10, trás as médias de todos os parâmetros geométricos realizados no trabalho nas formulações produzidas e os valores conforme a NBR 15270. Consequente, os comentários em relação aos resultados.

Tabela 10. Média dos resultados dos parâmetros geométricos das formulações propostas.

	F0	F1	F2	NBR 15270
Comprimento (mm)	196,62	197,16	195,15	185-195
Altura (mm)	187,24	187,15	187,18	185-195
Largura (mm)	86,41	88,61	83,43	85-95
Septos (mm)	6,85	6,99	6,87	> 6
PE* (mm)	7,51	8,08	6,77	> 7
DRE** (mm)	5,30	5,41	4,16	< 3
PF*** (mm)	2,10	2,20	0,95	< 3

*Parede externa; **Desvio em relação ao esquadro; ***Planeza das faces.

Fonte: Autor.

Para as dimensões efetivas das faces dos tijolos, como observado na Tabela, todas as formulações estão inadequadas no comprimento, todas estão em conformidade na altura, e apenas a F2 está fora da Norma na largura. Em relação aos septos todas as formulações obtiveram valores superiores a 6 mm na média, e apenas a F2 ficou abaixo do recomendado na NBR 15270-1 para o parâmetro Parede externa.

Os resultados do Desvio em relação ao esquadro mostraram que todas as formulações ficaram fora da Norma, ao contrário da média dos valores da Planeza das faces, em que as composições se mostraram adequadas.

Diante dos resultados, e levando em conta que as dimensões geométricas dos tijolos estão relacionadas ao maquinário da fábrica e ao preparo da massa cerâmica, ressalta-se mais uma vez o cuidado e a revisão que deve ser feita na boquilha que pode não está ajustada adequadamente e assim sendo produzindo fora das dimensões estabelecidas pela Norma, e o cortador que é responsável direto pelo comprimento e que também deve estar desregulado. Quanto ao preparo da massa cerâmica, deve-se atentar as etapas de maceração e homogeneização, visto que uma massa argilosa com

agregados irregulares, pode danificar o maquinário, provocando problemas na boquilha e no cortador.

4.4. Características Visuais

As características visuais dos blocos cerâmicos de vedação foram analisadas com a finalidade de determinar se os blocos constam gravados em uma das suas faces externas, a identificação da fabricante e do bloco e os valores das dimensões efetivas: largura, altura e comprimento, conforme a NBR 15270-1. A Figura 23, mostra o resultado da avaliação.

Figura 23. Exemplo de gravação com os dados da empresa e dimensões efetivas em um bloco utilizado na pesquisa.



Fonte: Autor.

Pode-se observar que os tijolos atendem a Norma, uma vez que eles trazem gravados em uma das faces, o nome da empresa, telefone de contato, e dados das dimensões efetivas exigidas. Essa recomendação é importante, pois é uma forma de se diferenciar os produtos das diversas fábricas fornecedoras de blocos de vedação na região.

Outro aspecto visual observado nos tijolos é a coloração desenvolvida, já que ela é uma forma de verificar o quão eficiente foi a queima do produto, além do aspecto estético que aqui na região é uma das exigências dos compradores. Nesse trabalho os tons para cada formulação foram completamente distintos, como podemos observar na Figura 24.

Figura 24. Cores desenvolvidas pelos tijolos após a queima. Esq.: F0; Centro: F1; Dir.: F2.



Fonte: Autor

Como pode ser percebido, conforme se aumenta o teor do resíduo, mais escuro e avermelhado ficam os tijolos, passando do bege (F0), para o alaranjado (F1) e finalmente ficando avermelhado (F2). Essa mudança de coloração acontece devido ao teor de ferro contido no pó de despoejamento. Essa cor mais escurecida, não é muito agradável para os compradores, aja vista que segundo os fabricantes, quanto mais claro o tijolo, mais fácil para o mesmo ser vendido.

5. CONCLUSÕES

De acordo com todos os ensaios realizados nesse trabalho faz-se os seguintes comentários.

A granulometria do pó de despoejamento e da argila é razoavelmente fina. A análise granulométrica realizada mostrou que 11% das partículas do resíduo têm diâmetro inferior a 0,2 mm e que o diâmetro médio é de 0,3 mm. A argila apresentou um diâmetro médio de 0,9 mm e 12,3% de partículas menores que 0,1 mm de diâmetro. Com um limite de liquidez de mais de 49%, a argila é bastante plástica e recomendável para a produção de tijolos.

A análise química do resíduo mostrou que o mesmo possui 44% de Fe e 32% de Zn na forma metálica ou oxidada, contendo também outros metais, tais como Al, Si e Mn, e sais de Ca e S. O FRX da argila mostrou que ela é composta basicamente de sílica, alumina e hematita, além de outros óxidos residuais de importância como os de magnésio, potássio e sódio.

Os principais compostos encontrados nas formulações por difratometria de raios X foram oriundos de reações entre compostos da argila e do pó de despoejamento como os espinélios do tipo aluminato de cobre e de cálcio, o siliceto de ferro e sulfeto de potássio. Houve também a permanência de compostos que não se dissociaram durante a queima como o quartzo, hematita, alumina e os óxidos de zinco e titânio, além da enstatita, um mineral proveniente da argila.

A morfologia das partículas das matérias-primas e das formulações apresentaram formatos diversos e predominância de fases detectadas no DRX e que mostraram coerência a partir dos resultados semiquantitativos do EDS, como o quartzo, a hematita e a alumina. Alguns dos compostos que surgiram durante a queima das formulações, também foram localizados no MEV/EDS, são eles a enstatita, o aluminato de cálcio e o siliceto de ferro.

Os ensaios de avaliação dos tijolos após a queima mostraram que esses materiais não podem ser produzidos com essas quantidades do rejeito, uma vez que os resultados de uma ou das duas formulações propostas além do próprio produto com apenas argila ficaram abaixo do previsto na Norma 15270, em parâmetros físicos como densidade aparente, no parâmetro mecânico de resistência a compressão, e em algumas dimensões geométricas

como comprimento, largura, parede externa e desvio em relação ao esquadro. Em relação as cores desenvolvidas, por terem ficado mais escuros com o aumento do resíduo, os tijolos não tiveram um aspecto agradável.

Diante dos resultados, recomenda-se que seja feito uma atualização dos maquinários da fábrica, principalmente na boquilha da maromba que determina as dimensões dos blocos, além de um melhor preparo da argila, nas etapas de maceração e destorroamento, para minimizar problemas durante a queima que podem influenciar no desempenho físico-mecânico dos produtos. Em relação ao pó de despoeiramento, sugere-se a inserção em menor quantidade e um tratamento prévio para a retirada de elementos deletérios, para verificar se haverá melhora na sua aplicação nos blocos de vedação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DA SILVA, A.R. **Incorporação de pó de despoeiramento em cerâmica vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais). Faculdade de Engenharia de Materiais/UNIFESSPA Marabá, PA, Brasil, 2013.
- [2] SOUSA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia das argilas**. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1989.
- [3] ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas – definição e classificação**. 2016. Disponível em: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em 02 dez. 2016.
- [4] ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas – Processos de Fabricação**. 2016. Disponível em: <http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em 02 dez. 2016.
- [5] SILVA, A.V.: **Análise do processo produtivo dos tijolos cerâmicos no estado do Ceará. Da extração da matéria-prima à fabricação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Coordenação do Curso de Engenharia Civil/UFCE Fortaleza, CE, Brasil, 2009.
- [6] SENAI Departamento Regional do Piauí. **Bases para o aprimoramento competitivo de pequenos empreendimentos oleiros – Cerâmicos**. Teresina – PI, 2006.
- [7] VERÇOZA, E.J. **Materiais de Construção 1**. Porto Alegre: Editora Sagra, 1987.
- [8] NORTON, F.H. **Introdução à tecnologia cerâmica**, tradução de Jefferson Vieira de Sousa. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1973.
- [9] SOARES, M.S. **Caracterização das argilas de Marabá e região para formulação com misturas de massas cerâmicas**. Relatório Técnico-Científico. Faculdade de Engenharia de Materiais/UFPA Marabá, PA, Brasil, 2009.

- [10] INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portal do Consumidor. **Bloco Cerâmico (Tijolo)**. 2001. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/tijolo.asp>>. Acesso em 08 dez. 2016.
- [11] THOMAZ, E.; MITIDIÉRI FILHO, C.V.; DA ROCHA CLETO, F.; CARDOSO, F.C. **Alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. São Paulo: Editora IPT, 2009.
- [12] RÉGO, V. R.; **Avaliação da conformidade de blocos cerâmicos para alvenaria de vedação produzidos na região integrada de desenvolvimento da grande Teresina**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Exatas e da Terra/UFRN Natal, RN, Brasil, 2008.
- [13] NetCeramics, Portal. **Informações Técnicas - Processo de Fabricação**. 2009. Disponível em: <http://www.netceramics.com/InformacoesTecnicas/ProcessodeFabricacao/tabid/394/language/pt-BR/Default.aspx>. Acesso em: 14 out. 2016.
- [14] ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica. **Manuais – Bloco**. Rio de Janeiro - PI, 2002.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. NBR 15.270-1**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Métodos de Ensaio. NBR 15.270-3**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [17] RIZZO, E. M. da S., **Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco**. São Paulo: Editora ABM, 2006.
- [18] RAMOS, R.A. **Caracterização do pó de aciaria elétrica e estudo da viabilidade de processos de aproveitamento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Metalúrgica). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFCE Fortaleza, CE, Brasil, 2013.

- [19] RIZZO, E. M. da S., **Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco**. São Paulo: Editora ABM, 2006.
- [20] BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Perfil do Ferro-Gusa**. Minas Gerais, DF. 2009.
- [21] DA SILVA, M. C. da; **Reciclagem do pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia/UFRGS Porto Alegre, RS, Brasil, 2006.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos - Classificação. NBR 10.004**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [23] MANTOVANI, M. C.; **Caracterização de poeiras geradas em forno elétricos a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica/USP São Paulo, SP, Brasil, 1998.
- [24] DELHAES, C.; HAUCK, A.: **Mechanism of dust generation in a stainless steelmaking converter**. Steel Research, vol. 64, n.1, pp. 22-27, jan./1993.
- [25] TELLES, V. B.; **“Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica/USP São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas : **NBR 10.006. Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos**. Segunda Edição, 31/05/2004. Válida a partir de 30/11/2004. 2004.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. NBR 10.005**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [28] TAKANO, C.; CAPOCCHI, J.D.T.; NASCIMENTO, R. da C.; MOURÃO, M.B.; LENZ E SILVA, G.F.B.; SANTOS, D.M.: **A reciclagem de resíduos**

siderúrgicos sólidos. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, SP, 28 a 31 Agosto 2000.

[29] MOTHÉ, A. V.; **Utilização da lama de alto-forno em cerâmica vermelha.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciência e Tecnologia/UENF Campo dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2008.

[30] DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B.: **Recycling of Industrial and Urban Wastes in Brick Production: A Review (Part 1).** Tile & Brick Int., vol. 13, n.3, pp. 218-225, 1997.

[31] SEGADÃES, A. M.; KNISS, C.; ACCHAR, W.; KUHNEN, N. C.; HOTZA, D.: **Waste Treatment and Clean Technology.** In: Global Symposium on Recycling Proceedings, Madrid, ES, 26 a 29 Setembro 2004.

[32] CARDOSO, M.D. **Reciclagem de escória de forno panela de aciaria elétrica em material cerâmico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas/UNISINOS São Leopoldo, RS, Brasil, 2009.

[33] LIMA, L.H.M.; REIS, S.C.; BORGES, L.R.: **Aproveitamento de resíduo siderúrgico em blocos Cerâmicos argilosos.** Revista E-Xacta, v. 6, n.2, pp. 69, nov. 2013.

[34] CASTRO, M.A.M.; DA COSTA, F.G.; BORBA, S.C.; FAGURY NETO, E.; RABELO, A.A.: **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos.** Revista Matéria, vol. 21, n.03, pp. 666-676, set. 2016.

[35] MACHADO, A.T.; TACHARD, A.L.R.; RIBEIRO, D.V.; CARDOSO, R.J.C.: **Utilização do pó de aciaria (PAE) como adição ao concreto.** In: 15º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, 09 a 13 Novembro 2002.

[36] DA SILVA, E.J. **Estrutura e propriedades de materiais cerâmicos.** Rio de Janeiro. 2011.

- [37] GROENNER, A.G.P. **Reaproveitamento do resíduo de fabricação de consumíveis para soldagem em tijolos de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente). Escola de Engenharia/UFMG Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise Granulométrica. NBR 7181/84**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- [39] DEDAVID, B.A.; GOMES, G.I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura. Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: Editora EDIPUCRS, 2007.
- [40] MACEDO, R.S.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C.: **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha**. Revista Cerâmica, vol. 54, n.32, pp. 411-417, oct./nov. 2008.
- [41] SOUZA, G.P.; SANCHEZ, R.; HOLANDA, J.N.F. de.: **Características e propriedades físico-mecânicas de materiais caulíníticos queimados**. Revista Cerâmica, vol. 48, n.306, pp. 102-107, abr./jun. 2002.
- [42] VIEIRA, C.M.F.; SOARES, T.M.; MONTEIRO, S.N.: **Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima**. Revista Cerâmica, vol. 49, n.312, pp. 245-250, oct./dez. 2003.
- [43] DE ALMEIDA, G.C.P.; **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Juiz de Fora: Editora Rudder, 2005.
- [44] DUTRA, R. P. S.; PONTES, L. R. A.: **Estudo das Características de Argilas no Litoral Paraibano – Parte II**. In: 46° Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, SP, 26 a 29 Maio 2002.
- [45] VALDERRAMA, A.J.R.: **Síntese, Caracterização elétrica, magnética e estrutural do Aluminato de Cobre – CuAl_2O_3** . Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia). Centro de desenvolvimento, processamento e caracterização de materiais/UNIFEI Itajubá, MG, Brasil, 2014.

- [46] SOARES, J.J.; RODRIGUES, F.A.: **Síntese e caracterização de silicatos de cálcio**. In: 47° Congresso Brasileiro de Química, Natal, RN, 17 a 21 Setembro 2007.
- [47] RIBEIRO, A.S.; LENZ E SILVA, G.F.B.; BASSALO, H.C.; BONADIA NETO, P.; PANDOLFELLI, V.V.: **Técnicas de Caracterização para o desenvolvimento de massas de tamponamento para alto-fornos**. Revista Cerâmica, vol. 59, n.349, pp.47-58, jul./set. 2013.
- [48] ANDRADE, T.L.; SANTOS, G.L.; PANDOLFELLI, V.C.; OLIVEIRA, I.R.: **Otimização da síntese das fases de cimento de aluminato de cálcio para fins biomédicos**. Revista Cerâmica, vol. 60, n. 353, pp.88-95, jan./mar. 2014.
- [49] FLORÊNCIO, R.S.V.; GOUVÊA, D.; CAMARGO, A.C.; PORTELA, J.C.S.: **Fabricação de Tijolos com Matérias-Primas Argilosas do Município de Salto e Indaiatuba e com Pó de Aciaria Elétrica**. In: 47° Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa, PB, 15 a 18 Junho 2003.
- [50] MONTEDO, O. R. K.; REITZ, G.M.; BERTAN, F.M.; ROSAURA PICCOLI.; HOTZA, D.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P.: **Utilização de Pó de Aciaria em Massa de Cerâmica Vermelha**. Cerâmica Industrial, vol. 8 n. 5/6, pp. 14-17, set./dez. 2003.